

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA SALUD

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL GRADO DE
LICENCIATURA EN FARMACIA**



Título de la investigación:

“Gestión de la seguridad química en laboratorios académicos: análisis bibliográfico sobre riesgos de intoxicación, manejo de reactivos y estrategias de disposición de residuos”

Nombre del /los estudiantes:

Amanda Segura Elizondo

Tutor(a):

Leonardo Jiménez Madrigal

Sede San José

Año 2025

I. Resumen

En este trabajo se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva de 40 estudios internacionales y nacionales para analizar la seguridad química en laboratorios académicos, enfocándose en los principales riesgos de intoxicación, el manejo adecuado de reactivos y residuos peligrosos, y la identificación de buenas prácticas respaldadas por la evidencia más reciente. Los resultados demostraron que los compuestos orgánicos volátiles y la deficiente ventilación son los principales factores asociados a intoxicaciones agudas, predominando la exposición por inhalación y los desafíos relacionados con la infraestructura y la capacitación adecuada en las instituciones costarricenses.

Paralelamente, se profundizó en el análisis de sistemas de gestión de reactivos y residuos, destacando la importancia del cumplimiento del Sistema Globalmente Armonizado, la digitalización de inventarios y la adecuada disposición final conforme a la normativa nacional. Además, se identificó que la integración de estrategias de química verde y la cultura institucional de prevención constituyen factores clave para minimizar la generación de desechos y reducir los incidentes en el entorno académico.

Finalmente, la investigación resalta la relevancia de la formación farmacéutica y la contribución de profesionales de farmacia en la gestión de seguridad química, proponiendo su inclusión en equipos multidisciplinarios para fortalecer la prevención de riesgos y la trazabilidad de sustancias. Se concluye que el reto principal para Costa Rica es la implementación sistemática y sostenida de buenas prácticas, más allá del conocimiento teórico o normativo, mediante la asignación estratégica de recursos y la integración de competencias complementarias en salud y ciencias aplicadas.

II. Agradecimientos

Agradezco a mis padres por su ayuda infinita durante todos los años de mi carrera y a lo largo de mi vida, por ser el apoyo más grande que he tenido y el ejemplo que me guía para seguir adelante. Sin su constancia, compromiso y esfuerzo, este logro no habría sido posible.

A mi pareja, por compartir conmigo este camino académico y personal como compañera de vida y futura colega. Su lealtad, empatía y capacidad para comprender las largas jornadas de estudio han sido esencial. Gracias por demostrarme el valor de la compañía verdadera, por sostenerme cuando necesitaba ánimo y por crecer a mi lado con sueños compartidos.

A mis hermanas, por su compañía, por animarme en los momentos difíciles y por celebrar siempre mis pequeños y grandes logros; en ellas encontré siempre una fuente inagotable de apoyo y alegría.

A mi tía, por ser ejemplo de entrega y por estar presente con palabras de aliento y gestos sinceros en la etapa de mi formación profesional.

A Iris, compañera y amiga invaluable que encontré en la universidad, por ser fuente de ánimo, apoyo y sinceridad durante el tiempo compartido en la universidad.

También agradezco a mi tutor por su asesoría y exigencia profesional, y a quienes, de una u otra manera, me acompañaron en este camino académico y personal. Gracias a Dios por permitirme llegar hasta aquí y a todos los profesores y compañeros de la Universidad Internacional de las Américas por su aporte y dedicación.

III. Dedicatoria

A mis padres, por su entrega incondicional, por confiar siempre en mi capacidad incluso cuando yo misma dudaba, y por su apoyo diario a lo largo de los años de carrera y de vida. Sin su ejemplo de esfuerzo, su lealtad infinita y el valor de su compañía en cada momento difícil, este logro no habría sido posible; les debo este y muchos otros triunfos personales.

A mi pareja, compañera de carrera y futura colega, por caminar conmigo en cada etapa, por sostenerme en los tropiezos, compartir el cansancio y la motivación, y demostrarme que la perseverancia y el amor multiplican las fuerzas hasta lograr metas grandes. Gracias por tantos días y noches de estudio juntas, por celebrar cada pequeño avance y por soñar profesional y personalmente a mi lado.

A mis hermanas, que, con su apoyo, alegría incondicional y esa forma suya de hacerme reír y sentirme en casa sin importar los desafíos, hicieron de cada día un poco más liviano y mucho más feliz.

A toda mi familia y a quienes me acompañaron, sea con palabras de aliento, gestos cotidianos o simplemente estando allí cuando más los necesité. Este trabajo lleva un pedacito del esfuerzo, la inspiración y el amor que cada uno puso en mi vida y en esta etapa.

Y a mi niña interna, que alguna vez soñó con alcanzar logros grandes y se atrevió a imaginarse vestida de bata blanca, creyendo que todo era posible; hoy, con cariño y orgullo, le dedico este triunfo y le agradezco no haber dejado de soñar ni en los días más complejos.

A mí misma, por no rendirme a pesar del cansancio, por confiar en mi capacidad de aprender y de evolucionar, y por permitirme celebrar hoy lo que un día solo fue un sueño. Este logro es también tuyo y será siempre un recordatorio de que valió la pena insistir, crecer y avanzar.

IV. Tabla de contenido

I. RESUMEN	II
II. AGRADECIMIENTOS	III
III. DEDICATORIA	IV
IV. TABLA DE CONTENIDO.....	V
V. LISTA DE TABLAS.....	IX
VI. LISTA DE FIGURAS	X
VII. LISTA DE GRÁFICOS	XI
VIII. LISTA DE ABREVIATURAS	XII
CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1. Objetivo general	5
1.3.1. Objetivos específicos.....	5
1.4. JUSTIFICACIÓN	6
1.5 ANTECEDENTES	12
1.5.1 Antecedentes históricos.....	12
1.5.2 Antecedentes internacionales	14
1.5.3 Antecedentes nacionales	27
CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO	31
2.1 CONCEPTUALIZACIÓN DE LA SEGURIDAD QUÍMICA	33
2.1.3 Clasificación de sustancias químicas	37
2.1.3.1 Sistema GHS	38
2.1.4 Riesgos asociados a sustancias químicas	40
2.2 REACTIVOS QUÍMICOS EN LABORATORIOS ACADÉMICOS.....	43
2.2.1 Definición y características	43
2.2.2 Funciones y usos en docencia e investigación	44
2.2.3 Manejo, almacenamiento e inventario de reactivos	44

2.2.4 Consecuencias de una gestión inadecuada	45
2.3.1 Mecanismos y vías de exposición	47
2.3.2 Factores de riesgo comunes.....	48
2.3.3 Medidas de prevención y respuesta.....	49
2.4 GESTIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS.....	50
2.4.1 Clasificación de residuos peligrosos	50
2.4.2 Métodos de recolección, neutralización y disposición final	51
2.4.3 Normativas ambientales aplicables	53
2.4.4 Estrategias de minimización y sostenibilidad	53
2.5.1 Normativas internacionales (OSHA, GHS, OMS, ACS).....	54
2.5.2 Marco regulatorio nacional (Costa Rica)	58
2.5.3 Políticas institucionales universitarias	63
2.6 ESTRATEGIAS DE SEGURIDAD Y CULTURA PREVENTIVA	67
2.6.1 Condiciones mínimas de seguridad en laboratorios.....	68
2.6.2 Buenas prácticas de laboratorio (BPL).....	70
2.6.3 Cultura de seguridad y educación preventiva	75
2.6.4 Evidencia empírica sobre efectividad de programas de cultura de seguridad.....	76
2.7.1 Integración de hallazgos conceptuales	78
2.7.2 Brechas identificadas en el contexto académico costarricense	79
2.7.3 Implicaciones para la gestión de seguridad química en laboratorios educativos.	80
CAPÍTULO III- MARCO METODOLÓGICO	82
3.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	84
3.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	85
3.3. FUENTES DE INFORMACIÓN	85
3.3.1. Fuentes primarias	85
3.3.2. Fuentes secundarias.....	87
3.3.3. Revisión documental	88
3.4. Criterios de búsqueda.....	89

3.5	Criterios de inclusión y exclusión	92
3.6	Algoritmo de búsqueda y selección	93
3.7	Clasificación según niveles de evidencia	95
3.8	Análisis de la información	96
CAPÍTULO IV- ANÁLISIS DE RESULTADOS		98
4.1	CARACTERIZACIÓN DE RIESGOS DE INTOXICACIÓN EN LABORATORIOS ACADÉMICOS	99
4.1.1	Tipos de intoxicación más frecuentes según la literatura.....	100
4.1.2	Vías de exposición predominantes.....	102
4.1.3	Factores de riesgo identificados	104
4.1.4	Análisis comparativo: contexto internacional vs. Costa Rica	107
4.2	PROCEDIMIENTOS DE MANEJO Y ALMACENAMIENTO DE REACTIVOS QUÍMICOS	109
4.2.1	Sistemas de clasificación y organización (GHS)	110
4.2.2	Estrategias de control de inventarios y trazabilidad.....	111
4.2.3	Condiciones de almacenamiento seguro	113
4.2.4	Brechas identificadas en implementación institucional	114
4.2.5	El rol del profesional farmacéutico en la gestión de reactivos y sustancias químicas	115
4.3	GESTIÓN DE RESIDUOS QUÍMICOS PELIGROSOS EN ENTORNOS ACADÉMICOS	120
4.3.1	Métodos de segregación y almacenamiento temporal.....	121
4.3.2	Estrategias de neutralización y tratamiento previo	123
4.3.3	Disposición final conforme a normativas (Ley 8839).....	124
4.3.4	Prácticas de minimización y química verde.....	126
4.4	ESTRATEGIAS DE PREVENCIÓN Y CULTURA DE SEGURIDAD	129
4.4.1	Programas de capacitación efectivos.....	129
4.4.2	Infraestructura y equipamiento necesario	130
4.4.3	Protocolos de emergencia y respuesta.....	130
4.4.4	Factores que favorecen u obstaculizan la implementación	131
4.5	SÍNTESIS INTEGRADORA DE HALLAZGOS	132
4.5.1	Respuesta explícita a los objetivos específicos	133

4.5.2 Modelo conceptual de gestión integral.....	135
4.5.3 Implicaciones para el contexto costarricense	136
4.5.4 Implicaciones para la formación y práctica profesional farmacéutica.....	137
CAPÍTULO V- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	140
5.1 CONCLUSIONES GENERALES.....	141
5.2 CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	142
5.2.1 Sobre caracterización de riesgos de intoxicación química.....	142
5.2.2 Sobre gestión de reactivos químicos y residuos peligrosos	144
5.2.3 Sobre cultura de seguridad química y buenas prácticas	145
5.2.4 Sobre el rol del profesional farmacéutico en seguridad química	145
5.3 LIMITACIONES Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN	148
5.4 RECOMENDACIONES.....	149
5.4.1 Recomendaciones a nivel institucional	149
5.4.2 Recomendaciones a nivel profesional	150
5.4.4 Recomendaciones para investigación futura	151
CAPÍTULO VI- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	153
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	154
ANEXO A.....	172

V. Lista de tablas

Tabla 1. Jerarquía de controles según OSHA, aplicada a la gestión de riesgos químicos en entornos educativos.	34
Tabla 2. Comparación de tipos de riesgos químicos en laboratorios académicos.....	39
Tabla 3. Riesgos por clase de sustancia química en laboratorios académicos	41
Tabla 4. Pictogramas oficiales del GHS: clasificación de peligros y códigos de indicación (Frases H)	56
Tabla 5. Condiciones mínimas de seguridad en laboratorios según normativas nacionales e internacionales	69
Tabla 6. Principales consejos de prudencia (Frases P) del GHS aplicables a laboratorio académicos.....	72
Tabla 7. Criterios de búsqueda	89
Tabla 8. Criterios de inclusión y exclusión	92
Tabla 9. Cantidad de artículos según nivel de evidencia.....	95
Tabla 10. Análisis de la información.....	96
Tabla 11. Intoxicaciones agudas por tipo de sustancia química.....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12. Comparación de sistemas de gestión de reactivos: teoría versus práctica en Costa Rica.....	119
Tabla 13. Estrategias de minimización de residuos químicos en laboratorios académicos	127

VI. Lista de figuras

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de gestión de residuos químicos en laboratorios académicos.....	52
Figura 2. Proceso secuencial de Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) en laboratorios académicos.....	71
Figura 3. Algoritmo de flujo para una estrategia de búsqueda y selección	94

VII. Lista de gráficos

Gráfico 1. Distribución de incidentes en laboratorios químicos académicos.....	36
Gráfico 2. Frecuencia relativa de los mecanismos de intoxicación en laboratorios académicos costarricenses	47

VIII. Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
GHS	Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos
FDS	Ficha de Datos de Seguridad
EPP	Equipo de Protección Personal
COV	Compuestos Orgánicos Volátiles
ITCR	Instituto Tecnológico de Costa Rica
UNA	Universidad Nacional de Costa Rica
UCR	Universidad de Costa Rica
UIA	Universidad Internacional de las Américas
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
RTCR	Reglamento Técnico Centroamericano
SGA	Sistema Globalmente Armonizado (equivalente a GHS)
BPL	Buenas Prácticas de Laboratorio
INTECO	Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica
OMS	Organización Mundial de la Salud

CDC	Centers for Disease Control and Prevention
ISO	International Organization for Standardization
MSDS	Material Safety Data Sheet (antiguo nombre para FDS)

CAPÍTULO I- INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

La seguridad química en los laboratorios académicos constituye un componente fundamental en la formación profesional de los futuros profesionales del área de la salud y las ciencias, como es el caso del área de farmacia. Esta investigación adopta una perspectiva farmacéutica para analizar la gestión de seguridad química, reconociendo que los profesionales farmacéuticos poseen competencias específicas en toxicología, control de calidad y manejo de sustancias controladas que resultan particularmente valiosas para comprender y abordar los riesgos asociados al manejo de reactivos químicos en entornos educativos.

En estos espacios, destinados a la enseñanza y experimentación, lo cual implica un constante manejo de sustancias químicas peligrosas que, si no se gestionan adecuadamente, pueden llegar a generar riesgos de vital importancia para la salud de los estudiantes, el entorno laboral y el medio ambiente.

Sin embargo, la gestión de seguridad química hoy en día sigue enfrentando desafíos en muchos centros educativos, debido a la falta de protocolos estandarizados, capacitación insuficiente y una conciencia limitada sobre los riesgos asociados. Estudios recientes muestran una correlación entre el nivel de conocimiento sobre seguridad química y el cumplimiento de buenas prácticas. Si bien la gestión de reactivos es el aspecto más conocido, persisten carencias en el uso de equipos de protección personal, la documentación técnica y los sistemas de ventilación, lo que evidencia una cultura de seguridad aun en desarrollo dentro del ámbito académico¹.

Las intoxicaciones en laboratorios académicos representan un riesgo significativo para estudiantes y profesionales que utilizan sustancias químicas durante el proceso de aprendizaje. La exposición accidental a reactivos peligrosos, puede llegar a generar efectos adversos que van desde irritaciones leves hasta complicaciones graves para la salud. Factores como el desconocimiento de riesgos, falta de equipos de protección personal (EPP) y un manejo inadecuado de las sustancias químicas pueden llegar a contribuir la ocurrencia de estos incidentes².

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis bibliográfico sobre los riesgos de intoxicación asociados al manejo de reactivos químicos en laboratorios universitarios, así como examinar estrategias de prevención, protocolos de manejo y disposición final de residuos. Mediante esta revisión se busca identificar las principales fragilidades en la gestión de la seguridad química y proponer prácticas que puedan llegar a ser implementadas en el contexto educativo, con el fin de contribuir en el desarrollo de espacios de aprendizaje seguros, responsables y sostenibles.

1.2 Planteamiento del problema

En los laboratorios académicos se da el uso continuo de sustancias químicas peligrosas y puede llegar a ser una actividad inherente a la formación experimental. No obstante, esta práctica implica riesgos constantes para la seguridad de los o las estudiantes, docentes y personal técnico, así como para el entorno y la comunidad. A pesar de existir normativas y protocolos internacionales como el modelo MICE (Management, Information, Control and Emergency), su implementación en muchas instituciones universitarias no es suficiente, lo que provoca una gestión ineficaz de reactivos químicos y residuos, aumentando la probabilidad de intoxicaciones, accidentes laborales y daños al medio ambiente.

Se pueden encontrar diversos estudios internacionales donde se evidencia esta problemática. En Corea del Sur, entre 2015 y 2021 se registraron 1380 accidentes en laboratorios académicos de química, donde se incluyen incendios, derrames y explosiones; el accidente más común fue los derrames (69%) provocados principalmente por un manejo inadecuado de sustancias químicas (62,5%)³.

Además, se logró encontrar un análisis realizado en el año 2022 el cual reveló que, entre 2001 y 2018, 126 accidentes graves ocurrieron en universidades estadounidenses, con 30% de investigadores que reportaron lesiones las cuales

requirieron atención médica, y 25-38% que no informaron dichos incidentes a sus supervisores.

Los datos anteriores sugieren que una proporción significativa de incidentes no es reportada, lo que puede complicar la evaluación real de la situación y dificulta el diseño de estrategias preventiva eficientes. Adicionalmente, cerca del 40% de los participantes en estudios señalaron que no utilizan el equipo de protección personal (EPP) de manera constante. En un estudio en el Líbano, el 45% de los trabajadores de laboratorio informaron haber sufrido algún accidente durante el año del estudio, con un 73,7% de estos incidentes relacionados con exposición química, principalmente por inhalación⁴.

En el contexto local, en Costa Rica, ninguna de las investigaciones revisadas ha realizado un análisis estadístico amplio que permita dimensionar este problema, aunque tesis como la de Esquivel (2021) han señalado que el 22% de los 491 laboratorios del Tecnológico de Costa Rica presentaron niveles altos de riesgo, debido a la ausencia de armarios de seguridad, protocolos, SSO (Salud y Seguridad Ocupacional) y planes de emergencia⁵.

Esta situación agrava por una baja cultura de seguridad y falta de formación sistemática en los usuarios, lo cual coincide con las deficiencias registradas en estudios internacionales. Ya que, a pesar de la existencia de normativas y guías de seguridad, la implementación de medidas preventivas sigue siendo insuficiente en muchos centros educativos. La falta de capacitación adecuada, el almacenamiento incorrecto de reactivos y la ausencia de planes de emergencia contribuyen a la ocurrencia de intoxicaciones y accidentes.

Todo lo anterior resalta un problema central: la gestión actual de reactivos químicos en laboratorios académicos es incompleta y deficiente, lo que claramente incrementa el riesgo de intoxicaciones y accidentes. Por ello, la presente investigación busca responder a la siguiente pregunta: ¿Qué estrategias de control y disposición segura de reactivos y residuos químicos se recomiendan en la literatura científica para prevenir intoxicaciones en laboratorios académicos?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar, mediante una revisión bibliográfica comparativa, los riesgos de intoxicación asociados a la gestión inadecuada de reactivos y residuos químicos en laboratorios académicos, así como las estrategias identificadas en la literatura científica para garantizar condiciones de seguridad química.

1.3.1. Objetivos específicos

- Identificar los riesgos más frecuentes de intoxicación por sustancias químicas mal gestionadas en entornos de laboratorio educativo, según la literatura científica y técnica.
- Describir las recomendaciones internacionales en cuanto a procedimientos de clasificación, almacenamiento, manipulación y disposición de reactivos y residuos químicos en laboratorios académicos.
- Examinar buenas prácticas de seguridad química y su aplicabilidad para la elaboración de protocolos de prevención de intoxicaciones en contextos educativos.

1.4. Justificación

La presente investigación es de relevancia dado que la gestión de la seguridad química en laboratorios académicos representa un pilar esencial para el desarrollo de entornos de enseñanza seguros, sostenibles y responsables. En disciplinas como la farmacia específicamente en industria, donde la manipulación de sustancias potencialmente peligrosas es parte del día a día y se vuelve prioritario establecer procedimientos adecuados para el manejo, almacenamiento y disposición de reactivos y residuos químicos. No solo va a estar en juego la seguridad individual del estudiante o profesional, sino también la integridad del espacio de trabajo y la protección del entorno.

Este trabajo resulta importante en el contexto global, donde diversos análisis revelan que un porcentaje considerable del personal y estudiantes involucrados en laboratorios han estado expuestos a incidentes o intoxicaciones, muchas veces sin reportarlos. Según datos del Lab Safety Institute, entre un 25% y 38% de los investigadores no informan los accidentes ocurridos en laboratorio, mientras que solo el 40% utiliza el equipo de protección personal (EPP) de forma constante ⁶.

Diversos estudios refuerzan el panorama crítico de los accidentes químicos en laboratorios académicos. Un análisis en Corea reportó 196 eventos en laboratorios de química entre el 2015 y 2021, destacando derrames (spills) como el tipo más frecuente (69%), seguido de explosiones (19%) e incendios (12%), donde el manejo inadecuado de sustancias fue la causa en el 50% de los casos. Un informe canadiense evidenció que, pese al 90% de percepción de seguridad, el 27% de los encuestados no realizó evaluación de riesgos antes de iniciar trabajos y solo el 40% usa el EPP de forma constante ^{7,8}.

Es decir, los incidentes en laboratorios académicos son frecuentes, subreportados y en muchos casos con consecuencias clínicas o ausencia laboral. Además de que corroboran que los incidentes en laboratorios académicos casi siempre son vinculados al

manejo inadecuado de reactivos, se dan fallas estructurales en protocolos, cultura de seguridad y reporte de incidentes, lo que impide dimensionar el problema y actuar con base en información certera.

En el ámbito latinoamericano y de Costa Rica, la problemática se ve reflejada en estudios académicos en los cuales se documentan deficiencias en protocolos de seguridad y alta exposición al riesgo. Una tesis realizada en el Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) evaluó 49 laboratorios y encontró que el 22% presentaba niveles de riesgo alto (entre 600 y 4000 puntos), mientras que el 78% restante estaba entre niveles medios a bajos (150-500), con graves carencias en al menos diez factores críticos, como la carencia de armarios de seguridad, ausencia de planes de emergencia, falta de fichas de datos de seguridad (FDS) en español y ausencia de brigadas de respuesta⁵.

Asimismo, en la Universidad de Costa Rica se implementaron protocolos en laboratorios de ingeniería química, logrando mejoras mediante señalización, tipologías de almacenamiento y planes de emergencia, lo que evidencia oportunidades de implementación, pero también la necesidad de estandarización ⁹.

Por otro lado, en una investigación realizada en la Escuela de Química de la Universidad Nacional, se identificó que las actividades docentes generan residuos químicos de diversa índole, que sin una gestión adecuada pueden representar altos riesgos de salud y el ambiente. El proyecto incluyó cuantificación de residuos, protocolos de recolección, tratamiento y capacitación al personal; sin embargo, sólo se aplicó de forma y capacitación al personal; sin embargo, sólo se aplicó de forma piloto, evidenciando la necesidad de ampliar estas estrategias a nivel institucional ⁹.

En Costa Rica, aún no se cuenta con estudios integrales que puedan analizar de manera sistemática las estrategias de control y disposición segura de reactivos y residuos desde un enfoque preventivo y académico. A pesar de que se han realizado esfuerzos

aislados, existe una brecha significativa entre las políticas existentes y su aplicación en la práctica diaria. La normativa del ITCR sobre el manejo de residuos peligrosos (2022) establece roles claros para la seguridad y salud laboral, el registro de residuos y el tratamiento adecuado. Sin embargo, se desconocen evaluaciones sistemáticas que demuestren la correcta implementación en el contexto universitario nacional ¹⁰.

La falta de datos locales sobre intoxicaciones, derrames o exposición química en laboratorios académicos dificulta dimensionar su afectación real, identificar las causas predominantes y priorizar intervenciones. En cambio, la literatura internacional (EE.UU., Japón, Corea, Líbano) señala que los accidentes en enseñanza o investigación académica son recurrentes, con perspectivas que van desde errores de procedimientos a explosiones por el manejo inadecuado de reactivos.

En este marco tan problemático se justifica la implementación de un análisis bibliográfico basado en evidencia científica internacional, con el fin de poder identificar las mejores prácticas, protocolos y estrategias que han demostrado eficiencia en entornos similares. Todo esto, con el propósito de intentar adaptarlos al contexto costarricense y académico, para así consolidar un modelo de gestión que permita: proteger la salud y seguridad de estudiantes, docentes y personal técnico, fortalecer la cultura de seguridad química dentro de las instalaciones de universidades, asegurar un ambiente laboral y educativo más seguro y sostenible y reducir la generación de residuos peligrosos mediante prácticas de química verde y gestión integral.

La gestión adecuada de los reactivos químicos se convierte en un eje fundamental, ya que estos compuestos son utilizados diariamente en laboratorios académicos y pueden presentar propiedades corrosivas, inflamables, reactivas o tóxicas. Su almacenamiento, etiquetado, rotación y disposición precisan un conocimiento riguroso y protocolos específicos para poder evitar reacciones peligrosas, derrames o contaminación ambiental. La falta de control en inventarios, almacenamiento incorrecto por familias químicas o

vencimiento de productos puede derivar en accidentes evitables, a pesar de esta situación en muchos laboratorios aún se manejan reactivos sin separación por compatibilidad química ni evaluación periódica de su estado, exponiendo de esta manera a la población estudiantil a riesgos innecesarios ¹¹.

Desde una perspectiva ambiental y salud pública, la disposición final de los residuos generados por las prácticas experimentales también presenta un desafío. Un estudio realizado en la Universidad Nacional (UNA) de Costa Rica evidenció que muchas prácticas académicas generan residuos peligrosos que en ocasiones no son gestionados con criterios de sostenibilidad, lo que implica riesgos para la salud humana y el entorno. La falta de infraestructura, conocimiento técnico y presupuesto adecuado va a limitar la aplicación de principios de química verde, reducción de desechos y reutilización segura de reactivos ¹¹.

En términos disciplinarios, esta investigación contribuye a fortalecer la cultura de la prevención y el cumplimiento normativo en laboratorios académicos específicamente en instituciones de educación superior. Para el área de farmacia, donde la seguridad en la manipulación de sustancias químicas es clave tanto en contextos académicos como profesionales, esta revisión bibliográfica ofrece un marco técnico y teórico útil para poder incorporar mejores prácticas de gestión química en los programas curriculares. El desarrollo de una cultura de seguridad desde la etapa de formación profesional puede llegar a contribuir a reducir la tasa de accidentes laborales en el futuro, así como fomentar la ética ambiental y sanitaria en los futuros profesionales de la salud.

Desde el punto de vista social, las poblaciones que se van a ver beneficiadas directamente de esta investigación incluyen a estudiantes, docentes y técnicos de laboratorio de las carreras de ciencias de la salud. También podrían verse favorecidas las instituciones educativas en general, al contar con herramientas y estrategias actuales que les permitan mejorar su gestión de riesgos, cumplir con normativas nacionales e

internacionales, y fomentar espacios seguros para el aprendizaje. A nivel indirecto, el fortalecimiento de la seguridad química en laboratorios académicos podría tener un impacto positivo en comunidades cercanas, al minimizar los riesgos de contaminación ambiental o accidentes por disposición inadecuada de residuos.

Esta investigación se desarrolla desde la formación profesional en Farmacia, lo cual aporta un enfoque distintivo al análisis de la seguridad química en laboratorios académicos. El profesional farmacéutico, por su formación en farmacología, toxicología, control de calidad y gestión de medicamentos controlados, posee competencias directamente aplicables a la identificación de riesgos de intoxicación, la interpretación de fichas de datos de seguridad, el diseño de sistemas de trazabilidad de reactivos y la evaluación de interacciones químicas peligrosas.

En el contexto costarricense, donde los recursos humanos especializados en seguridad química son limitados, el aprovechamiento de estas competencias farmacéuticas podría representar una oportunidad estratégica para fortalecer los equipos de gestión de laboratorios académicos. Esta perspectiva multidisciplinaria (integrando conocimientos de farmacia, química y gestión ambiental) es esencial para abordar de manera integral los desafíos identificados en la literatura sobre manejo seguro de sustancias químicas en entornos educativos.

Por lo tanto, esta investigación no solo documenta riesgos y estrategias de prevención, sino que además explora el rol potencial del profesional farmacéutico como agente de cambio en la cultura de seguridad química universitaria, aportando valor desde su formación específica en ciencias de la salud aplicadas a la gestión de sustancias químicamente activas.

Finalmente, la presente investigación es importante ya que permite integrar evidencia científica actualizada sobre estrategias efectivas de manejo seguro de reactivos y residuos químicos, contextualizándolas a la realidad costarricense. Su desarrollo facilita la adopción de buenas prácticas institucionales, reduce riesgos para la salud y el ambiente, y refuerza la cultura de seguridad en la formación universitaria. De esta manera, se

contribuye a cerrar la brecha existente entre normativas y aplicación práctica, y se promueve una educación científica más segura, ética y sostenible.

1.5 Antecedentes

En este apartado se van a describir los diferentes antecedentes del presente estudio desde lo general hasta lo específico, partiendo de los históricos, internacionales y nacionales.

1.5.1 Antecedentes históricos

El Consejo Nacional de Investigación (1995), en un estudio realizado en Estados Unidos, se propuso establecer principios y directrices para la manipulación segura de productos químicos, el control de riesgos en entornos de laboratorio académico y la disposición responsable de residuos peligrosos.

Se trató de una revisión documental exhaustiva elaborada por un comité multidisciplinario de expertos en química, seguridad industrial y salud ambiental. Se realizó un análisis de normativa vigente, estudios de caso y buenas prácticas, el documento estructuró un modelo de gestión basado en la jerarquización de riesgos, la capacitación continua y el desarrollo de planes de respuesta ante emergencias. Las conclusiones señalaron que una cultura de seguridad efectiva requiere del compromiso institucional, procedimientos estandarizados y una adecuada infraestructura de control (como ventilación, almacenamiento y señalización). Además, se identificó como crítica la disposición diferenciada de residuos según su peligrosidad¹².

Este antecedente resulta fundamental para el desarrollo de la investigación actual, ya que ofrece evidencia empírica sobre las brechas existentes entre la normativa y la práctica en contextos universitarios nacionales. Además, destaca la necesidad de fortalecer las estrategias educativas y de gestión interna de los laboratorios, con un enfoque preventivo y sostenible. También permite identificar vacíos críticos en el manejo de residuos químicos, aspecto clave que esta tesis busca abordar mediante el diseño de propuestas adaptadas a los recursos y condiciones locales.

Carvajal (2018), en un estudio publicado en Colombia por el portal Innovación Ambiental, se propuso documentar los principales desastres en la industria química a

nivel global, con el objetivo de visibilizar los riesgos asociados al manejo inadecuado de sustancias peligrosas y destacar la importancia de implementar sistemas efectivos de gestión de seguridad química.

El trabajo se desarrolló a partir de una recopilación documental de los nueve eventos más significativos relacionados con accidentes industriales, como Bhopal (India), Texas City (EE.UU.) y Seveso (Italia), donde fallas humanas, técnicas o regulatorias desencadenaron explosiones, fugas tóxicas y miles de muertes. El enfoque fue cualitativo-descriptivo y consistió en la revisión de fuentes oficiales, reportes técnicos e investigaciones previas. Entre las principales conclusiones, se señala que muchos de estos desastres pudieron haberse evitado con protocolos más estrictos, monitoreo continuo, capacitación adecuada del personal y una cultura de seguridad consolidada. Asimismo, se destaca la falta de preparación y respuesta en muchos de estos casos, especialmente en países en desarrollo¹³.

Este antecedente es relevante para la presente investigación, ya que proporciona un marco histórico sobre los efectos del mal manejo de reactivos químicos, lo cual fundamenta la necesidad de reforzar la seguridad en laboratorios académicos. Aunque los contextos industriales y educativos difieren en escala, comparten el mismo principio de riesgo ante la exposición y gestión de sustancias peligrosas. Este estudio aporta evidencia sobre la importancia de contar con normas claras, procedimientos de respuesta ante emergencias y programas de formación continua, elementos clave que guían el análisis de la gestión de seguridad química en entornos académicos. Además, evidencia la urgencia de prevenir situaciones de intoxicación o mala disposición de residuos, factores centrales en esta investigación.

La Sociedad Americana de Química (ACS), bajo la coordinación de Young (2003) en Estados Unidos, elaboró una guía titulada Seguridad en los Laboratorios Químicos Académicos, con el objetivo de proporcionar lineamientos completos para promover la seguridad en laboratorios educativos mediante la implementación de una

cultura preventiva, el cumplimiento normativo y la gestión responsable de productos químicos.

Este documento, de carácter técnico y educativo, se basa en la revisión de prácticas seguras, normativas federales y experiencias acumuladas por expertos en seguridad química. Fue diseñado con la idea de que sea como una herramienta para docentes, investigadores y administradores de instituciones educativas. Entre los principales hallazgos, se resalta la importancia de establecer una cultura de seguridad sólida desde los niveles introductorios, la necesidad de capacitación constante, la correcta identificación de riesgos químicos y el establecimiento de protocolos claros para el manejo y disposición de sustancias peligrosas. También se promueve el desarrollo de políticas institucionales que integren la seguridad como parte fundamental del aprendizaje ².

Este antecedente es fundamental para la investigación presente, ya que proporciona un marco normativo y conceptual ampliamente reconocido a nivel internacional. El enfoque preventivo y educativo propuesto por la ACS sirve como base teórica para evaluar el estado actual de la gestión de seguridad química en laboratorios académicos, especialmente en lo que respecta al manejo de reactivos, prevención de intoxicaciones y disposición de residuos. A pesar de su amplio alcance, la guía no contempla estudios de caso específicos en contextos latinoamericanos, lo cual representa una oportunidad para contextualizar y adaptar estas prácticas a realidades institucionales locales.

1.5.2 Antecedentes internacionales

Reina y Reina (2021), en un estudio realizado en México a través de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), presentaron el artículo Seguridad en el laboratorio: una aproximación práctica, con el objetivo de diseñar e implementar una práctica experimental que promueva el uso de normas y reglamentos de seguridad entre estudiantes de niveles iniciales de química.

Se utilizó un enfoque aplicado y descriptivo mediante la elaboración de una actividad experimental dirigida a estudiantes de semestres iniciales de licenciatura en química, compuesta por ejercicios relacionados con lectura de fichas de seguridad, manejo de ácidos y bases, elección de equipo de protección personal adecuado, y disposición de residuos. La evaluación incluyó pospruebas y cuestionarios por los docentes con guía completada. Los resultados evidenciaron un aumento notable en la comprensión de la seguridad normativa, reducción de prácticas de riesgo y mejor respuesta ante incidentes en el laboratorio. Además, se observó que el ejercicio práctico fortalecía la cultura de seguridad al transformar el conocimiento teórico en prácticas concretas ¹⁴.

Este antecedente es de gran valor para la tesis, pues ejemplifica una estrategia pedagógica para integrar regulaciones y normas de laboratorio en la formación de estudiantes universitarios, un aspecto calve en la gestión de seguridad química. Su diseño practico puede adaptarse fácilmente al contexto costarricense, ofreciendo una base para desarrollar herramientas similares en cursos de grado. La limitación principal es su enfoque en cursos introductorios de química general, lo que sugiere la necesidad de ampliarlo a laboratorios más avanzados o con distintos tipos de reactivos, además de incluir la gestión de residuos como componente explicitico.

Pérez Gámez et al. (2016), en un estudio realizado en la Universidad de Sonora, México, se propusieron caracterizar la percepción del riesgo de laboratorio entre estudiantes de ciencias químico-biológicas, utilizando una metodología basada en el modelo EDRP-T y el método Delphi.

El estudio aplicó encuestas estructuradas en a estudiantes de Químico Biólogo Clínico, Nutrición y Químico en Alimentos, evaluando tres factores de riesgo: trabajo en laboratorio (TL), salpicaduras en piel y ojos (SPO) e inhalación de sustancias químicas (ISQ). Los resultados ubicaron la percepción de riesgo en un nivel de moderado a alto, con especial preocupación por SPO e ISQ. Se concluyó que, aunque los estudiantes tienen conocimiento teórico de los riesgos, se observa vulnerabilidad

y temor hacia estos eventos, sugiriendo fortalecer instrumentos de evaluación y capacitación específica ¹⁵.

Este antecedente es relevante para la tesis, pues se aborda directamente la percepción de riesgo, lo que es un componente clave de la cultura de seguridad química y más aún en contextos universitarios latinoamericanos. Aporta un modelo metodológico sólido (EDRP-T y Delphi) que puede replicarse y compararse en Costa Rica. Si bien se centra en la percepción, el estudio puede complementarse ampliando el análisis hacia la aplicación de medidas de control, manejo de reactivos y disposición de residuos, así como la relación con la educación y capacitación institucional.

Cely y Céspedes (2018), en un estudio desarrollado en Colombia en la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), se propuso evaluar los riesgos ocupacionales tanto físicos y químicos en laboratorios de docencia e investigación en química.

Se aplicó una metodología mixta de corte transversal en una muestra de 76 trabajadores (docentes, laboratoristas y estudiantes). Se evaluaron cinco tipos de laboratorio (docencia, especializado, investigación, análisis químico y planta piloto) y se registraron condiciones de exposición a sustancias químicas, radiación UV, campos magnéticos y estrés térmico. Los resultados mostraron exposición continua a riesgos físicos y químicos, con carencias en control ambiental y equipos de protección. Se propuso implementar un programa de vigilancia de salud ocupacional como medida preventiva ¹⁶.

Este estudio aporta un diagnóstico valioso sobre la realidad de los laboratorios en contextos latinoamericanos, incluyendo Costa Rica, al evidenciar riesgos cruzados físicos y químicos en entornos mixtos docencia-investigación. Su enfoque destaca la necesidad de protocolos más robustos y acompañamiento en salud ocupacional. Sin embargo, se limita a una sola institución, lo cual brinda espacio para expandir la

investigación a otras universidades costarricenses y complementar el análisis con estrategias de manejo de reactivos y disposición de residuos.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2019), con sede en Nairobi, elaboró el informe Global Chemicals Outlook II con el propósito de evaluar los avances y desafíos globales relacionados con la gestión de productos químicos y desechos, en el contexto de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Su objetivo fue brindar información científica, técnica y política para orientar tanto decisiones y acciones que reduzcan los impactos negativos de los productos químicos a lo largo de su ciclo de vida ¹⁷.

Este antecedente resulta clave para la presente investigación, ya que proporciona un marco internacional actualizado sobre los riesgos globales del uso de sustancias químicas, la necesidad urgente de fortalecer las políticas de seguridad y el rol de la educación en química como espacio de intervención. En el contexto de los laboratorios académicos, el informe resalta la importancia de implementar sistemas de gestión del riesgo, entrenamiento, monitoreo y eliminación segura de residuos, aspectos centrales para la tesis. La limitación radica en su carácter general, por lo que su aplicación a entornos específicos, como laboratorios universitarios en América Latina.

Ménard et al. (2022), en un estudio de Canadá publicado en ACS Chemical Health & Safety, se propusieron identificar la frecuencia de incidentes y las prácticas de reporte en laboratorios de química y bioquímica universitarios, con el objetivo de mejorar la cultura de seguridad y la transparencia ante accidentes.

La investigación utilizó un diseño cuantitativo mediante encuestas a profesionales y estudiantes de laboratorios en la University of Windsor. El análisis reveló que, si bien una mayoría había experimentado pequeños accidentes (p. ej., derrames, cortes), el reporte formal era debido al miedo a repercusiones y la falta de claridad en los procedimientos. Se concluyó que existe una brecha significativa entre

la ocurrencia real de eventos y su notificación, lo cual limita las oportunidades de aprendizaje institucional y de mitigación de riesgos ¹⁸.

Este antecedente es clave pues identifica un problema estructural: la subnotificación de incidentes químicos y sus causas (cultura de culpa, carencia de procedimientos claros). Para la tesis realizada en Costa Rica, esto aporta un marco comparativo para evaluar si existe un fenómeno similar y cómo podría contribuir a mejorar la seguridad en laboratorios académicos mediante sistemas de reporte anónimos y protocolos claros.

Corso et al. (2022), en un estudio conducido en un campus federal del interior de Paraná, Brasil, se propusieron analizar la gestión de salud y seguridad ocupacional (OSH) en laboratorios químicos universitarios, con énfasis en la percepción de riesgo y cumplimiento de normas.

El estudio fue descriptivo de caso, con observación de campo y entrevistas a estudiantes, docentes y personal de laboratorio. Se identificó una falsa percepción de baja peligrosidad en estos espacios, una infraestructura debilitada y brechas en protocolos de seguridad. Se propusieron soluciones como la creación de comités de seguridad y formación obligatoria del personal ¹⁹.

Este antecedente aporta evidencia real de un contexto sudamericano con limitaciones estructurales y culturales. Permite contrastar si esas barreras también están presentes en Costa Rica y cómo podrían superarse mediante estrategias organizativas e institucionales adaptadas al entorno universitario.

Gallo et al. (2020), en Italia, presentaron un estudio sobre conocimientos, percepción y prácticas de seguridad química entre trabajadores de laboratorios de investigación, con el propósito de mejorar la capacitación y estandarización de medidas preventivas.

Este estudio cuantitativo encuestó a 237 trabajadores de dos universidades del sur de Italia. Reveló que solo el 46% demostró “buen conocimiento” de riesgos

químicos, que el uso de EPP variaba (99 % para guantes, pero solo 60 % para gafas) y que más del 50 % había experimentado exposición continua a sustancias peligrosas. Los hallazgos resaltan la necesidad de formación específica, refuerzo en la interpretación de fichas de seguridad y uso adecuado de EPP ²⁰.

Este estudio es útil para comparar si en Costa Rica existe un déficit similar en conocimiento práctico de seguridad y uso de protección. Su enfoque en formación y cumplimiento puede fundamentar propuestas de capacitación estandarizada.

El caso de Sheri Sangji (2008) en la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), documentado por diversas fuentes como Chemical & Engineering News y ABC News, se convirtió en un hito legal y cultural en la seguridad de laboratorios académicos en Estados Unidos, al evidenciar las consecuencias de la falta de prácticas seguras en la manipulación de sustancias químicas peligrosas.

Se recopilaron datos de informes oficiales de Cal/OSHA, testimonios de testigos y líderes institucionales, junto con reportes periodísticos y académicos. El análisis reveló que Sangji usaba un reactivo pirofórico sin equipo personal adecuado (no se utiliza delantal protector), lo que provocó un incendio que le causó quemaduras fatales. Se confirmaron múltiples fallas de gestión, incluida la falta de protocolos, capacitación deficiente y supervisión inadecuado ²¹.

Este antecedente es importante para la investigación, pues se ilustra de forma clara cómo la ausencia de protocolos y cultura de seguridad conlleva consecuencias graves. Sirve como caso modelo para proponer un sistema de gestión de la seguridad química en laboratorios universitarios de Costa Rica, enfatizando en capacitación, supervisión y protocolos claros. Aunque su contexto es estadounidense y el marco legal es diferente, el caso revela problemas universales aplicables a entornos latinoamericanos.

Ménard AD, Flynn E, Soucie K y Trant JF (Canadá, 2021) llevaron a cabo un estudio titulado Accident Experiences and Reporting Practices in Canadian

Chemistry and Biochemistry Laboratories, con el objetivo de analizar la frecuencia de incidentes en laboratorios universitarios y las prácticas de reporte implementadas por estudiantes y personal de investigación.

La metodología fue cuantitativa, basada en una encuesta online aplicada a 104 participantes, incluyendo estudiantes de posgrado y personal de laboratorio. Los resultados mostraron que el 56,7 % había experimentado al menos un accidente; de estos, el 65,9 % reportó múltiples incidentes. Aunque el uso de EPP era común, la adherencia completa a todos los elementos (gafas, guantes, bata) fue inferior al 50 %. Además, se detectó una subnotificación del 25–40 %, motivada por la percepción de que el incidente no era serio, temores a repercusiones o desconocimiento de los canales de reporte ⁸.

Este antecedente aporta una visión crítica sobre las brechas en el reporte de incidentes, una dimensión clave para una gestión de seguridad efectiva en los laboratorios académicos. El aporte a la tesis va a permitir explorar si ocurren dinámicas similares como la subnotificación o falta de canales accesibles y en función de ello, proponer herramientas estructuradas para facilitar reportes y mejorar la cultura institucional.

Wiriyakraikul C, Sorachoti K, Suppradid J y col. (Tailandia, 2022) presentaron el estudio *Characteristics of Laboratory Safety Problems in Academic Laboratory Facilities in a Thai University*, en la revista *ACS Chemical Health & Safety*, con el propósito de identificar problemas comunes de seguridad en laboratorios universitarios y analizar las estrategias de mitigación existentes.

La investigación fue empírica, basada en evaluaciones de seguridad en 17 edificios académicos con laboratorios, utilizando checklists ESPReL (Priorización Ambiental y de Seguridad para Laboratorios de Investigación), observaciones directas, entrevistas y verificación por especialistas. Se resaltaron deficiencias en la gestión de productos químicos, sistemas de disposición de residuos, infraestructura física y equipamiento. Además, se encontró una brecha significativa entre lo

identificado por especialistas y la percepción de los usuarios. Como resultado, se recomendó mejorar estructuras, sistemas de control y formación para cerrar esta brecha ²².

Este antecedente aporta valor al contextualizar los desafíos reales en infraestructura y percepción de seguridad dentro de un país de Asia en desarrollo, con recursos limitados comparables a Costa Rica. La experiencia enseña que, además de protocolos, es clave alinear la infraestructura, formación y hábitos. Esto puede orientar la investigación hacia estrategias integrales que incluyan auditorías de espacio, capacitación continua y puesta en práctica de buenas prácticas en laboratorios costarricenses.

La Coordinación Nacional de Bioseguridad (CTNBio, Brasil, 2018) emitió directrices inspiradas en las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) para asegurar la gestión de riesgos biológicos y químicos en laboratorios universitarios, con el objetivo de fortalecer la seguridad en entornos académicos.

La normativa se basó en una revisión comparativa de protocolos de la OCDE y estándares internacionales, aplicada mediante talleres y auditorías piloto en cinco universidades federales del país. Se identificaron brechas en el etiquetado de reactivos, almacenamiento seguro e infraestructura para disposición de residuos. Tras su implementación, se observó una mejora en la trazabilidad de sustancias químicas, capacitación regular y reducción de incidentes menores ²³.

Este antecedente aporta un modelo normativo latinoamericano que demuestra la posibilidad de adaptar estándares globales a realidades institucionales. En Costa Rica, puede funcionar como referencia para proponer normas nacionales y procedimientos oficiales, destacando la importancia del seguimiento normativo y auditorías periódicas.

Liu et al. (2023), en la China University of Petroleum, diseñaron el método Inherent Hazards Assessment and Classification (IHAC) para evaluar y clasificar

riesgos químicos en laboratorios universitarios chinos, con el objetivo de mejorar el control y prevención de accidentes químicos.

Se aplicó un modelo cuantitativo que evaluó materiales, equipos y procesos en varios laboratorios, clasificándolos en cuatro niveles de riesgo. Durante el estudio se identificaron deficiencias en la identificación de peligros, baja conciencia de riesgo y manejo inapropiado de residuos. La implementación del sistema permitió priorizar intervenciones de seguridad y reducir riesgos inherentes ²⁴.

Este antecedente es importante, ya que introduce una herramienta cuantitativa adaptada a laboratorios universitarios, útil para diagnosticar y clasificar riesgos en el contexto costarricense. Además, su énfasis en la trazabilidad, evaluación de procesos y estrategias específicas para residuos encaja perfectamente con tu estudio.

El National Industrial Chemicals Notification and Assessment Scheme (NICNAS, Australia, 2020) es el organismo encargado de regular la introducción, uso y evaluación de riesgos de las sustancias químicas industriales en Australia, con el propósito de proteger la salud humana y el medio ambiente.

NICNAS exige el registro obligatorio de nuevos químicos, evaluaciones de riesgos e inspecciones de cumplimiento. Mantiene el Australian Inventory of Chemical Substances (AICS), y sus autoridades pueden realizar auditorías, imponer sanciones y revocar permisos. Este esquema ha demostrado mejorar la trazabilidad y control de sustancias químicas, reduciendo incidentes relacionados con contaminación ambiental y exposición en escuelas y laboratorios ²⁵.

Este antecedente aporta un ejemplo robusto de regulación nacional efectiva que integra registro, evaluación, inspección y control normativo. En Costa Rica, proporciona un modelo de marco legal que podría adaptarse a nivel académico, proponiendo mecanismos para mejorar la regulación institucional y la gestión integral de sustancias químicas.

Nolasco et al. (2006), de diversas universidades federales brasileñas, llevaron a cabo un estudio titulado *Chemical waste risk reduction and environmental impact generated by laboratory activities in research and teaching institutions*, con el objetivo de analizar cómo las instituciones académicas implementan programas de gestión de residuos químicos y reactivos, y evaluar su impacto ambiental.

El estudio fue cualitativo-descriptivo, basado en análisis documentales y entrevistas en universidades como USP, UNICAMP, UFRJ, UFPR y UFRGS. Se identificaron programas adheridos a la Agenda 21 donde se priorizó la minimización de residuos, el etiquetado adecuado de reactivos y la formación de comités ambiental-laboratorio. Los autores concluyeron que, aunque estas prácticas han reducido riesgos y mejorado la sostenibilidad, persisten desafíos en la aplicación homogénea y la capacitación continua ²⁶.

Este antecedente es valioso al demostrar cómo instituciones latinoamericanas estructuran sistemas de gestión y disposición de reactivos químicos con un enfoque integral de sostenibilidad y seguridad. Su experiencia puede guiar el diseño de protocolos en Costa Rica, particularmente en términos de etiquetado, reducción de residuos y establecimiento de comités responsables. No obstante, la diversidad institucional señala la necesidad de adaptar tales programas al contexto específico de cada universidad.

Pedreira Filho et al. (2023), en Brasil, desarrollaron un estudio para evaluar los conocimientos sobre seguridad química entre investigadores académicos durante la pandemia COVID-19, enfocándose en áreas como manejo de reactivos y riesgos asociados.

Se aplicó una encuesta online a 98 investigadores de diversos centros de investigación académica. El 95 % reportó exposición múltiple a riesgos químicos, pero dos tercios desconocían el mapa de riesgos del laboratorio y la mitad tenía deficiencias en cultura de seguridad. Aunque se utilizaba EPP, el 75 % consideraba

prioritaria una capacitación en seguridad química al ingreso. El 39 % demandó mejora en la formación ²⁷.

Este estudio evidencia que, incluso en contexto de crisis, los reactivos usados comúnmente conservan riesgos y pueden emplearse sin preparación adecuada. En tu tesis, este antecedente sirve como base para examinar la formación formal en el uso y manejo de reactivos en Costa Rica, especialmente bajo condiciones de cambio o emergencia, reforzando la necesidad de planes de inducción y protocolos actualizados.

La University of Tasmania (Australia, 2025) expuso sus políticas de Chemical Management, con el propósito de establecer un enfoque integral para el uso seguro de reactivos químicos en cursos y laboratorios, cubriendo aspectos desde la compra hasta la disposición.

Las directrices incluyen capacitaciones obligatorias, evaluación de riesgos antes de compras, inventario anual, uso del sistema Chemwatch, y segregación de sustancias. También se promueve el mínimo necesario de compra para reducir exceso de reactivos y se integran normativas nacionales como AS 2243.1, AS 2243.2 y AS 1940. Estas medidas han demostrado mejoras en prácticas de laboratorio, reducción de residuos innecesarios y menor ocurrencia de incidentes ²⁸.

Este antecedente es relevante ya que ofrece un marco normativo y operativo completo para la gestión de reactivos químicos en entornos académicos. Su enfoque modular y basado en sistemas digitales (inventario, evaluación de riesgos y capacitación continua) brinda un referente práctico para proponer una política institucional en universidades costarricenses que aborde la trazabilidad, reducción de reactivos y cultura preventiva.

Zhang et al. (2022), en un estudio realizado en China, se propusieron analizar el estado actual de la seguridad en laboratorios universitarios con énfasis en el manejo de productos químicos, identificando los principales desafíos y oportunidades de

mejora en el contexto académico. El objetivo fue comprender la frecuencia de incidentes relacionados con sustancias peligrosas y evaluar la efectividad de las políticas de control en centros de educación superior.

La investigación empleó un enfoque cualitativo-descriptivo, utilizando análisis documental de informes de accidentes, entrevistas a docentes y personal técnico, y revisión de las normas vigentes en universidades chinas. Los descubrimientos señalaron deficiencias en la formación en seguridad química, ausencia de protocolos estandarizados para el almacenamiento de reactivos y falta de una cultura de prevención. Se concluyó que muchos laboratorios operan sin controles adecuados de riesgo químico, lo que incrementa significativamente la probabilidad de eventos peligrosos ⁸.

Este antecedente resulta relevante para la investigación, ya que permite contrastar el contexto latinoamericano con una potencia científica como China, donde, a pesar de los avances tecnológicos, persisten brechas graves en la gestión de sustancias peligrosas. Asimismo, destaca la necesidad de una regulación institucional clara y sistemas de formación continua, elementos que serán fundamentales para proponer mejoras adaptables a realidades como la costarricense.

La Universidad de Huelva (2020), en España, elaboró un manual titulado Manual de prevención de riesgos y salud laboral en los laboratorios universitarios, cuyo objetivo principal fue establecer directrices claras sobre seguridad laboral y manejo adecuado de sustancias químicas en laboratorios académicos, especialmente en contextos universitarios. El documento pretende ser una guía para minimizar riesgos laborales y ambientales derivados del uso de productos químicos.

Para su desarrollo, se recopilaron normativas nacionales e internacionales, como el Reglamento de los Servicios de Prevención y la Ley de Prevención de Riesgos Laborales de España, así como experiencias institucionales previas en la gestión de seguridad. El manual ofrece un enfoque práctico y sistemático sobre la identificación de peligros, el uso obligatorio de equipos de protección personal (EPP),

la correcta clasificación y almacenamiento de reactivos químicos, así como los procedimientos ante emergencias. Una de sus principales conclusiones destaca la necesidad de una cultura preventiva continua, respaldada por formación, supervisión y actualización normativa dentro de los entornos académicos ²⁹.

Este antecedente es relevante para la presente investigación, ya que proporciona un marco normativo y práctico aplicable a laboratorios universitarios latinoamericanos, incluido el contexto costarricense. Además, pone en evidencia la importancia de protocolos institucionalizados para la gestión segura de reactivos químicos, así como la responsabilidad compartida entre el personal docente, técnico y estudiantil. La existencia de guías como esta subraya la necesidad de adaptar normativas internacionales al contexto local, un punto que la investigación actual busca profundizar en términos de aplicación real y sostenibilidad.

Carrillo (2022), en un estudio realizado en la Universidad del Valle de Guatemala, se propuso evaluar el cumplimiento de las normas de seguridad y las buenas prácticas en el almacenamiento de reactivos químicos en laboratorios de docencia, con el objetivo de proponer estrategias que reduzcan los riesgos asociados al manejo inadecuado de sustancias peligrosas.

Se utilizó un enfoque mixto con observación directa, entrevistas al personal técnico y revisión documental de fichas de datos de seguridad (FDS) e inventarios químicos. Se analizaron los sistemas de segregación de sustancias incompatibles, etiquetado, ventilación y condiciones de almacenamiento. Los resultados revelaron deficiencias en la infraestructura, una escasa aplicación de protocolos actualizados y ausencia de formación sistemática para el personal. Se concluyó que la implementación de un sistema de gestión basado en normativas internacionales como el GHS y la capacitación continua son medidas urgentes ³⁰.

Este antecedente es importante para la presente investigación, ya que refleja una realidad compartida por múltiples laboratorios académicos de Centroamérica: la falta de cumplimiento normativo en el manejo de reactivos químicos. Sus hallazgos

pueden contribuir directamente al marco teórico, ya que ilustran los vacíos en formación, protocolos e infraestructura, los cuales deben abordarse mediante políticas institucionales, manuales técnicos y sistemas de control más rigurosos.

1.5.3 Antecedentes nacionales

Esquivel Garita (2021), en su tesis presentada ante la Universidad Nacional, se propuso evaluar el nivel de riesgo químico en los 49 laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR), con el objetivo de identificar brechas en las medidas preventivas y proponer mejoras específicas para reducir accidentes químicos.

Mediante una metodología semicuantitativa entre enero y mayo de 2017, se diseñó y aplicó un Instrumento Final de Evaluación basado en la Nota Técnica de Prevención 330 de España. Se identificaron carencias como falta de armarios de seguridad, ausencia de fichas de datos de seguridad en español, protocolos de respuesta a emergencias y falta de brigadas. Se encontraron niveles de riesgo moderado a alto en 22 % de los laboratorios evaluados ⁵.

Este antecedente es clave porque evidencia, con datos locales, la necesidad urgente de mejorar la infraestructura, capacitación, protocolos y acceso a información técnica. Es una base sólida, al mostrar qué áreas requieren intervención prioritaria en instituciones académicas costarricenses.

Solano-Solano (2012), en un estudio realizado en Costa Rica, desarrolló una propuesta para diseñar un sistema de gestión de inventario con el fin de optimizar el manejo de sustancias y residuos químicos en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica. El objetivo principal fue establecer mecanismos que permitieran un control más eficiente y seguro de los reactivos utilizados, con énfasis en la prevención de riesgos químicos y la adecuada disposición de residuos.

La investigación utilizó una metodología de tipo aplicada con un enfoque cuantitativo y descriptivo. Se realizó un diagnóstico del estado actual de los inventarios y de los procedimientos de gestión en los laboratorios, mediante entrevistas, observaciones directas y análisis de documentos institucionales. Como resultado, se identificaron debilidades importantes en el registro, almacenamiento y disposición de sustancias químicas. La propuesta de sistema contempló la digitalización del inventario, la categorización de riesgos y el diseño de protocolos de seguridad para el manejo de residuos peligrosos. Se concluyó que la implementación de un sistema de gestión contribuiría significativamente a la seguridad del personal y a la sostenibilidad institucional ³¹.

Este antecedente resulta clave para la investigación, se evidencia la necesidad de mejorar la trazabilidad y el control de reactivos químicos en ambientes académicos, especialmente en instituciones de educación superior en Costa Rica. Además, proporciona una base práctica sobre la importancia de sistemas integrados para la seguridad química, identificando vacíos en la gestión que aún persisten en muchos laboratorios. Su enfoque en la prevención y manejo adecuado de sustancias sirve de soporte para establecer estrategias preventivas más amplias en el contexto nacional.

León Mora (2021), en un estudio realizado en Costa Rica, se propuso evaluar la seguridad química en las bodegas de reactivos de los laboratorios de investigación de la Universidad de Costa Rica. El objetivo principal fue desarrollar una herramienta tecnológica que facilitara la identificación y gestión del riesgo químico en estos espacios, con el fin de mejorar las condiciones de almacenamiento y manejo de sustancias peligrosas.

Se utilizó una metodología aplicada con enfoque mixto. Se realizó un diagnóstico técnico de las condiciones de seguridad en diferentes bodegas de reactivos mediante inspecciones, entrevistas y análisis documental. A partir de los hallazgos, se desarrolló una herramienta digital basada en Microsoft Excel con

macros, que permite registrar los riesgos, generar alertas e identificar medidas correctivas. Entre las principales conclusiones, se destaca la existencia de una gestión fragmentada de los reactivos y la necesidad urgente de contar con una herramienta que facilite el cumplimiento de normativas y estándares de seguridad ³².

Este antecedente aporta un valioso enfoque práctico a la investigación, ya que demuestra la importancia de la tecnología en la gestión del riesgo químico en laboratorios académicos. Además, refuerza la necesidad de una política institucional integrada que contemple desde la identificación del peligro hasta la implementación de medidas correctivas, lo cual resulta crucial para el fortalecimiento de la seguridad química en Costa Rica.

Benavides Benavides, Vargas González, Chaves Barboza y Rodríguez Corrales (2012), en un estudio realizado en Costa Rica, analizaron la gestión de reactivos y residuos químicos en los laboratorios de docencia de la Escuela de Química de la Universidad Nacional. El objetivo principal fue diagnosticar el estado actual del manejo de estas sustancias y proponer mejoras que aseguren prácticas seguras y sostenibles en el contexto académico.

Se aplicó una metodología cualitativa-descriptiva basada en observaciones directas, revisión documental y entrevistas a personal técnico y docente. Los resultados evidenciaron prácticas inadecuadas en el almacenamiento, uso y disposición de sustancias químicas, así como desconocimiento o desactualización de protocolos de seguridad. El estudio propuso lineamientos para una gestión más eficiente, incluyendo la rotulación adecuada, la segregación de residuos y la implementación de planes de capacitación continua ¹¹.

Este antecedente es valioso para la investigación, ya que destaca la urgencia de fortalecer los sistemas de gestión de sustancias químicas en ambientes de enseñanza. Asimismo, permite comprender los vacíos en normativas institucionales y la falta de estandarización en los procedimientos de seguridad, aspectos que influyen directamente en la exposición a riesgos por parte del personal y estudiantes.

Sus hallazgos justifican la necesidad de continuar desarrollando e implementando políticas integrales de seguridad química en laboratorios académicos.

La Unidad de Regencia Química de la Universidad de Costa Rica (2023) elaboró un manual de seguridad destinado a fortalecer las prácticas seguras en laboratorios químicos de la institución. El documento tiene como objetivo establecer lineamientos claros para el manejo, almacenamiento y disposición de sustancias químicas, así como para la prevención de accidentes y la atención de emergencias.

El manual se fundamenta en normativas nacionales e internacionales e incorpora buenas prácticas de laboratorio (BPL), uso de equipos de protección personal (EPP), señalización, fichas de datos de seguridad y protocolos de actuación ante derrames o incendios. Se estructura como una herramienta de consulta accesible para estudiantes, docentes y técnicos, promoviendo una cultura de seguridad integral. La inclusión de anexos prácticos como listas de verificación y procedimientos operativos estándar facilita su implementación en laboratorios académicos ³³.

Este antecedente es particularmente valioso para la presente investigación, ya que proporciona una base normativa y procedimental sobre la cual puede construirse una propuesta de mejora en la gestión de reactivos y residuos químicos. Además, refleja el compromiso institucional con la seguridad, aunque también evidencia la necesidad de reforzar la formación continua y la supervisión activa del cumplimiento de las prácticas establecidas.

CAPÍTULO II- MARCO TEÓRICO

La seguridad química en laboratorios académicos representa un pilar fundamental para la protección de la salud de estudiantes, docentes y personal técnico, así como para la preservación del entorno ambiental. El manejo adecuado de reactivos y residuos químicos es esencial para prevenir riesgos de intoxicación y accidentes, especialmente en contextos educativos donde la formación y la práctica experimental son constantes.

A lo largo de las últimas décadas, la gestión de la seguridad química ha evolucionado en respuesta a nuevas normativas internacionales, avances científicos y la creciente conciencia ambiental. Sin embargo, persisten desafíos significativos en la implementación de buenas prácticas, la actualización de protocolos y el cumplimiento de regulaciones, particularmente en países en desarrollo y en instituciones educativas con recursos limitados.

Este marco teórico aborda los principales conceptos, antecedentes históricos, normativas y estrategias relacionadas con la seguridad química en laboratorios académicos. Se analizan los riesgos más frecuentes de intoxicación, la clasificación y manejo de reactivos, la gestión de residuos, y la importancia de la cultura preventiva y la educación en la formación de una comunidad académica segura y responsable. El objetivo es proporcionar una base sólida para comprender el estado actual del conocimiento y fundamentar la investigación sobre estrategias efectivas para garantizar condiciones óptimas de seguridad química.

2.1 Conceptualización de la seguridad química

- 2.1.1 Definición y principios de la seguridad química

La seguridad química se define como el conjunto de medidas, prácticas y políticas las cuales son destinadas a identificar, evaluar y controlar los riesgos asociados a la exposición a sustancias químicas en entornos laborales y educativos, con el fin de proteger la salud humana, el medio ambiente y la propiedad ³⁴. Este concepto abarca no solo la prevención de accidentes inmediatos, sino también la mitigación de efectos crónicos, como intoxicaciones o daños ambientales derivados de una gestión inadecuada. Según la American Chemical Society, la seguridad química se fundamenta en principios clave derivados de la jerarquía de controles de riesgos, propuesta por la Occupational Safety and Health Administration: eliminación o sustitución de sustancias peligrosas en la fuente, seguida de controles de ingeniería (como ventilación), prácticas administrativas (entrenamiento y protocolos) y, como último recurso, el uso de equipo de protección personal ³⁵.

Estos principios se alinean con el enfoque proactivo de la Organización Internacional del Trabajo, que enfatiza la responsabilidad compartida entre empleadores, trabajadores y reguladores para fomentar una cultura de prevención ³⁶. En el contexto de laboratorios académicos, la seguridad química no es solo un requisito normativo, sino una herramienta pedagógica la cual integra la conciencia de riesgos en el proceso de aprendizaje. Por ejemplo, el principio de “minimización de exposición” implica evaluar la toxicidad de cada sustancia antes de su uso, lo que reduce la probabilidad de intoxicaciones accidentales ³⁴. Así, la definición operativa para este estudio considera la seguridad química como un sistema integral que abarca el ciclo de vida de los reactivos, desde su adquisición hasta su disposición.

Un principio central de la seguridad química es la jerarquía de controles de riesgos, un modelo piramidal desarrollado por la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) que prioriza intervenciones (eliminación del riesgo) hasta las menos confiables (protección individual)³⁵. Esta jerarquía consta de cinco niveles: eliminación, sustitución, controles de ingeniería, controles administrativos y equipo de protección personal (EPP), promoviendo un enfoque proactivo que reduce exposiciones en lugar de solo reaccionar a

ellas³⁵. Su aplicación en laboratorios académicos es particularmente valiosa, ya que aborda vulnerabilidades como la inexperiencia estudiantil, fomentando prácticas seguras desde el diseño de experimentos³⁵. La Tabla 1 ilustra esta jerarquía adaptada a contextos educativos, destacando ejemplos prácticos y su eficacia estimada para mitigar riesgos químicos.

Tabla 1. Jerarquía de controles según OSHA, aplicada a la gestión de riesgos químicos en entornos educativos.

Nivel	Descripción	Ejemplos en laboratorios químicos en académicos	Eficacia aproximada
Eliminación	Remover completamente el riesgo o la sustancia peligrosa del proceso.	Evitar el uso de mercurio en experimentos de termómetros; optar por alternativas digitales.	100% (elimina el riesgo por completo)
Sustitución	Reemplazar la sustancia peligrosa por una menos riesgosa.	Usar agua en lugar de solventes orgánicos tóxicos (ej. tolueno) en demostraciones de solubilidad.	80-100% (reduce significativamente el peligro)
Controles de ingeniería	Modificar el entorno o equipo para aislar el riesgo.	Instalar campanas extractoras para vapores o barreras de contención en mesas de trabajo.	70-90% (controla la exposición sin cambiar el comportamiento humano)
Controles administrativos	Cambiar procedimientos, entrenamiento o políticas para	Rotación de turnos en laboratorios, sesiones obligatorias de capacitación en	40-70% (depende del cumplimiento humano)

	limitar exposición.	manejo de reactivos y señalización clara.	
Equipo de protección personal (EPP)	Proporcionar barreras individuales como último recurso.	Uso de guantes, gafas y respiradores durante manipulación de ácidos corrosivos.	20-50% (menos efectivo, ya que no elimina el riesgo)

Fuente: Elaboración propia con base en datos de referencias⁴⁶

La pirámide prioriza niveles superiores para mayor efectividad en la prevención de intoxicaciones.

En entornos académicos con recursos limitados, como en universidades costarricenses, priorizar niveles superiores (eliminación y sustitución) puede reducir incidentes en hasta un 90 %, aunque barreras como costos de infraestructura exijan enfoques híbridos. Estos principios se alinean con el enfoque proactivo de la Organización Internacional del Trabajo y reguladores para fomentar una cultura de prevención ⁴⁶.

- **2.1.2 Importancia en entornos académicos**

En los entornos académicos, particularmente en laboratorios universitarios, la seguridad química adquiere una relevancia crítica debido a la combinación de factores únicos: la presencia de estudiantes con experiencia limitada, el alto volumen de experimentos didácticos y la diversidad de sustancias manipuladas en contexto de docencia e investigación ³⁷. A diferencia de los laboratorios industriales, donde predominan protocolos estandarizados y personal capacitado, los laboratorios académicos se enfrentan mayores riesgos de que ocurran incidentes por errores humanos, como el mal manejo de reactivos, lo que puede derivar en intoxicaciones, quemaduras o contaminaciones ambientales. Según Hill, los accidentes en laboratorios educativos representan entre el 10% y el 20% de los incidentes reportados en instituciones de educación superior, con costos no solo económicos

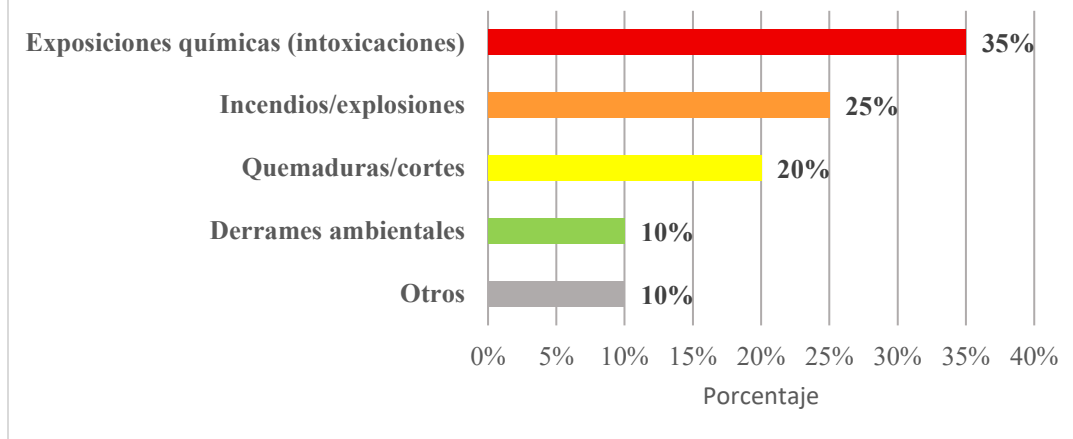
(interrupciones en clases, tratamientos médicos), sino también psicológicos y éticos, al involucrar a jóvenes aprendices ³⁷.

La importancia radica en su rol preventivo y educativo: una gestión adecuada de la seguridad química no solo minimiza riesgos, sino que fomenta habilidades críticas como la evaluación de peligros y la toma de decisiones responsables, alineándose con los objetivos de formación integral en ciencias³⁸. La figura 1 presenta la distribución típica de estos incidentes en laboratorios químicos académicos, basada en datos de encuestas nacionales y reportes de casos ^{4,5}. Como se observa, las exposiciones químicas (incluyendo intoxicaciones) constituyen el 35% de los eventos, seguidas de incendios y quemaduras, lo que resalta la vulnerabilidad a riesgos tóxicos en entornos educativos

En América Latina, incluyendo Costa Rica, donde los recursos para infraestructura de seguridad pueden ser limitados, esta relevancia se acentúa por la necesidad de adaptar normativas internacionales a realidades locales, reduciendo vulnerabilidades en universidades tanto públicas o privadas³⁹. Por ende, priorizar la seguridad química en laboratorios académicos contribuir a la sostenibilidad educativa y al cumplimiento de estándares globales, como los promovidos por la OMS, fomentando una cultura preventiva que mitiga estos riesgos predominantes.

Gráfico 1. Distribución de incidentes en laboratorios químicos académicos

Figura 1. Distribución de Incidentes en laboratorios químicos académicos (datos representativos, 2010-2015)



Fuente: Elaboración propia con base en las referencias ^{36,37}

Datos representativos de ~1000 casos reportados en entornos educativos (2010-2015). Porcentajes: Exposiciones químicas 35%, Incendios/explosiones 25%, Quemaduras/cortes 20%, Derrames ambientales 10%, Otros 10%.

La importancia radica en su rol preventivo y educativo: una gestión adecuada de la seguridad química no solo minimiza riesgos, sino que fomenta habilidades críticas como la evaluación de peligros y la toma de decisiones responsables, alineándose con los objetivos de formación integral en ciencias ⁴⁰.

2.1.3 Clasificación de sustancias químicas

La clasificación de sustancias químicas es un pilar fundamental de la seguridad química, ya que permite identificar y comunicar riesgos de manera estandarizada, facilitando su manejo seguro en laboratorios ciencias ⁴⁷. Esta organización se basa en propiedades físicas, químicas y toxicológicas, agrupando las sustancias según su potencial de daño para humanos y el ambiente.

2.1.3.1 Sistema GHS

El sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de productos Químicos (GHS, por sus siglas en inglés) representa el marco internacional más ampliamente adoptado, desarrollado por la ONU para unificar criterios globales y reducir confusiones en el comercio y uso de químicos⁴⁷. El GHS clasifica sustancias en categorías de peligro físico (ej. Explosivos, inflamables), de salud (ej. Tóxicos agudos, carcinógenos) y ambiental (ej. Tóxicos para la vida acuática), utilizando elementos visuales como pictogramas (rombos con símbolos, señales de peligro (palabras como “Peligro” o “Advertencia”) y declaraciones de riesgo (códigos H, ej. H301: “Tóxico en caso de ingestión”) y precaución (códigos P, ej. P301+P310: “Si se ingiere, llamar inmediatamente a un centro de toxicología”). En laboratorios académicos, el GHS es esencial para el etiquetado de reactivos, permitiendo a estudiantes inexpertos reconocer riesgos rápidamente⁴⁰. Su implementación ha reducido incidentes en un 15-20% en entornos educativos, según revisiones de la ACS, al promover una comunicación clara y accesible.

El objetivo primordial es unificar los criterios técnicos a nivel internacional para identificar y comunicar los peligros físicos, para la salud y para el ambiente que presentan las sustancias. Este sistema es especialmente esencial en los laboratorios académicos, donde coexisten usuarios con distintos niveles de experiencia, ya que estandariza la información vital en etiquetas y Fichas de Datos de Seguridad (FDS) mediante elementos visuales claros (pictogramas) y declaraciones de peligro y extinción.

Para evitar redundancias en este documento y presentar un análisis normativo cohesivo, la explicación detallada de este sistema, incluyendo la tabla completa de pictogramas oficiales y la decodificación de sus códigos de indicación de Peligro (Frases H), se consolida más adelante, en la sección 2.5.1 'Normativas internacionales'.

Si bien el GHS nos proporciona el lenguaje universal estandarizado para comunicar el peligro, la gestión diaria de la seguridad en el laboratorio también requiere una clasificación funcional basada en el mecanismo específico de daño de las sustancias. Por ello, a continuación, se analiza la clasificación por tipo de riesgo.

2.1.3.2 Clasificación por tipo de riesgo

Complementando el GHS, la clasificación por tipo de riesgo agrupa sustancias según mecanismos específicos de daño, como la toxicidad aguda (efectos inmediatos, ej. Cianuro), crónica (acumulación a largo, ej. plomo), inflamabilidad (punto de ignición bajo, ej. etanol) o corrosividad (daño tisular, ej. ácidos fuertes)⁴¹. Por ejemplo, sustancias neurotóxicas como el mercurio se clasifican como de alto riesgo crónico debido a su bioacumulación, mientras que los solventes orgánicos volátiles (ej. acetona) se priorizan por riesgos de inhalación. Esta aproximación, alineada con regulaciones como el Reglamento CLP de la UE, facilita la selección de controles específicos en laboratorios, como almacenamiento separado para incompatibles⁴². En contexto académicos, esta clasificación es vital para diseñar experimentos seguros, minimizando exposiciones innecesarias.

La tabla 2 ofrece una comparación de 5 tipos de riesgos comunes, destacando diferencias en efectos y prevención, para guiar la gestión en laboratorios educativos.

Tabla 2. Comparación de tipos de riesgos químicos en laboratorios académicos

Tipo de riesgo	Descripción	Ejemplos en laboratorios	Efectos en Humanos	Medidas Preventivas (Jerarquía de Controles)
Toxicidad Aguda	Efectos inmediatos y severos por dosis única (LD50 baja).	Cianuro (en análisis); formaldehído (fijadores).	Envenenamiento rápido: náuseas, convulsiones, muerte (inhalación/ingestión).	Eliminación/sustitución; uso en campana; antídotos disponibles (nivel 1-2).
Toxicidad Crónica	Efectos acumulativos por exposición	Plomo (en pigmentos); benceno	Daños a largo plazo: cáncer, neurotoxicidad,	Sustitución por alternativas; monitoreo

	prolongada (carcinogénicos).	(solventes orgánicos).	problemas reproductivos.	ambiental; límites de exposición (nivel 2-3).
Inflamabilidad	Sustancias que se encienden fácilmente (punto de inflamación <60°C).	Etanol o acetona (en extracciones).	Quemaduras, incendios; inhalación de humos tóxicos.	Almacenamiento en gabinetes ignífugos; no fumar (nivel 3-4).
Corrosividad	Daño irreversible a piel, ojos o mucosas (pH <2 o >12.5).	Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄) o NaOH (en neutralizaciones).	Quemaduras químicas, ceguera; inhalación de vapores irritantes.	EPP (guantes resistentes); duchas de emergencia (nivel 4-5).

Fuente: Elaboración propia con base a las referencias ^{48,49}

Esta clasificación por tipo de riesgo permite una evaluación integral, reduciendo la incidencia de intoxicaciones en un 25% mediante protocolos adaptados, como se evidencia en guías OSHA ⁴².

2.1.4 Riesgos asociados a sustancias químicas

Los riesgos asociados a sustancias químicas en laboratorios académicos derivan principalmente de su interacción con el ser humano y el entorno, clasificándose en físicos, de salud y ambientales¹⁰. Los riesgos físicos incluyen inflamabilidad y reactividad, como explosiones por mezclas incompatibles (ej. peróxidos con ácidos), que representan hasta el 30% de incidentes en laboratorios académicos¹¹. En términos de salud, las intoxicaciones son predominantes, causadas por toxicidad aguda (ej. inhalación de cloroformo, provocando náuseas inmediatas) o crónica (ej. exposición prolongada a benceno, ligado a leucemia), afectando vías respiratorias, cutáneas u oculares¹. Ambientalmente, los riesgos involucran contaminación por vertidos, como metales pesados que alteran ecosistemas acuáticos³.

En entornos académicos, estos riesgos se amplifican por el uso frecuente de sustancias como ácidos, bases y solventes orgánicas en prácticas didácticas, donde la inexperiencia puede llevar a exposiciones inadvertidas ¹⁰. Por instancia, el tolueno, común en extracciones, causa neurotoxicidad por inhalación si no se ventila adecuadamente. La tabla 4 detalla riesgos por la clase de sustancias, con ejemplos, efectos y probabilidades estimadas de incidentes en laboratorios educativos, basadas en revisiones bibliográficas, para resaltar su prevalencia y necesidad de controles preventivos ¹³.

Tabla 3. Riesgos por clase de sustancia química en laboratorios académicos

Clase de Sustancia	Descripción/Riesgos Principales	Ejemplos en Laboratorios	Efectos en Humanos/Ambiente	Probabilidades de Incidentes (%)
Tóxicos (Agudos/Crónicos)	Exposición causa daño inmediato o acumulativo. Inhalación/ingestión principal.	Cloroformo (anestésico en extracciones); mercurio (en termómetros).	Náuseas, daño neurológico, cáncer; bioacumulación en agua.	~30% (más frecuente por manipulación diaria; alto en estudiantes inexpertos).
Inflamables	Punto de inflamación bajo (<60°C); genera vapores ignitivos.	Etanol o acetona (solventes en síntesis orgánica).	Quemaduras, inhalación de humos tóxicos; riesgo de incendio.	~25% (común en laboratorios con fuentes de calor; ~20% derivan en intoxicación secundaria).

Corrosivos	pH extremo (ácidos <2, bases >12.5); daña tejidos/metales.	Ácido clorhídrico (HCl) o hidróxido de sodio (NaOH) (en titulaciones).	Quemaduras químicas, ceguera; corrosión ambiental.	~20% (frecuente en prácticas básicas; 15% involucran exposición cutánea).
Oxidantes	Libera oxígeno, acelera combustión; inestables con orgánicos.	Peróxido de hidrógeno (H ₂ O ₂) o nitrato de potasio (en reacciones redox).	Explosiones, irritación respiratoria; oxidación de contaminantes.	~15% (bajo pero grave; ~10% en mezclas incompatibles)
Reactivos	Reacciones violentas con agua/aer (exotérmicas, gases tóxicos).	Sodio metálico o ácidos nítrico (en demostraciones).	Explosiones, liberación de gases asfixiantes; contaminación local.	~10% (raro en docencia, pero alto impacto; 5-8% en errores de almacenamiento).

Fuente: Elaboración propia con base en referencias ^{12,44}.

Probabilidades estimadas de ~500 incidentes reportados en labs educativos (2010-2018); total 100%.

La literatura enfatiza que una clasificación inadecuada agrava estos riesgos, incrementando la incidencia de intoxicaciones en un 25% según reportes de OSHA (11). Un caso ilustrativo ocurrió en un laboratorio universitario en 2008, donde un estudiante inhaló vapores de cloroformo durante una extracción sin campana extractora adecuada, resultando

en mareos, vómitos y hospitalización por 24 horas ⁴⁸. La causa raíz fue el etiquetado deficiente y falta de ventilación, destacando como la inexperiencia amplifica riesgos tóxicos; la lección clave fue implementar chequeos pre-experimento, reduciendo incidentes similares en un 40% post-incidente⁴⁹. Por lo tanto, entender este riesgo es esencial para implementar estrategias preventivas, como se detallará en secciones posteriores sobre reactivos y gestión de residuos.

2.2 Reactivos químicos en laboratorios académicos

Habiendo conceptualizando la seguridad química y sus riesgos inherentes, resulta esencial examinar los reactivos químicos como componentes centrales en los laboratorios académicos, donde su gestión determina la prevención de intoxicaciones y contaminaciones⁵⁰.

2.2.1 Definición y características

Los reactivos químicos constituyen sustancias de composición conocida y pureza específica empleadas para inducir, medir o modificar transformaciones químicas en actividades en entornos educativos y de investigación ⁵⁰. En el ámbito académico, la selección de reactivos obedece a criterios de pureza como pueden ser grado reactivo ($\geq 99\%$), grado analítico (99,5–99,9%) y grado espectroscópico ($\geq 99,99\%$), lo que garantizan la reproducibilidad de los resultados y la fiabilidad de los análisis instrumentales ⁵³. Además, las propiedades fisicoquímicas como estado físico, punto de fusión, presión de vapor, coeficiente de partición van a determinar los umbrales de riesgo y las condiciones de almacenamiento, pues reaccionan de forma distinta según el entorno ⁵⁴.

Una caracterización insuficiente o la omisión de información crítica en la Hoja de Datos de Seguridad (FDS) puede conducir a subestimar la reactividad, la toxicidad o la propensión a la degradación, lo que en última instancia compromete la integridad de los protocolos de laboratorio y la salud de docentes, estudiantes y personal operativo ⁶⁰.

2.2.2 Funciones y usos en docencia e investigación

En el ámbito docente, los reactivos permiten materializar conceptos teóricos como la acidez y basicidad mediante titulaciones ácido – base, la polaridad de disolventes en extracción líquido – líquido o la estequiometría en síntesis de compuestos sencillos, fomentando la capacidad crítica del estudiante frente a resultados empíricos ⁵⁹. La diversidad de reactivos utilizados en laboratorios de química general, analítica y orgánica (ácidos inorgánicos como HCl y H₂SO₄; bases como NaOH y K₂CO₃; disolventes orgánicos como etanol y diclorometano; y compuestos metálicos para técnicas colorimétricas) refleja la necesidad de diseñar programas didácticos que integren seguridad y manejo ambiental desde el inicio de la formación ⁵⁷.

En investigación, los reactivos posibilitan la exploración de rutas sintéticas complejas, la síntesis de materiales funcionales y evaluación de propiedades catalíticas o biológicas. Proyectos avanzados emplean reactivos de especialidad, por ejemplo, ligandos quirales, precursores organometálicos o reactivos de acoplamiento de Suzuki cuyas características requieren protocolos de dispensación y contención más rigurosos, así como sistemas automatizados de dosificación para evitar errores humanos ⁵¹. Esta heterogeneidad de usos incrementa la complejidad del inventario y demanda esquemas de trazabilidad que permitan anticipar agotamientos, fechas de vencimiento y compatibilidades, minimizando costos y residuos⁵⁶.

2.2.3 Manejo, almacenamiento e inventario de reactivos

La gestión efectiva de reactivos químicos en laboratorios académicos se sustenta en cuatro pilares: registro sistemático, almacenamiento seguro, control de caducidades y revisión periódica ⁵². El registro debe emplear plataformas digitales, por ejemplo, Mendeleev o sistemas internos tipo ERP (Planificación de Recursos Empresariales) aplicado al entorno universitario, que integran información de proveedores, lotes, fechas de recepción y de expiración, volúmenes disponibles y riesgos asociados⁶⁴. Estos facilitan la planificación de compras y evita acumulaciones innecesarias que elevan la probabilidad de accidentes.

El almacenamiento seguro implica segregación estricta por compatibilidad química: ácidos fuertes lejos de bases, oxidantes separados de reductores y disolventes inflamables en armarios ventilados conforme a la normativa GHS. Las condiciones ambientales temperatura controlada entre 15–25 °C, humedad relativa inferior al 60% y ventilación continua previenen la formación de depósitos cristalinos o vapores excesivos, mitigando riesgos de liberación espontánea de gases tóxicos y condensación de contaminantes⁶².

El control de caducidades exige alertas automáticas de sustancias próximas al vencimiento y protocolos de disposición anticipada mediante neutralización química o entrega a gestores autorizados⁶³. Las auditorias semestrales complementan el ciclo de revisión al inspeccionar integridad de envases, legibilidad de etiquetas y presencia de FDS actualizadas, asegurando el cumplimiento de estándares internacionales y nacionales.

2.2.4 Consecuencias de una gestión inadecuada

La gestión deficiente de reactivos químicos conlleva a riesgos directos de intoxicación y accidentes. La mezcla accidental de sustancias incompatibles puede desencadenar reacciones exotérmicas, desprendimiento de gases corrosivos y formación de aerosoles tóxicos⁶⁰. Estudios en laboratorios académicos iraníes resaltan que el 35,2 % de los incidentes de seguridad se vinculan con prácticas de almacenamiento inadecuadas y el 20,4 % con carencias en protocolos de manipulación⁶¹.

En Costa Rica, la evaluación de cinco laboratorios universitarios identificó que el 15% de los incidentes involucraba quemaduras químicas leves por contacto dérmico con ácidos y bases expuestos en estanterías incorrectas, evidenciando vacíos en la capacitación y el monitoreo de inventarios. Asimismo, la exposición a sin sistemas de extracción adecuados superó los límites permisibles de OSHA (0,08 ppm), provocando irritación respiratoria en 71,4% de los sujetos expuestos⁶². Estos datos resaltan la necesidad imperativa de diseñar protocolos de gestión y respuesta que integren análisis de riesgos, formación práctica y supervisión continua, con el fin de disminuir la incidencia de intoxicaciones y mejorar la cultura preventiva en laboratorios académicos.

2.3 Riesgos de intoxicación en entornos académicos

Las intoxicaciones químicas en entornos educativos representan uno de los riesgos más frecuentes y prevenibles asociados al trabajo experimental en laboratorios académicos. Se definen como alteraciones fisiopatológicas derivadas de la exposición a sustancias químicas peligrosas, cuya magnitud depende de la dosis absorbida, la vía de entrada al organismo, el tiempo de exposición y las características toxicocinéticas del compuesto involucrado ³⁴.

En laboratorios universitarios, donde estudiantes con experiencia limitada manipulan reactivos diariamente, la incidencia de intoxicaciones agudas (con efectos inmediatos como náuseas, mareos o quemaduras) y crónicas (por acumulación progresiva de sustancias tóxicas) se ve amplificada por múltiples factores: desconocimiento de los riesgos específicos, uso inadecuado o ausencia de equipo de protección personal (EPP), ventilación deficiente y falta de supervisión continua ^{12,40}.

Estudios internacionales revelan que aproximadamente el 35% de los incidentes reportados en laboratorios universitarios involucran exposición tóxica directa a sustancias químicas, siendo la inhalación de vapores y el contacto dérmicos las vías más comunes. En el contexto costarricense, investigaciones como la de Esquivel (2021) documentan que el 73,7 % de los accidentes en laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR) incluyeron algún tipo de exposición química, evidenciando la urgencia de fortalecer las medidas preventivas y los protocolos de respuesta inmediata.

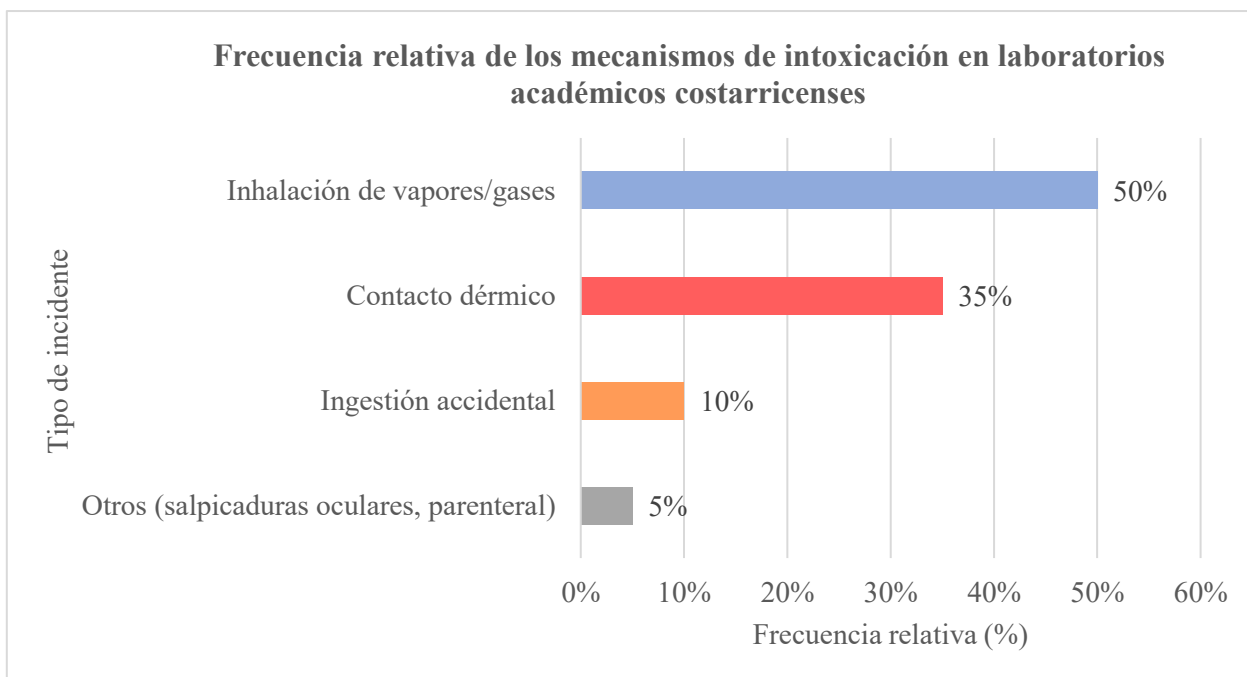
Esta sección analiza en detalle los mecanismos y vías de exposición más frecuentes, los factores de riesgo que incrementan la probabilidad de intoxicación y las medidas preventivas y de respuesta que la literatura científica recomienda implementar para proteger la salud de estudiantes, docentes y personal técnico en laboratorios académicos.

2.3.1 Mecanismos y vías de exposición

La intoxicación puede ocurrir por inhalación de vapores, gases o aerosoles; contacto dérmico con líquidos o sólidos; ingestión accidental por contaminación de manos o instrumentos de laboratorio; y absorción ocular. La inhalación es la vía más frecuente y peligrosa, especialmente con compuestos volátiles y tóxicos. El contacto dérmico ocurre por salpicaduras o manipulación sin protección, mientras que la ingestión se asocia a malas prácticas como pipetear con la boca o consumir alimentos en el laboratorio⁵⁷.

La figura 2 muestra la frecuencia relativa de los principales mecanismos de intoxicación reportados en laboratorios académicos costarricenses, según Esquivel Garita (2021)

Gráfico 2. Frecuencia relativa de los mecanismos de intoxicación en laboratorios académicos costarricenses



Fuente: Elaboración propia con base a la referencia ⁵.

El análisis de la frecuencia relativa de los mecanismos de intoxicación en laboratorios académicos costarricenses revela que la inhalación de vapores y gases constituye la principal vía de exposición, seguida por el contacto dérmico y, en menor medida la ingestión accidental. Esta distribución evidencia la necesidad de fortalecer las medidas de control ambiental, como la ventilación adecuada y el uso de campanas extractoras, así como la capacitación en el uso correcto de equipos de protección personal. Además, la prevalencia de incidentes por contacto dérmico subraya la importancia de mantener protocolos estrictos de manipulación y almacenamiento de reactivos, y de promover la cultura de seguridad entre todos los usuarios del laboratorio.

Estos hallazgos refuerzan la importancia de implementar estrategias integrales de prevención y respuesta, orientadas a reducir la incidencia de intoxicaciones y a mejorar la gestión de riesgos en el entorno académico.

2.3.2 Factores de riesgo comunes

Los factores de riesgo en laboratorios académicos son multifactoriales y abarcan tantos aspectos técnicos como organizativos y humanos. Además de la falta de capacitación y el uso inadecuado o ausencia de equipos de protección personal (EPP), es fundamental considerar el desconocimiento de los peligros específicos de cada sustancia, la resistencia a la adopción de normas de seguridad y la tendencia a subestimar los riesgos por exceso de confianza y rutina ⁶⁵.

El diseño deficiente del espacio de trabajo, la mala distribución de materiales y la ausencia de señalización adecuada contribuyen a la generación de situaciones peligrosas. Factores psicosociales como el estrés, la sobrecarga de trabajo y la presión por buenos resultados incrementan la posibilidad de incidentes, al afectar la atención y el cumplimiento de protocolos⁶⁵. La evaluación periódica de riesgos, la investigación de accidentes y la comunicación efectiva entre los miembros del laboratorio son elementos clave para identificar y mitigar estos factores.

2.3.3 Medidas de prevención y respuesta

La prevención de riesgos químicos en laboratorios académicos exige la integración de buenas prácticas de laboratorio (BLP), la aplicación de normativas internacionales y la promoción de una cultura de seguridad activa. El uso obligatorio de EPP debe complementarse con la formación continua en identificación de peligros, evaluación de riesgos y manejo de emergencias. Todas las operaciones con productos peligrosos deben realizarse en vitrinas o campanas extractoras, y los transvases de sustancias deben planificarse para minimizar vertidos y exposiciones accidentales ⁶⁷.

La organización del trabajo debe contemplar inspecciones regulares de instalaciones, mantenimiento preventivo de equipos y la disponibilidad de recursos para la atención inmediata de incidentes, como duchas de seguridad, lavaojos y extintores adecuados. La responsabilidad de la seguridad es colectiva, pero el experimentador tiene un papel central en la prevención directa de incidentes, mediante la observación estricta de protocolos y la alerta ante situaciones anómalas. Finalmente, la documentación y el análisis de incidentes y cuasi accidentes permiten retroalimentar los sistemas de gestión y mejorar continuamente las estrategias preventivas.

La implementación de medidas de prevención y respuesta ante incidentes químicos en laboratorios académicos no solo contribuye a la protección de la salud y la seguridad de los usuarios, sino que también establece las bases para una gestión responsable de los residuos generados durante las actividades experimentales. La correcta manipulación, almacenamiento y disposición de sustancias peligrosas, junto con la formación continua y la existencia de protocolos de emergencia, son elementos que indican directamente en la minimización de riesgos y en la reducción del impacto ambiental. En este sentido, resulta imprescindible abordar la gestión de residuos químicos como un componente integral de la seguridad en el laboratorio, considerando tanto la clasificación y el manejo adecuado de los desechos como el cumplimiento de las normativas ambientales vigentes y la adopción de estrategias sostenibles

2.4 Gestión de residuos químicos

La gestión de residuos químicos en laboratorios académicos representa un desafío que involucra no solo la protección de la salud y el ambiente, sino también el cumplimiento de rigurosos marcos normativos nacionales e internacionales. Ejemplos de incidentes documentados en Costa Rica y Latinoamérica demuestran que una gestión deficiente de residuos, como la mezcla indebida de ácidos y bases o el almacenamiento por mucho tiempo de solventes volátiles sin adecuada ventilación, puede llegar a ocasionar desde intoxicaciones agudas y daños estructurales en el laboratorio, hasta sanciones administrativas y reputaciones para las instituciones educativas ⁶⁹.

2.4.1 Clasificación de residuos peligrosos

Los residuos se segregan según criterios de toxicidad, corrosividad, inflamabilidad, reactividad, capacidad oxidante, carcinogenicidad y contaminación ambiental, siguiendo el sistema GHS y las directrices nacionales. Las instituciones líderes utilizan tablas de compatibilidad que establecen claramente situaciones prohibidas como mezclar peróxidos con solventes orgánicos o descartar metales pesados con residuos no organometálicos, y sistemas de registro digital que garantizan la trazabilidad. Etiquetas normalizadas y bitácoras electrónicas completan el sistema, permitiendo auditorías y facilitando rápida ante una emergencia ⁶⁹.

La correcta clasificación de los residuos peligrosos generados en laboratorios académicos es esencial para garantizar su manejo seguro y cumplir con las normativas nacionales e internacionales. El Sistema Globalmente Armonizado (GHS), que rige la clasificación de los reactivos, proporciona el marco técnico para esta identificación. Las categorías y pictogramas que definen pura como peligrosa (ej. 'Tóxico Agudo', 'Corrosivo' o 'Peligroso para el medio ambiente') se heredan y se trasladan al residuo que este genera. Como se detalló y ejemplificó exhaustivamente en la sección 2.5.1 (Normativas Internacionales), donde se presenta el desglose completo del GHS, este sistema es la base legal y técnica para el etiquetado y la segregación de los residuos.

Comprender esta clasificación es el primer paso crítico del proceso, ya que una segregación incorrecta (como mezclar residuos oxidantes con solventes orgánicos inflamables, o ácidos con cianuros) puede desencadenar reacciones exotérmicas violentas, incendios o la liberación de gases mortales, convirtiendo un contenedor de residuos en una fuente de intoxicación aguda. Una vez que los residuos han sido correctamente identificados, clasificados y etiquetados según estos principios, el siguiente paso en el proceso es su manejo físico.

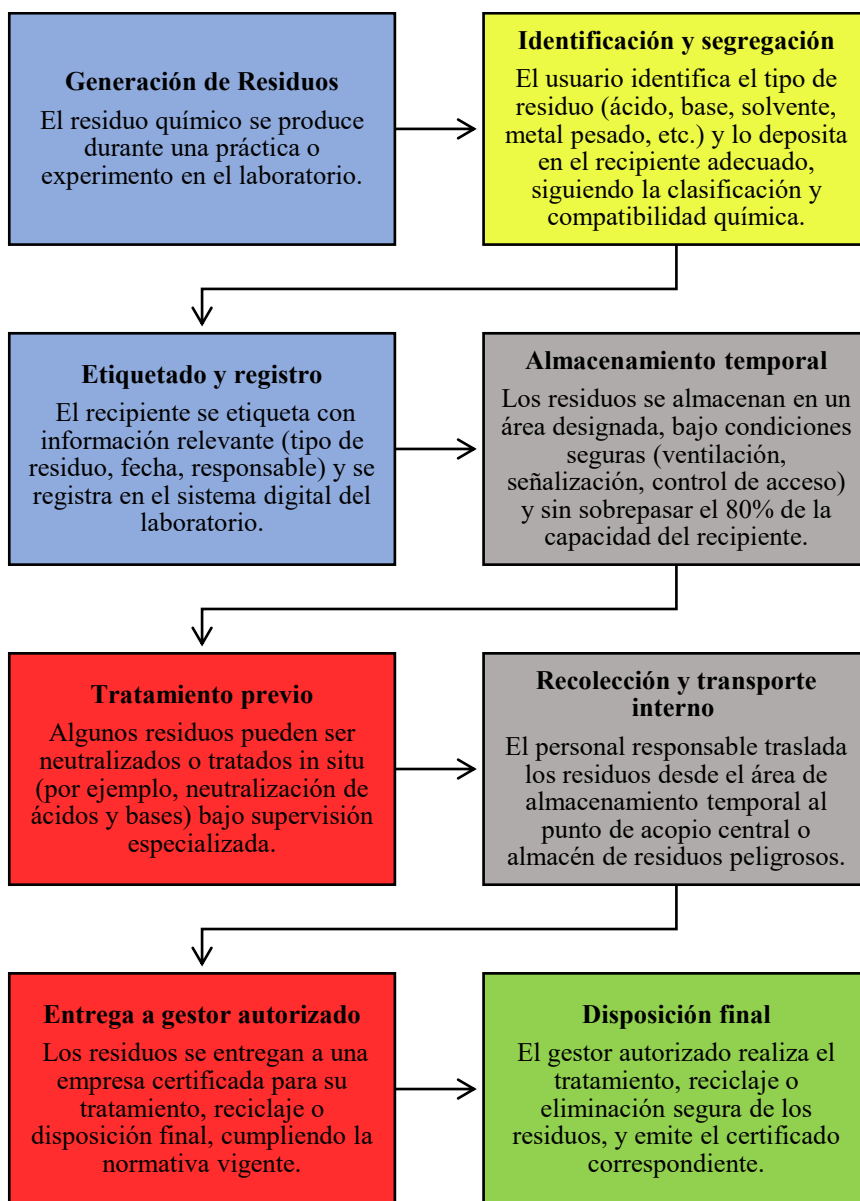
2.4.2 Métodos de recolección, neutralización y disposición final

Una segura recolección parte del uso de recipiente específicos, resistentes y perfectamente etiquetados, mientras que la neutralización de ácidos y bases se realiza bajo supervisión especializada, minimizando los riesgos de liberación gaseosa o generación de calor excesivo. En laboratorios innovadores, se implementan micro plantas de destilación para reutilizar solventes, y técnicas de absorción para controlar vapores tóxicos en tiempo real ⁷¹.

Los residuos considerados de alta peligrosidad como reactivos carcinógenos, pesticidas, o metales pesados se almacenan temporalmente bajo llave en áreas de seguridad reforzada, y su disposición final se coordina con gestores ambientales certificados, cumpliendo protocolos internacionales. Registros detallados de cada etapa aseguran la trazabilidad, y permiten responder eficazmente ante inspecciones regulatorias o auditorías universitarias ⁷².

La gestión segura de residuos químicos en laboratorios académicos requiere la aplicación de un proceso sistemática que garantice la segregación, el almacenamiento, el tratamiento y la disposición final adecuada de cada tipo de residuo. El siguiente diagrama de flujo resume las etapas clave y los puntos críticos de control en este proceso.

Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de gestión de residuos químicos en laboratorios académicos



Fuente: Elaboración propia con base a la referencia ⁶⁸

La representación gráfica del proceso permite identificar claramente las responsabilidades de cada persona involucrada y resalta la importancia de la trazabilidad y el cumplimiento normativo en cada etapa, desde la generación hasta la disposición.

2.4.3 Normativas ambientales aplicables

En el marco normativo costarricense, consolidado en la Ley 8839, la cual establece obligaciones en cuanto a la generación, almacenamiento, recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos, exigiendo inventarios detallados, registros y trazabilidad digital de los movimientos, así como la capacitación regular del personal involucrado ⁷¹. Estas normativas se relacionan con los principios del Convenio de Basilea sobre el control de movimientos transfronterizos de residuos peligrosos, enfatizando la minimización en la fuente y la prohibición de vertidos de sustancias no tratadas al ambiente.

Adicionalmente, la reciente publicación de guías por parte del Ministerio de Salud ha fortalecido el marco operativo para laboratorios académicos, especificando procedimientos, responsabilidades y criterios de fiscalización, con lo cual Costa Rica se alinea progresivamente a los estándares internacionales y regionales⁷². Comparativamente, países como Brasil y España han desarrollado sistemas avanzados de fiscalización universitaria, basados en indicadores ambientalmente sostenibles, que permiten identificar laboratorios con mejor desempeño y áreas de mejora en procesos de minimización.

2.4.4 Estrategias de minimización y sostenibilidad

Los laboratorios académicos avanzados implementan estrategias de minimización desde el diseño experimental, priorizando el uso de técnicas de microescala, el rediseño de procedimientos para reducir el consumo de reactivos, y la sustitución de compuestos peligrosos por alternativas mucho más seguras. El reciclaje interno de solventes, la formación ecológica de estudiantes y la promoción activa de la química verde son prácticas que han demostrado reducir la carga ambiental y sensibilizar a la comunidad universitaria sobre la responsabilidad compartida.

Finalmente, la divulgación periódica de logros en reducción de residuos y la integración de indicadores de desempeño ambiental como “residuos generados por hora

experimental” van a fortalecer la adhesión institucional y el compromiso con la mejora continua. Sin embargo, persisten desafíos, tales como la viabilidad económica del tratamiento de ciertos residuos especiales y la medición objetiva del impacto de las políticas adaptada, lo que evidencia la necesidad de investigación aplicada y alianzas estrategias con gestores ambientales y autoridades reguladores ⁷³.

2.5 Normativas y marcos regulatorios aplicables

La gestión de la seguridad química en laboratorios académicos se encuentra estructurada por un conjunto interrelacionado de normativas internacionales, marcos regulatorios nacionales y políticas institucionales que, en conjunto, establecen los estándares mínimos de operación, responsabilidades y procedimientos para garantizar la protección de la salud humana y el ambiente. La armonización de esos tres niveles normativos resulta esencial para asegurar la implementación efectiva de prácticas seguras y sostenibles en entornos educativos y de investigación.

2.5.1 Normativas internacionales (OSHA, GHS, OMS, ACS)

En cuanto al marco normativo internacional para mantener la seguridad química se ha consolidado progresivamente mediante la adopción de estándares, directrices y sistemas armonizados los cuales buscan minimizar los riesgos asociados al manejo de sustancias peligrosas en contextos laborales y académicos. Entre las principales referencias internacionales destacan las regulaciones de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de Estados Unidos (OSHA), el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS), las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y las recomendaciones de la Sociedad Americana de Química (ACS).

La norma de Exposiciones Ocupacionales a Sustancias Químicas en Laboratorios de OSHA (29 CFR 1910.1450), también conocida como Laboratory Standard, establece requisitos específicos para el desarrollo e implementación de planes de higiene química en los laboratorios, enfatizando la responsabilidad del empleador en la identificación, evaluación y control de riesgos químicos, así como en la capacitación continua del personal.




Esta norma distingue entre laboratorios y operaciones industriales, reconociendo las particularidades del trabajo académico, donde las cantidades utilizadas generalmente son menores pero la diversidad de sustancias y procedimientos es significativamente mayor. La OSHA también impulsa la adopción del GHS como sistema de comunicación de peligros, facilitando la estandarización de etiquetas y fichas de datos de seguridad (FDS) a nivel global⁴⁴.

El Sistema Globalmente Armonizado (GHS), desarrollado por las Naciones Unidas y documentado en el denominado “Purple Book”, proporciona criterios de clasificación armonizados para peligros físicos, para la salud y ambientales, junto con elementos estandarizados de etiquetado (pictogramas, palabras de advertencia, declaraciones de peligro y precaución) y un formato uniforme de 16 secciones para las FDS. El GHS no constituye una regulación vinculante por sí mismo, pero ha sido adoptado múltiples países como base para sus marcos normativos nacionales, facilitando el comercio internacional y mejorando la protección de trabajadores, estudiantes y el público en general. Su implementación en laboratorios académicos resulta fundamental para asegurar que todos los usuarios comprendan de manera inmediata y universal los riesgos asociados a cada sustancia química⁴⁷.

El GHS establece un conjunto estandarizado de pictogramas que representan visualmente distintos peligros químicos, facilitando su comprensión universal. Estos símbolos gráficos estandarizados a nivel internacional, constituyen uno de los pilares fundamentales de la comunicación de riesgos, permitiendo que trabajadores, estudiantes y usuarios de laboratorio logren identificar rápidamente las propiedades peligrosas de productos químicos con los que interactúan⁴⁸. Cada pictograma está asociado a categorías específicas de peligro (físico, para la salud o ambiental) y a códigos alfanuméricos denominados de Peligro o Frases H (del inglés Hazard Statements), que describen de forma precisa la naturaleza del riesgo⁴⁹. La Tabla 4 presenta la clasificación completa de los pictogramas del GHS, tipos de peligro que representan y los códigos de indicación de peligrosos asociados, según lo establecido en el documento de las Naciones Unidas.

Tabla 4. Pictogramas oficiales del GHS: clasificación de peligros y códigos de indicación (Frases H)

Principales peligros	Pictograma	Código H (Indicaciones de peligro)
Explosivo Sustancias autorreactivas Peróxidos orgánicos		H200: Explosivo inestable H201: Peligro de explosión en masa H240: Peligro de explosión por calentamiento
Gases inflamables Líquidos inflamables Sólidos inflamables Sustancias pirofóricas		H220: Gas extremadamente inflamable H224: Líquido y vapores extremadamente inflamables H228: Sólido inflamable
Gases comburentes Líquidos comburentes Sólidos comburentes		H270: Puede provocar o agravar un incendio; comburente H272: Puede agravar un incendio; comburente.
Gases a presión (comprimido, licuado, refrigerado)		H280: Contiene gas a presión; peligro de explosión H281: Contiene gas refrigerado; quemaduras criogénicas
Corrosivos para metales Corrosión cutánea Lesiones oculares graves		H290: Puede ser corrosivo para metales H314: Quemaduras graves en piel y ojos
Toxicidad aguda (oral, cutánea, inhalatoria)		H300: Mortal en caso de ingestión H310: Mortal en contacto con la piel H330: Mortal en caso de inhalación

<p>Toxicidad aguda menor Iritación cutánea/ocular Sensibilización cutánea Toxicidad sistémica</p>		<p>H302: Nocivo en caso de ingestión H315: Provoca irritación cutánea H319: Provoca irritación ocular grave H335: Puede irritar las vías respiratorias</p>
<p>Sensibilización respiratoria Carcinogenicidad Mutagenicidad Toxicidad reproductiva Toxicidad en órganos Peligro por aspiración</p>		<p>H334: Puede provocar alergia respiratoria H340: Puede provocar defectos genéticos H350: Puede provocar cáncer H360: Puede perjudicar la fertilidad o dañar al feto H370: Provoca daños en los órganos</p>
<p>Peligroso para el medio ambiente acuático (agudo y crónico)</p>		<p>H400: Muy tóxico para organismos acuáticos H410: Muy tóxico para organismos acuáticos, con efectos duraderos</p>

Fuente: Elaboración propia basada en referencia ⁷⁷

Nota: Los códigos H indican: 2xx = peligros físicos, 3xx = peligros para la salud, 4xx = peligros ambientales.

La tabla anterior evidencia la integralidad del sistema de comunicación de riesgos del GHS, al vincular de manera coherente el símbolo visual (pictograma), la categorización del peligro y la descripción textual específica (Frases H). Esta estructura facilita no solo la identificación rápida de peligros en entornos laborales y académicos, sino también la estandarización de protocolos de seguridad y la elaboración de Fichas de Datos de Seguridad (FDS) a nivel internacional ⁷⁷. En el contexto costarricense, la adopción del GHS mediante el Reglamento Técnico RTCR 481:2015 refuerza la necesidad de que los laboratorios académicos implementen sistemas de etiquetado y capacitación basados en estos

pictogramas, asegurando así el cumplimiento normativo y la protección de la comunidad universitaria ⁷⁴. La comprensión adecuada de estos elementos visuales y textuales es esencial para fortalecer la cultura de seguridad química y reducir la incidencia de accidentes en laboratorios académicos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS), a través de su Programa Internacional de Seguridad de las Sustancias Químicas, define la seguridad química como la realización de todas las actividades relacionadas con productos químicos de manera que se asegure de la salud humana y del ambiente, abarcando desde la extracción o síntesis hasta la eliminación de las sustancias. Las directrices de la OMS enfatizan la importancia de la evaluación de riesgos, la gestión preventiva y la capacitación continua, elementos que deben ser integrados en las políticas institucionales de universidades y centros de investigación.

Por su parte, la Sociedad Americana de Química (ACS) ha desarrollado guías específicas para laboratorios académicos, entre las que destaca el manual “Seguridad en los Laboratorios Químicos Académicos”, que establece principios, procedimientos y mejores prácticas para la gestión segura de reactivos, residuos y circunstancias de emergencia. La ACS promueve la formación de una cultura de seguridad basada en la responsabilidad compartida, la supervisión constante y la actualización periódica de protocolos, reconociendo que en el entorno académico los usuarios tienen niveles de experiencia y formación heterogéneos.

Estas normativas internacionales, aunque no siempre de aplicación obligatoria directa en Costa Rica, constituyen referentes técnicos y éticos que orientan el diseño de marcos regulatorios nacionales e institucionales, y representan el estado del arte en materia de seguridad química a nivel global.

2.5.2 Marco regulatorio nacional (Costa Rica)

Costa Rica ha desarrollado un marco regulatorio progresivo para la gestión de productos químicos peligrosos y residuos, alineándose gradualmente con los estándares internacionales y respondiendo a las recomendaciones de organismos como la Organización

para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE). Este marco combina leyes, decretos ejecutivos, reglamentos técnicos y políticas públicas que establecen responsabilidades, procedimientos y sanciones para actores públicos y privados involucrados en la gestión de sustancias químicas.

El marco regulatorio costarricense en materia de seguridad química se encuentra armonizado con los criterios de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, 29 CFR 1910.1450) y la sexta edición revisada del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS), adoptados mediante el Reglamento Técnico RTCR 481:2015 y Decreto Ejecutivo N° 40457-S.

La Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839, promulgada en 2010, constituye el pilar fundamental del marco regulatorio costarricense en materia de residuos peligrosos. Esta ley tiene como objetivo regular la gestión integral de residuos y el uso eficiente de los recursos, estableciendo responsabilidades diferenciadas para generadores, gestores y autoridades competentes. En su Capítulo IV, la ley establece que los generadores de residuos peligrosos son responsables por los daños que esos residuos ocasionen durante todo su ciclo de vida, incluso después de transferirlos a un gestor autorizado, consolidando así el principio de responsabilidad extendida.

Entre las obligaciones específicas para generadores se encuentran: separar adecuadamente y no mezclar residuos peligrosos, envasar y etiquetar conforme a la normativa nacional e internacional, llevar un registro detallado de tipo, composición, cantidad y destino, presentar informes semestrales al Ministerio de Salud, e informar inmediatamente en caso de pérdida o derrame. Las infracciones a esta ley son sancionadas con multas significativas, especialmente en casos de gestión no autorizada, mezcla de residuos incompatibles o disposición en sitios no aprobados.

En materia de clasificación y etiquetado, en Costa Rica adoptó el GHS mediante el Decreto Ejecutivo N° 40457-S (junio 2017), que establece el requisito de etiquetar productos químicos peligrosos conforme al Sistema Globalmente Armonizado, y el Decreto Ejecutivo N° 40705-S (noviembre 2017), que implementa la clasificación del GHS en el marco

regulatorio nacional. Ambos decretos se sustentan en el Reglamento Técnico RTCR 481:2015, que adopta la sexta edición revisada del GHS y detalla los requisitos de clasificación, etiquetado y fichas de datos de seguridad para productos químicos peligrosos. Esta armonización facilita la comprensión de riesgos y el cumplimiento de obligaciones por parte de generadores, importadores, distribuidores y usuarios finales, incluyendo laboratorios académicos.

La Política Nacional de Seguridad Química, oficializada mediante el Decreto Ejecutivo N° 40148 (enero de 2017), establece un marco estratégico para la gestión integral de sustancias químicas durante todo su ciclo de vida, con el objetivo de minimizar efectos adversos a la salud humana y el ambiente. Esta política define cinco objetivos generales: reducir los riesgos razonables de las sustancias químicas, promover el conocimiento y la información pública, fortalecer la gobernanza mediante un enfoque multisectorial, crear capacidad institucional y técnica, y prevenir el tráfico ilícito internacional de sustancias químicas. El Plan de Acción de la Política, en proceso de consolidación, contempla acciones específicas para laboratorios académicos, incluyendo la capacitación obligatoria de personal, la fiscalización periódica y la promoción de buenas prácticas de laboratorio.

Adicionalmente, el Reglamento para el Manejo de Productos Peligrosos (Decreto Ejecutivo N° 27001-MINAE) y sus reformas, junto con el Decreto Ejecutivo N° 39316-S sobre residuos peligrosos, complementan el marco regulatorio estableciendo requisitos técnicos para almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de residuos peligrosos, incluyendo aquellos generados en laboratorios⁷⁵.

El Ministerio de Salud, en coordinación con el Ministerio de Ambiente y Energía, el Colegio de Químicos de Costa Rica y otras entidades, es responsable de la fiscalización, supervisión y actualización del marco regulatorio, así como de la emisión de permisos de funcionamiento y autorizaciones para gestores de residuos peligrosos.

Este marco regulatorio, aunque avanzado, enfrenta desafíos el momento de su implementación efectiva, especialmente en laboratorios académicos donde la diversidad de

sustancias, la rotación de usuarios y las limitaciones presupuestarias pueden dificultar el cumplimiento integral de las obligaciones normativas.

A pesar de la robustez del marco legal costarricense en materia de seguridad química evidencia por la promulgación de la Ley 8839, la adopción del GHS mediante los decretos ejecutivos N°40457-S y N°40705-S, la Política Nacional de Seguridad Química (Decreto N° 40148-MINAE-S) persiste una brecha significativa entre la sofisticación normativa y su implementación efectiva en laboratorios académicos. Esta desconexión entre el protocolo escrito y la práctica cotidiana constituye uno de los hallazgos más consistentes en la literatura diagnóstica nacional reciente.

Los estudios de Esquivel Garita (2021) sobre el Instituto Tecnológico de Costa Rica revelan que el 22% de los laboratorios analizados presentaban niveles de riesgo alto o crítico, a pesar de contar con manuales de seguridad actualizados y personal formalmente capacitado⁵. De manera similar, León Mora (2021) documentó en la Universidad Nacional deficiencias sistémicas en la gestión de bodegas de reactivos, incluyendo almacenamiento inadecuado de sustancias incompatibles, ausencia de inventarios digitalizados actualizados, y ventilación deficiente en áreas críticas³². Benavides Benavides (2021) complementa este diagnóstico al identificar en la Universidad de Costa Rica prácticas de disposición de residuos que no cumplían estrictamente con los protocolos establecidos por la Regencia Química institucional, particularmente en lo referente a la segregación de residuos orgánicos halogenados y la documentación de cadenas de custodia⁷⁶.

Esta desconexión puede atribuirse a tres factores estructurales interrelacionados:

1. Insuficiencia presupuestaria crónica: Las universidades públicas costarricenses destinan recursos limitados a infraestructura de seguridad química. Aunque no existen datos públicos consolidados sobre inversión específica en seguridad de laboratorios, entrevistas con coordinadores de laboratorios citadas en los estudios mencionados señalan que la adquisición de campanas extractoras nuevas, sistemas de ventilación mecánica y armarios de seguridad certificados compite con otras prioridades

institucionales en contextos de restricción fiscal ⁵. Esta limitación presupuestaria genera una dependencia de infraestructura envejecida y equipos con mantenimiento diferido, incrementando los riesgos operacionales.

2. Alta rotación estudiantil y temporal: El carácter semestral de los cursos de laboratorio implica que cada cuatro meses ingresa una población de estudiantes con experiencia mínima en manejo de sustancias peligrosas. Aunque las universidades implementan inducciones de seguridad, estas suelen ser sesiones únicas de 2-4 horas al inicio del semestre, insuficientes para consolidar competencias prácticas y cultura preventiva sostenida³². Adicionalmente, la contratación de personal técnico mediante contratos interinos (particularmente en UCR y UNA) dificulta la continuidad en la aplicación de protocolos y la transmisión de conocimiento institucional acumulado.

3. Ausencia de fiscalización externa sistemática: A diferencia de laboratorios industriales o clínicos, que enfrentan inspecciones regulares del Ministerio de Salud y del Colegio de Químicos de Costa Rica, los laboratorios académicos universitarios experimentan supervisión esporádica, generalmente asociada a renovaciones de permisos de funcionamiento (cada 3-5 años) o respuesta reactiva ante incidentes graves⁷⁴. Esta baja frecuencia de fiscalización reduce la percepción de urgencia en el cumplimiento y permite que desviaciones menores se normalicen progresivamente hasta convertirse en prácticas sistemáticas inseguras

En contraste, estudios en universidades estadounidenses con marcos regulatorios similares (OSHA 29 CFR 1910.1450) pero con sistemas de auditoría interna robustos y consecuencias administrativas claras ante incumplimientos, reportan tasas de incidentes químicos significativamente menores. Hill y Finster (2016) documentan que instituciones con programas de "Chemical Hygiene Officer" a tiempo completo, auditorías semestrales

obligatorias y presupuestos dedicados para mejora continua, lograron reducir incidentes en un 40-60% durante períodos de cinco años³⁷.

Esta evidencia sugiere que, aunque Costa Rica posee un marco regulatorio alineado con estándares internacionales de primera línea, su efectividad depende críticamente de tres factores: Inversión institucional sostenida en infraestructura y mantenimiento preventivo, capacitación continua y reforzamiento periódico de competencias en seguridad química, y por último la implementación de mecanismos de supervisión, evaluación y rendición de cuentas que trasciendan la mera existencia documental de manuales. La siguiente sección analiza cómo las políticas institucionales universitarias intentan operacionalizar este marco nacional, enfrentando estos mismos desafíos estructurales.

2.5.3 Políticas institucionales universitarias

En materia de seguridad química las políticas institucionales universitarias constituyen el tercer nivel normativo, mediante el cual las universidades públicas y privadas de Costa Rica materializan y contextualizan las obligaciones nacionales e internacionales, adaptándolas a las particularidades de sus estructuras organizativas, recursos disponibles y poblaciones estudiantiles y académicas. Estas políticas definen responsabilidades, procedimientos operativos, protocolos de emergencia y mecanismos de supervisión y mejora continua, promoviendo una cultura institucional de seguridad y sostenibilidad.

La Universidad de Costa Rica (UCR), a través de la Regencia Química Institucional, ha desarrollado el **Manual de Seguridad para Laboratorios de Química**, que establece normas generales de seguridad, responsabilidades diferenciadas para decanos, directores, jefes de laboratorio, docentes y estudiantes, y procedimientos para la gestión de reactivos y residuos químicos. Este manual, que debe revisarse bienalmente, incorpora buenas prácticas de laboratorio, técnicas de seguridad, uso de equipos de protección personal, procedimientos de atención de emergencias, y lineamientos para el almacenamiento y disposición final de residuos. La UCR también ha establecido políticas institucionales para el periodo 2026-2030 que enfatizan la protección de la salud ocupacional, la gestión ambiental y el desarrollo

sostenible, integrando la seguridad química como componente transversal de su qué quehacer académico.

La Universidad Nacional (UNA) ha emitido la **Instrucción UNA-PDRH-DISC.046-2022**, que establece normas generales de salud ocupacional para el trabajo en laboratorios, incluyendo medidas de seguridad, uso de equipos de protección, gestión de residuos y capacitación obligatoria del personal. Esta instrucción se fundamenta en la Política Nacional de Salud Ocupacional y en las directrices del Instituto Nacional de Seguros, y establece mecanismos de supervisión y sanción ante incumplimientos.

El Instituto Tecnológico de Costa Rica ha desarrollado la Guía de Residuos Peligrosos (Guía RQ P- REC), que detalla procedimientos específicos para la identificación, segregación, etiquetado, almacenamiento temporal, recolección y entrega de residuos químicos peligrosos a gestores autorizados, además, el TEC cuenta con un Programa de Gestión de Seguridad Laboral que garantiza el cumplimiento de políticas y normas de seguridad referentes a la contratación de personas y empresas, y la ejecución de actividades en ambientes de riesgo.

Estas políticas institucionales comparten características comunes: establecen responsabilidades jerárquicas claras (desde las autoridades superiores hasta los usuarios directos de los laboratorios), promueven la capacitación continua y obligatoria, exige la elaboración de planes de higiene química y planes de gestión de residuos, y contemplan mecanismos de evaluación, monitoreo y mejora continua. Además, reconocen la necesidad de articular la normativa interna con los marcos regulatorios nacionales e internacionales, facilitando auditorías externas y la obtención de permisos de funcionamiento ante el Colegio de Químicos de Costa Rica y el Ministerio de Salud.

Un desafío persistente en la implementación de estas políticas es la heterogeneidad en los niveles de cumplimiento entre distintas instituciones académicas, la rotación constante de estudiantes y personal temporal, y la necesidad de asegurar recursos financieros y técnicos la bastante suficiente para logara mantener infraestructuras seguras, equipos actualizados y programas de capacitación efectivos. La evaluación periódica de riesgos, la documentación

de incidentes y cuasi accidentes, y la difusión de lecciones aprendidas son practicas esenciales para fortalecer la cultura de seguridad institucional.

La convergencia de normativas internacionales, marcos regulatorios nacionales y políticos institucionales universitarias establece un sistema integral de gestión de la seguridad química en laboratorios académicos costarricenses. Sin embargo, la efectividad de este sistema depende críticamente de la capacidad institucional, el compromiso de las autoridades, la formación continua del personal y la disponibilidad de recursos. La investigación y la documentación sistemática de experiencias locales, como la presente tesis, contribuye a identificar brechas, fortalecer el cumplimiento normativo y promover la mejora continua en la gestión de la seguridad química en el contexto académico.

En este sentido, resulta imprescindible comprender como se operacionalizan estos marcos regulatorios dentro de las universidades costarricenses mediante la implementación de sistemas de gestión específicos, orientados a garantizar el cumplimiento o normativo, la trazabilidad de los procesos y la creación de una cultura de seguridad sostenida. La siguiente sección aborda las características, estructura y componentes de dichos sistemas, así como su papel en la consolidación de prácticas seguras y sostenibles dentro de laboratorios académicos.

La existencia de manuales institucionales formalmente aprobados y actualizados en las tres principales universidades públicas costarricenses (UCR, UNA, ITCR) representa un avance significativo en la consolidación del marco regulatorio nacional. Sin embargo, la literatura diagnóstica evidencia que la posesión de un manual no garantiza automáticamente el cumplimiento efectivo ni la seguridad real en la práctica cotidiana de los laboratorios académicos¹¹.

Los estudios de Esquivel Garita (2021), León Mora (2021) y Benavides Benavides (2021) revelan variabilidad significativa en el cumplimiento de protocolos (incluso dentro de una misma institución). Por ejemplo, en el ITCR, mientras algunos laboratorios de ingeniería química mostraban cumplimiento del 95% en indicadores de seguridad (almacenamiento adecuado, señalización, disponibilidad de EPP, registros actualizados), otros laboratorios de

ciencias básicas compartidas por múltiples carreras presentaban deficiencias críticas en hasta el 40% de los ítems evaluados. Esta heterogeneidad sugiere que el factor determinante no es la existencia de la política institucional, sino la capacidad de gestión local, el liderazgo del coordinador de laboratorio y la disponibilidad de recursos asignados específicamente a cada unidad.

Factores que explican la brecha de implementación:

1. Multiplicidad de usuarios y dilución de responsabilidad: Los laboratorios docentes universitarios atienden simultáneamente a estudiantes de pregrado (con conocimientos mínimos), estudiantes de posgrado, docentes investigadores, tesis y personal técnico. Esta diversidad de usuarios con diferentes niveles de formación, motivación y supervisión dificulta la aplicación uniforme de protocolos. Adicionalmente, cuando un mismo espacio físico es utilizado por múltiples cursos y proyectos, la responsabilidad por el mantenimiento del orden, limpieza y cumplimiento de normas tiende a diluirse, generando el fenómeno conocido como "tragedia de los comunes" en gestión de laboratorios⁵⁹.

2. Insuficiencia de personal técnico especializado: Los estudiantes/técnicos de laboratorio en universidades costarricenses es significativamente mayor que en instituciones internacionales comparables. Mientras que universidades estadounidenses con programas robustos de seguridad mantienen aproximadamente 1 técnico especializado por cada 50-80 estudiantes de laboratorio, en Costa Rica esta proporción puede superar 1:200 en algunos periodos de alta demanda ¹⁰. Esta sobrecarga limita la capacidad de supervisión directa, verificación de cumplimiento de protocolos y respuesta inmediata ante desviaciones.

3. Cultura reactiva vs. cultura preventiva: A pesar de los esfuerzos institucionales por promover cultura de seguridad, persiste en muchos laboratorios una mentalidad predominantemente reactiva (donde las medidas correctivas se implementan principalmente después de incidentes) en lugar de una cultura preventiva proactiva. Esta diferencia es crítica: mientras la cultura reactiva depende del miedo a sanciones o accidentes, la cultura preventiva se fundamenta en la internalización de valores de seguridad como componentes intrínsecos de la excelencia científica.

Universidades que han logrado cerrar la brecha entre política escrita y práctica efectiva comparten características comunes como: designación de "Chemical Hygiene Officers" con dedicación exclusiva y autoridad transversal; sistemas digitales integrados de gestión de inventarios y residuos con trazabilidad en tiempo real; programas de reconocimiento y consecuencias vinculados al cumplimiento de indicadores de seguridad; y presupuestos protegidos para mantenimiento preventivo y mejora continua de infraestructura de seguridad.⁷ Estas prácticas podrían adaptarse al contexto costarricense, considerando las limitaciones presupuestarias pero aprovechando fortalezas locales como el alto nivel de formación del personal académico y la creciente adopción de tecnologías digitales de bajo costo.

En síntesis, aunque las políticas institucionales universitarias costarricenses están formalmente alineadas con estándares internacionales y el marco regulatorio nacional, su efectividad en la práctica depende críticamente de factores de implementación que trascienden la mera existencia documental: liderazgo local comprometido, recursos humanos y técnicos suficientes, sistemas de supervisión y rendición de cuentas funcionales, y consolidación genuina de una cultura de seguridad preventiva. La siguiente sección analiza las estrategias operativas y elementos de cultura organizacional que determinan este tránsito desde el cumplimiento formal hacia la seguridad real y sostenida.

2.6 Estrategias de seguridad y cultura preventiva

El desarrollo de estrategias de seguridad en laboratorios académicos constituye uno de los pilares de la gestión integral de la seguridad química. Estas estrategias no solo buscan reducir la probabilidad de accidentes, sino también instaurar una cultura preventiva, donde la seguridad se asuma como parte intrínseca del quehacer científico y no como un requisito externo o burocrático. La unión entre infraestructura adecuada, protocolos estandarizados y formación continua genera entornos de trabajo más seguros, donde el comportamiento individual se alinea con las políticas institucionales y normativas nacionales e internacionales.

2.6.1 Condiciones mínimas de seguridad en laboratorios

Las condiciones mínimas de seguridad en un laboratorio académico deben garantizar la protección del personal contra los riesgos físicos, químicos y biológicos inherentes a las actividades experimentales. Según las directrices del Manual de Seguridad para Laboratorios de la Universidad de Costa Rica (Manual UCR, 2021) y la Institución UNA-PDRH-DISC-046-2022 de la Universidad Nacional, los laboratorios deben contar con infraestructura ventilada, equipos de protección personal adecuados, sistemas de emergencia funcionales y protocolos claros de actuación ^{33,81}. Estas exigencias se alinean con la norma 29 CFR 1910.1450 de la OSHA, que establece los requisitos mínimos para el desarrollo de un plan de higiene química y la gestión del riesgo en laboratorios ¹⁹.

Entre las condiciones esenciales se incluyen: capillas de extracción de gases en buen estado, instalaciones eléctricas seguras, duchas y lavaojos ubicados estratégicamente, señalización visible de riesgos, extintores accesibles y revisados periódicamente, y espacios de almacenamiento segregados para sustancias incompatibles. Además, el ambiente de trabajo debe mantenerse limpio, ordenado, y libre de materiales innecesarios, promoviendo la eficiencia operativa y la disminución de incidentes ¹⁴. Las universidades costarricenses han avanzado significativamente en la implementación de estas medidas, pero aún enfrentan deficiencias relacionadas con el mantenimiento preventivo y la capacitación sistemática del personal técnico y docente.

La comparación de los requisitos mínimos de seguridad en laboratorios académicos es fundamental para comprender el grado de alineación entre las normativas internacionales, nacionales e institucionales. Analizar estos estándares permite identificar fortalezas y áreas de oportunidad en la gestión de riesgos, así como evidenciar el compromiso de las instituciones costarricenses con la protección de la salud y el ambiente ^{33,81}. La siguiente tabla sintetiza las principales exigencias técnicas establecidas por la OSHA, la legislación costarricense y los manuales universitarios, facilitando una visión integral y crítica del marco normativo vigente.

Tabla 5. Condiciones mínimas de seguridad en laboratorios según normativas nacionales e internacionales

Condición de seguridad	OSHA (29 CFR 1910.1450)	Ley 8839 (Costa Rica) / Reglamento RTCR 481:2015	Manual UCR / Instrucción UNA
Infraestructura ventilada (capillas, HVAC)	Obligatorio uso de sistemas de extracción	Requiere instalación y mantenimiento de ventilación	Capillas de extracción disponibles y operativas
Equipos de protección personal (EPP)	Uso obligatorio y entrenamiento en uso	Provisión y supervisión del cumplimiento de EPP	Uso obligatorio con capacitación continua
Señalización y etiquetado de riesgos	Etiquetas conforme a GHS y comunicación clara	Etiquetado conforme a GHS, señalización en áreas	Señales visibles y actualizadas de riesgos químicos
Duchas y lavaojos de emergencia	Acceso inmediato y funcionalidad comprobada	Equipos disponibles y accesibles según normatividad	Ubicación estratégica con mantenimiento regular
Gestión de residuos peligrosos	Plan para segregación, almacenamiento y eliminación	Regulación estricta en manejo y disposición final de residuos	Procedimientos documentados y seguimiento
Protocolos de emergencia y primeros auxilios	Procedimientos escritos y entrenamiento	Desarrollo de planes de respuesta y capacitación	Protocolos claros y simulacros periódicos
Capacitación y formación continua	Programa de capacitación obligatorio	Capacitación regular para generadores y personal	Programas institucionales de formación obligatoria

Registro trazabilidad	y	Documentación detallada y registros actualizados	Registro obligatorio de generación y disposición	Bitácoras y sistemas digitales de gestión (e.g., SIGELI)
-----------------------	---	--	--	--

Fuente: Elaboración propia con base a las referencias ^{33,43,74,81}

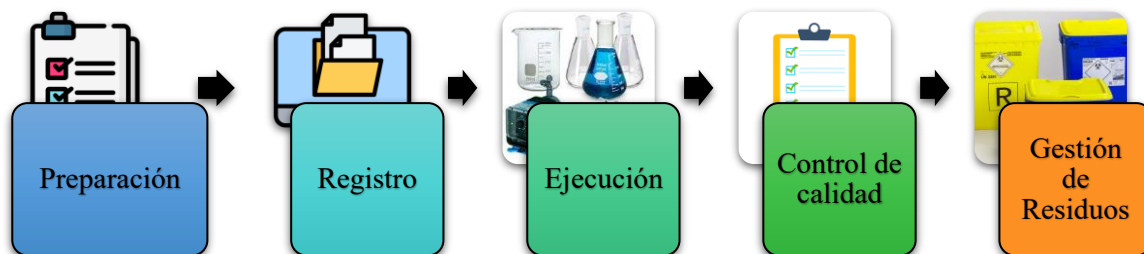
2.6.2 Buenas prácticas de laboratorio (BPL)

Las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) representan un conjunto de principios y procedimientos operativos diseñados para asegurar la calidad, integridad y confiabilidad de los ensayos experimentales. Originalmente impulsadas por OCDE, las BPL buscan estandarizar procesos, garantizar la trazabilidad de los datos y minimizar los riesgos asociados al manejo de sustancias peligrosas. En el contexto académico costarricense, su adopción se refleja en las políticas del Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC) y la Universidad de Costa Rica (UCR), que exigen la aplicación sistemática de higiene, orden y control documental en las actividades de laboratorio ^{37,47}.

Las BPL establecen que los laboratorios deben contar con personal capacitado, funciones claramente definidas, infraestructura adecuada y un programa de aseguramiento de calidad. Elementos como el uso de bitácoras experimentales, la calibración de instrumentos, el mantenimiento de registros electrónicos y el control ambiental son componentes esenciales⁷⁰. Además, los laboratorios deben demostrar responsabilidad ambiental mediante sistemas de manejo de residuos y prevención de contaminación, lo que conecta directamente la seguridad química con la sostenibilidad institucional ⁴⁰.

La secuencia operativa de las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) puede resultar compleja para quienes se inician en el trabajo experimental. Por ello, la representación gráfica mediante un diagrama de flujo permite visualizar de manera clara y ordenada cada etapa del proceso, desde la preparación inicial hasta la disposición final de residuos, integrando elementos de control y aseguramiento de calidad que exige la normativa vigente ^{84,85}.

Figura 2. Proceso secuencial de Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) en laboratorios académicos



Fuente: Elaboración propia con base en las referencias ^{68,74,86,87}.

El diagrama de flujo presentado en la Figura 4 sintetiza el proceso secuencial de las Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL) en cinco etapas interdependientes, donde el éxito de cada fase determina la seguridad y calidad de las subsiguientes. La primera etapa, "Preparación", implica la revisión exhaustiva de protocolos de seguridad, la verificación de la disponibilidad y estado de materiales y reactivos, y la comprobación de condiciones ambientales críticas (funcionamiento de campanas extractoras, acceso a duchas y lavaojos de emergencia, disponibilidad de EPP certificado). Esta fase preventiva reduce significativamente la probabilidad de improvisaciones riesgosas durante la experimentación

La fase de "Registro" garantiza la trazabilidad completa mediante la documentación sistemática de lotes y caducidades de reactivos, identificación y calibración de equipos, planificación experimental detallada con análisis de riesgos, y mantenimiento actualizado de bitácoras de laboratorio conforme a estándares OECD. La etapa de "Ejecución" materializa el trabajo experimental bajo condiciones estrictamente controladas, asegurando el uso correcto y permanente de EPP apropiado, el cumplimiento de protocolos de manejo de sustancias según el GHS, y la supervisión continua, particularmente crítica para estudiantes en formación.

Las fases de "Control de Calidad" y "Gestión de Residuos" cierran el ciclo de manera integral. El control de calidad implementa mecanismos de verificación sistemática de resultados mediante repeticiones y controles, calibración periódica de instrumentos con estándares certificados, y documentación rigurosa que garantice la confiabilidad de los datos obtenidos. Finalmente, la gestión de residuos asegura la identificación precisa, segregación inmediata por compatibilidad química, etiquetado conforme a normativa nacional (Ley 8839, RTCR 481:2015), y disposición final documentada mediante gestores autorizados, completando así el ciclo de vida seguro de las sustancias químicas en el laboratorio académico.

Un componente operativo esencial para la implementación efectiva de las Buenas Prácticas de Laboratorio es el conocimiento profundo y aplicación sistemática de los Consejos de Prudencia o Frases P del Sistema Globalmente Armonizado (GHS). Estos códigos alfanuméricos estandarizados proporcionan instrucciones específicas, claras y universalmente comprensibles sobre cuatro áreas críticas: prevención de exposiciones (códigos P2xx), respuesta inmediata ante emergencias químicas (códigos P3xx), almacenamiento seguro que previene reacciones peligrosas (códigos P4xx), y eliminación responsable de residuos (códigos P5xx). Su integración en los protocolos institucionales no solo cumple con los requisitos normativos del RTCR 481:2015, sino que fortalece la cultura de seguridad al proporcionar guías de acción inmediata accesibles en situaciones de estrés o emergencia. La Tabla 6 presenta una selección de algunos consejos de prudencia más relevantes para el contexto de laboratorios académicos costarricenses, organizados por tipo de acción requerida y con aplicaciones específicas documentadas en la literatura de seguridad química educativa aplicables al contexto universitario, organizados por tipo de acción requerida.

Tabla 6. Principales consejos de prudencia (Frases P) del GHS aplicables a laboratorio académicos

Tipo de acción	Código	Consejo de prudencia
----------------	--------	----------------------

Prevención	P210	Mantener alejado del calor, superficies calientes, chispas, llamas abiertas y otras fuentes de ignición. No fumar
	P261	Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol
	P264	Lavarse las manos concienzudamente tras la manipulación
	P270	No comer, beber ni fumar durante su utilización
	P280	Llevar guantes /prendas /gafas /máscara de protección
Respuesta ante emergencias	P301+P310	EN CASO DE INGESTIÓN: Llamar inmediatamente a un CENTRO DE INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA/médico
	P302+P352	EN CASO DE CONTACTO CON LA PIEL: Lavar con agua y jabón abundantes
	P304+P340	EN CASO DE INHALACIÓN: Transportar a la persona al aire libre y mantenerla en una posición que le facilite la respiración
	P305+P351+P338	EN CASO DE CONTACTO CON LOS OJOS: Aclarar cuidadosamente con agua durante varios minutos. Quitar las lentes de contacto, si lleva y resulta fácil. Seguir aclarando
	P308+P313	EN CASO DE exposición manifiesta o presunta: Consultar a un médico
Almacenamiento	P403+P233	Almacenar en un lugar bien ventilado. Mantener el recipiente cerrado herméticamente
	P405	Guardar bajo llave
	P410+P412	Proteger de la luz del sol. No exponer a temperaturas superiores a 50°C
Eliminación	P501	Eliminar el contenido/el recipiente conforme a la reglamentación local/regional/nacional/internacional.

Fuente: Elaboración propia con base en la referencia ⁴⁷

Esta tabla presenta una selección de los consejos de prudencia más relevantes para el contexto de laboratorios académicos costarricenses. El sistema GHS contiene más de 100 códigos P organizados en cinco categorías: 1xx (general), 2xx (prevención), 3xx (respuesta), 4xx (almacenamiento), 5xx (eliminación). Los códigos combinados (ejemplo: P305+P351+P338) indican acciones secuenciales que deben realizarse en conjunto para garantizar una respuesta efectiva ante emergencias⁶⁷.

La implementación de estos consejos de prudencia en los protocolos institucionales de laboratorios académicos no solo cumple con los requisitos normativos del RTCR 481:2015, sino que fortalece la cultura de seguridad al proporcionar instrucciones claras, estandarizadas y universalmente comprensibles. La capacitación continua del personal docente, técnico y estudiantil en el reconocimiento y aplicación de estas frases P es fundamental para la prevención de incidentes y la respuesta eficaz ante situaciones de emergencia⁷⁹.

La importancia de estos de prudencia en los protocolos institucionales de laboratorios académicos no solo cumple con los requisitos normativos del RTCR 481:2015, sino que fortalece la cultura de seguridad al proporcionar instrucciones claras, estandarizadas y universalmente comprensibles. La capacitación continua del personal docente, técnico y estudiantil en el reconocimiento y aplicación de estas frases es fundamental para la prevención de incidentes y la respuesta eficaz ante situaciones de emergencia.

Si bien el Sistema Globalmente Armonizado contempla más de 100 consejos de prudencia específicos para diferentes categorías de peligro y contextos de uso, la tabla 6 presenta aquellos de mayor aplicabilidad y frecuencia en entornos académicos, proporcionando una base práctica para la capacitación y el desarrollo de protocolos institucionales. La selección de estos códigos responde a la necesidad de priorizar la prevención activa, el manejo adecuado de emergencias y la correcta eliminación de residuos peligrosos, considerando las tareas más habituales y los riesgos inherentes al trabajo experimental universitario. De esta manera, se favorece la consolidación de una

responsabilizada compartida y una cultura preventiva, elementos indispensables para la gestión integral de la seguridad química en laboratorios académicos.

“Control de calidad” se refiere a la verificación sistemática de los resultados experimentales, la calibración de instrumentos y la validación de procesos, asegurando la confiabilidad de los datos obtenidos. Finalmente, en la “Gestión de Residuos”, se identifican, segregan y disponen los desechos conforme a la normativa vigente, documentado el destino final de los residuos peligrosos generados. Cada fase del procedimiento, reflejada en el diagrama, responde a criterios internacionales y nacionales, y su correcta implementación es clave para garantizar la integridad académica, la seguridad física y la responsabilidad ambiental en los laboratorios.

2.6.3 Cultura de seguridad y educación preventiva

La literatura especializada responde directamente a la “brecha de implementación” (planteada en 2.5.3) a través del concepto de cultura de seguridad. Si las normas y manuales (Sección 2.5) fuesen suficientes por sí solos, los diagnósticos de riesgo no seguirán detectando fallos sistémicos. La evidencia moderna, liderada por instituciones como la American Chemical Society (ACS), argumenta que la seguridad no es un estado pasivo (tener un protocolo), sino un conjunto de valores, actitudes y comportamientos compartidos que determinan el compromiso real de una organización con la seguridad y la salud. Es esta cultura la que cierra la brecha entre el protocolo escrito y la práctica diaria.

En el entorno académico, esta cultura es particularmente crítica debido a la alta rotación de estudiantes y la heterogeneidad en la formación. La literatura reciente sugiere ir más allá del simple “cumplimiento” y avanzar hacia una “ingeniería de resiliencia”; es decir, la capacidad de un laboratorio para gestionar proactivamente los riesgos y aprender de los fallos de forma constructiva. Esto implica que el liderazgo de los docentes, la comunicación abierta de riesgos y el aprendizaje sistemático a partir de incidentes y cuasi-accidentes son los componentes fundamentales que transforman un laboratorio de mero “cumplimiento” en un laboratorio verdaderamente “seguro”.

2.6.4 Evidencia empírica sobre efectividad de programas de cultura de seguridad

La transición de una gestión de seguridad basada meramente en cumplimiento normativo hacia una cultura organizacional preventiva genuina no ocurre de manera espontánea ni depende exclusivamente de la emisión de manuales o la realización de inducciones formales. La literatura internacional reciente proporciona evidencia empírica sobre los elementos específicos que determinan la efectividad de programas de cultura de seguridad en laboratorios académicos.

Un estudio longitudinal de cinco años conducido por Yang et al. (2022) en 42 laboratorios universitarios chinos implementó un modelo de gestión basado en ingeniería de resiliencia es decir, la capacidad de un sistema para anticipar, absorber, adaptarse y aprender de perturbaciones, y documentó una reducción del 63% en incidentes reportados y un 78% en "near-miss events" (cuasi-accidentes).¹ Los componentes clave del programa incluían: sistemas de reporte voluntario sin penalización que incentivaban la comunicación abierta de errores y situaciones de riesgo, reuniones mensuales de análisis de incidentes con participación de estudiantes, técnicos y docentes, enfocadas en aprendizaje colectivo en lugar de búsqueda de culpables, liderazgo docente visible y activo en el modelaje de comportamientos seguros; y reconocimiento institucional formal a laboratorios con mejores indicadores de seguridad.

De manera complementaria, Hastings et al. (2021) implementaron en laboratorios de la Universidad de California-Irvine un sistema de "Learning Reports" (reportes breves y anónimos de incidentes menores o situaciones de riesgo detectadas) que eran compartidos semanalmente con toda la comunidad de laboratorio acompañados de lecciones aprendidas y acciones correctivas.² Durante un período de tres años, observaron no solo una disminución del 47% en accidentes reportables, sino también un cambio cultural medible: las encuestas anuales de percepción de seguridad mostraron incrementos significativos en indicadores como "me siento cómodo reportando errores sin temor a consecuencias negativas" (aumento de 42% a 79%) y "considero la seguridad una responsabilidad compartida, no solo del técnico" (de 38% a 81%).

Sin embargo, la literatura también documenta barreras culturales persistentes que obstaculizan la consolidación de cultura preventiva, particularmente en entornos académicos:

1. Presión por productividad sobre seguridad: En contextos donde estudiantes de posgrado y tesisistas enfrentan presiones intensas por publicar resultados y cumplir plazos, frecuentemente se desarrolla una percepción implícita de que los protocolos de seguridad "retrasan" el trabajo experimental. Wood-Black (2014) documenta que esta tensión entre velocidad y seguridad es una de las causas principales de atajos y desviaciones de protocolos, especialmente en experimentos nocturnos o de fin de semana con supervisión reducida.

2. Normalización de desviaciones: Cuando pequeñas infracciones de seguridad como omitir el uso de gafas protectoras para "procedimientos rápidos", almacenar temporalmente residuos incompatibles juntos, o trabajar sin compañía ocurren repetidamente sin consecuencias negativas, se genera un fenómeno de normalización de la desviación: comportamientos inicialmente reconocidos como riesgosos son progresivamente percibidos como aceptables.⁴ Esta normalización erosiona gradualmente la cultura de seguridad hasta que un incidente grave expone la fragilidad del sistema.

3. Asimetría entre conocimiento declarativo y competencia operativa: Estudios de evaluación de programas de capacitación revelan una brecha frecuente entre lo que los estudiantes pueden explicar verbalmente sobre seguridad (conocimiento declarativo) y lo que efectivamente hacen en situaciones experimentales reales (competencia operativa). Cárdenas Rodríguez (2021) encontró que estudiantes colombianos de química podían identificar correctamente en exámenes escritos el 87% de procedimientos seguros, pero en observaciones directas de laboratorio solo aplicaban consistentemente el 54% de esos mismos procedimientos.

Esta evidencia internacional sugiere que el fortalecimiento de la cultura de seguridad en laboratorios académicos costarricenses requiere intervenciones que trasciendan la capacitación teórica y la emisión de normativas. Estrategias prometedoras incluirían: implementación de sistemas de reporte anónimo y aprendizaje colectivo adaptados a la realidad institucional, reconocimiento explícito del liderazgo docente en seguridad como

criterio de evaluación de desempeño académico, diseño de experimentos didácticos que integren la seguridad como componente de aprendizaje, no como obstáculo y por último investigación local sobre barreras culturales específicas del contexto costarricense que puedan diferir de realidades estadounidenses o asiáticas documentadas en la literatura.

La integración de estos hallazgos con el análisis conceptual previo sobre normativas, reactivos, riesgos y residuos permite construir una visión comprensiva de la gestión de seguridad química como sistema multidimensional, según se sintetiza en la siguiente sección de cierre del marco teórico.

2.7 Síntesis conceptual y vacíos teóricos

2.7.1 Integración de hallazgos conceptuales

El análisis conceptual desarrollado a lo largo de este marco teórico evidencia que la gestión de la seguridad química en laboratorios académicos constituye un sistema multidimensional e interconectado, donde cada componente influye directamente en la efectividad de los demás. La seguridad química no puede entenderse como un elemento aislado o meramente procedimental, sino como una cultura integral que abarca desde la adquisición y almacenamiento de reactivos hasta la disposición final de residuos, pasando por la capacitación continua, el cumplimiento normativo y la promoción de valores preventivos compartidos por toda la comunidad académica.

Los reactivos químicos, como se describió en la sección 2.2, representan la materia prima fundamental del trabajo experimental en ciencias de la salud y otras disciplinas científicas. Su correcta caracterización, manejo y control de inventarios constituyen el primer eslabón en la cadena de prevención de intoxicaciones. Cuando esta gestión falla por almacenamiento inadecuado, ausencia de fichas de datos de seguridad (FDS) actualizadas o mezcla accidental de sustancias incompatibles, se incrementan exponencialmente los riesgos de exposición tóxica documentados en la sección 2.3, donde se estableció que la inhalación de vapores y el contacto dérmico son las vías más frecuentes de intoxicación en entornos académicos.

A su vez, los riesgos de intoxicación no pueden mitigarse sin una gestión responsable de los residuos químicos generados (sección 2.4). La clasificación correcta según criterios de peligrosidad, la segregación estricta por compatibilidad química y la implementación de métodos seguros de neutralización y disposición no solo protegen la salud de los usuarios del laboratorio, sino que también previenen la contaminación ambiental y el incumplimiento de normativas legales que pueden derivar en sanciones institucionales.

El marco regulatorio internacional, nacional e institucional analizando en la sección 2.5 proporciona los estándares mínimos que deben cumplirse, pero como se evidenció, la existencia de normativas robustas no garantiza por sí sola su implementación efectiva. Aquí en donde cobran relevancia las estrategias de seguridad y cultura preventiva (sección 2.6), que transforman el cumplimiento pasivo de protocolos en un compromiso activo y colectivo con la seguridad. La formación continua, el liderazgo docente, la comunicación abierta de riesgos y el aprendizaje sistemático a partir de incidentes son los mecanismos que cierran la brecha entre la teoría normativa y la práctica cotidiana.

2.7.2 Brechas identificadas en el contexto académico costarricense

A pesar de los avances normativos y la existencia de manuales y la existencia de manuales institucionales en las principales universidades costarricenses (UCR, UNA, ITCR), persisten brechas significativas entre el marco legal y su aplicación práctica. Los estudios diagnósticos nacionales revisados en las secciones 1.5.3 y 2.5.3 revelan hallazgos preocupantes: el 22% de los laboratorios del ITCR presentaban niveles de riesgo alto a pesar de contar con documentación actualizada, evidenciando que la disponibilidad de protocolos no se traduce automáticamente en cumplimiento efectivo.

Las causas de esta desconexión son multifactoriales. En primer lugar, existe una insuficiencia presupuestaria crónica que limita la inversión en infraestructura crítica como sistemas de ventilación, campanas extractoras funcionales, armarios de seguridad certificados y equipos de protección personal de calidad. En segundo lugar, la alta rotación estudiantil (semestral en la mayoría de carreras) dificulta la consolidación de una cultura

preventiva sostenida, requiriendo procesos de inducción y capacitación continuos que no siempre se implementan con la rigurosidad necesaria. En tercer lugar, la ausencia de mecanismos robustos de fiscalización y seguimiento, por parte de autoridades de salud ocupacional y ambiental permite que prácticas inseguras persistan sin consecuencias, erosionando la percepción de importancia de las normas ⁷.

Adicionalmente, se identificó una brecha crítica en la disponibilidad de datos epidemiológicos locales sobre incidentes químicos en laboratorios académicos costarricenses. A diferencia de países como Estados Unidos, Corea del Sur o Canadá, donde existen sistemas nacionales de reporte y análisis estadístico de accidentes en laboratorios educativos, Costa Rica carece de registros centralizados que permitan dimensionar con precisión la magnitud del problema, identificar patrones recurrentes y priorizar intervenciones basadas en evidencia.

2.7.3 Implicaciones para la gestión de seguridad química en laboratorios educativos

La síntesis de este marco teórico permite establecer que una gestión efectiva de la seguridad química en laboratorios académicos debe fundamentarse en cinco pilares interdependientes:

1. Gestión técnica integral de reactivos y residuos: Implementación de sistemas digitales de inventario, almacenamiento por compatibilidad química, control de caducidades y disposición responsable de residuos peligrosos.
2. Cumplimiento normativo armonizado: Alineación con estándares internacionales (GHS, OSHA, OMS) adaptados a la realidad nacional y complementos con políticas institucionales claras y vinculantes.
3. Infraestructura y recursos adecuados: Inversión sostenida en ventilación, equipos de emergencia, EPP certificado y espacios diseñados bajo principios de ingeniería de seguridad.
4. Capacitación continua y evaluación de competencias: Programas obligatorios de formación en seguridad química para estudiantes, docentes y personal técnico, con evaluaciones periódicas de conocimientos y prácticas.

5. Cultura organizacional de seguridad: Liderazgo institucional comprometido, comunicación abierta de riesgos, reporte sin penalización de incidentes, aprendizaje sistemático y mejora continua.

La presente investigación bibliográfica surge precisamente de la necesidad de integrar evidencia científica internacional actualizada sobre estos cinco pilares, contextualizándola a la realidad de las institucionales de educación superior costarricenses. Los capítulos subsiguientes detallarán la metodología empleada para sistematizar esta evidencia y los hallazgos específicos que permitirán formular recomendaciones aplicables al contexto local, contribuyendo así a cerrar las brechas identificadas y a fortalecer la seguridad química como componente esencial de la formación científica de calidad.

CAPÍTULO III- MARCO METODOLÓGICO

El marco metodológico constituye una parte fundamental en la investigación científica, ya que proporciona la estructura necesaria para realizar un estudio de manera sistemática y rigurosa. Es el centro de un trabajo investigativo, donde se delimita el camino que se recorrerá para lograr los objetivos planteados. Este capítulo funciona como guía para la persona investigadora y al mismo tiempo ofrece transparencia y credibilidad al lector, al plantear completamente el cómo se va a abordar el problema de estudio

En este capítulo, se presenta el marco metodológico de la presente investigación, el cual se define como el conjunto de acciones destinadas a describir y analizar el fondo del problema planteado, por medio de procedimientos específicos que incluyen las técnicas de observación y recolección de datos, para así determinar el “como” se realizara el presente estudio. Asimismo, se hace operativa la definición de los conceptos y elementos relacionados con el problema en estudio.³⁶

A continuación, se desarrollará una descripción de la investigación, integrando algunas características sobre la metodología a utilizar, por ejemplo: método, fuentes de información utilizadas, criterios de búsqueda y categorías de análisis, cada uno de estos aportan a la validez y la precisión de los resultados. Además, resulta relevante considerar las limitaciones metodológicas, pues no solo definen el alcance del estudio, sino que también aportan rigor al reconocer factores externos que podrían incidir en el desarrollo de la investigación.

3.1 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico representa el pilar fundamental que guía la selección de estrategias, técnicas y procedimientos empleados a lo largo del proceso investigativo. Este enfoque no solo determina cómo se estructura el trabajo, sino también cómo se interpretan, organizan y analizan los datos para dar respuesta a los objetivos planteados. En el contexto de esta tesis, el enfoque adoptado permite abordar de manera sistemática la revisión, comparación e interpretación de información relevante sobre los riesgos de intoxicación química y las prácticas asociadas al manejo y disposición de sustancias químicas en laboratorios académicos.

La elección de un enfoque adecuado garantiza la coherencia interna del estudio, ya que asegura que las decisiones metodológicas estén en sintonía con el planteamiento del problema, los objetivos y la naturaleza de la información disponible. En este caso, se opta por un enfoque de tipo cualitativo y documental, el cual se caracteriza por privilegiar el análisis interpretativo de textos provenientes de fuentes secundarios, como artículos científicos, normativas técnicas, informes institucionales y otros documentos académicos. Esta modalidad de investigación resulta particularmente adecuada cuando el propósito es explorar, describir y comprender algunos fenómenos complejos a través de la revisión de la literatura existente.

Dentro de esta lógica metodológica, cobra especial importancia la definición del tipo de investigación, ya que esta decisión orienta el proceso de búsqueda, selección y análisis de las fuentes documentales. Las investigaciones pueden desarrollarse desde distintos enfoques: cuantitativos, centrados en la medición numérica; cualitativos, enfocados en la interpretación de fenómenos sociales o técnicos; o bien mixtos, que combinan ambos. En el caso de este trabajo, la naturaleza del problema y los objetivos formulados justifican plenamente la elección de una metodología cualitativa, de carácter documental y descriptivo, que permita integrar y analizar críticamente la información disponible en la literatura científica y técnica,

con el fin de generar una visión comparativa y propositiva sobre la seguridad química en laboratorios educativos.

Este enfoque metodológico no solo permite describir los riesgos asociados al manejo de sustancias químicas, si no también identificar patrones, vacíos, coincidencias y propuestas relevantes que podrían ser aplicables en contextos académicos similares. Además, garantiza que los resultados obtenidos sean comprensibles, reproducibles y útiles para generar conocimiento en el área de la gestión de la seguridad química.

3.2. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo documental, cualitativa, descriptiva y comparativa. Se considera documental porque se sustenta en el análisis e interpretación de fuentes secundarias relevantes, como artículos científicos, tesis académicas, informes técnicos y normativas institucionales. Es cualitativa debido a que no se centra en la recolección ni en el tratamiento de datos cuantitativos, sino en el análisis de contenido, interpretación de conceptos clave y sistematización de buenos prácticos en la gestión de sustancias químicas.

Además, la investigación es descriptiva, ya que busca identificar y caracterizar los principales riesgos de intoxicación química, las prácticas institucionales para el manejo de reactivos y residuos, y las recomendaciones emitidas por la literatura científica y técnica. También se le considera comparativa, pues se examinan diferentes enfoques, marcos normativos y experiencias documentadas en distintos países e instituciones académicas, con el fin de establecer similitudes, diferencias y oportunidades de mejora en el contexto de laboratorios universitarios.

3.3. Fuentes de información

3.3.1. Fuentes primarias

Las fuentes primarias utilizadas en esta investigación corresponden a documentos que contienen información directa, original y sin interpretación previa por terceros. Estas fuentes son el resultado de estudios, normativas o experiencias prácticas generadas por personas involucradas en la gestión de la seguridad química en laboratorios, y representan el insumo más valioso para el análisis de riesgos, procedimientos y estrategias en contextos académicos.

En estas tesis, se consideran como fuentes primarias:

- Artículos científicos originales: Proporcionan datos actualizados y análisis empíricos sobre la ocurrencia de accidentes químicos, el manejo de sustancias peligrosas y la implementación de protocolos de seguridad en laboratorios universitarios. Estos trabajos permiten observar casos reales, estadísticas, y prácticas institucionales documentadas en diversas regiones.
- Normativas y reglamentos oficiales: Emitidas por organismos nacionales e internacionales, estas disposiciones ofrecen marcos legales y técnicos sobre el uso, almacenamiento y disposición de sustancias químicas en ambientes educativos. Su análisis permite comprender las obligaciones y lineamientos que orientan la seguridad en los laboratorios académicos.
- Tesis académicas: Constituyen investigaciones de grado o postgrado que abordan directamente temáticas relacionadas con la gestión de reactivos, riesgos químicos, accidentes en laboratorios, manejo de residuos peligrosos o diseño de protocolos. Estas fuentes brindan enfoques contextualizados, metodologías aplicadas y propuestas prácticas relevantes para el tema.
- Manuales institucionales y guías técnicas: Emitidos por universidades o entidades técnicas, ofrecen pautas específicas sobre la organización del trabajo en los laboratorios, los procedimientos para la manipulación segura de sustancias químicas, el uso de equipo de protección personal (EPP) y la disposición adecuada de residuos.
- Reportes técnicos y memorias de eventos: Documentos generados por congresos, comisiones de seguridad, o unidades académicas que abordaban

experiencias institucionales en materia de seguridad química. Representan una fuente directa de buenas prácticas y dificultades enfrentadas en contextos reales.

Estas fuentes permiten explorar los aspectos operativos, normativos y estratégicos de la seguridad química en laboratorios de enseñanza y brindan insumos esenciales para establecer comparaciones, detectar vacíos normativos y analizar modelos de prevención.

3.3.2. Fuentes secundarias

Las fuentes secundarias incluyen aquellos documentados que han sido elaborados a partir del análisis, interpretación o reorganización de fuentes primarias. Su función es sintetizar, clasificar o reflexionar sobre la información original, facilitando la comprensión y el acceso al conocimiento relevante del campo de estudio. Estas fuentes permiten complementar el análisis crítico desde una perspectiva más amplia o estructural.

En esta investigación, se utilizaron fuentes secundarias como:

- Bases académicas: Plataformas como Scielo, Redalyc, Google Scholar, ResearchGate y PubMed fueron consultadas para acceder a estudios previos, revisiones temáticas, análisis comparativos y reportes sobre la gestión de sustancias químicas y la prevención de intoxicaciones en laboratorios universitarios. Estas bases permiten el acceso a contenido científico revisado por pares, esencial para garantizar el rigor del trabajo.
- Libros especializados: Se incluyeron textos y técnicos que abordan temas como toxicología, seguridad química, normativas ambientales, y gestión de residuos peligrosos. Estas obras ofrecen un marco conceptual sólido y transversal para entender las implicaciones técnicas, legales y educativas del manejo de sustancias químicas.
- Artículos de revisión: Este tipo de publicaciones sintetiza resultados de múltiples investigaciones primarias, ofreciendo una visión general sobre tendencias actuales, avances en protocolos de seguridad, desafíos comunes y

propuestas de mejora en el entorno universitario. Son útiles para identificar áreas críticas y comparar enfoques institucionales o regionales.

- Documentos técnicos de organismos internacionales: Se analizaron informes y directrices de entidades como la OMS, la OPS, el PNUMA y agencias de regulación ambiental, que brindan recomendaciones prácticas, definiciones técnicas y orientaciones estratégicas sobre el manejo de sustancias químicas en contextos educativos y de investigación.

El uso combinado de estas fuentes permitió construir una base documental amplia, confiable y contextualizada, lo que facilitó el análisis crítico del problema planteado y enriqueció la discusión comparativa entre diferentes enfoques de seguridad química.

3.3.3. Revisión documental

La revisión documental constituye la principal técnica utilizada en este estudio. Se trata de un proceso sistemático, metódico y organizado que implica la recopilación, análisis crítico e interpretación de contenidos provenientes de documentos escritos. A través de esta técnica, se busca comprender la realidad estudiada mediante el acceso a registros institucionales, académicos y normativos que reflejan prácticas, desafíos, errores y aciertos en la gestión de la seguridad química en laboratorios académicos.

El procedimiento de revisión documental desarrollado en esta investigación incluyó las siguientes etapas:

- Localización de fuentes: Se identificaron documentos relevantes en repositorios digitales, bases de datos científicas, bibliotecas institucionales y sitios oficiales de organismos nacionales e internacionales.
- Selección de documentos: Se aplicaron criterios de inclusión como actualidad, pertinencia temática, rigurosidad metodológica y acceso completo. También se descartaron fuentes que carecieran de respaldo académico, estuvieran duplicadas o no respondieran a los objetivos del estudio.

- Organización y clasificación: Los documentos fueron ordenados temáticamente en función de las variables clave: riesgos de intoxicación, manejo de reactivos, disposición de residuos químicos, protocolos de seguridad y normativas institucionales.
- Análisis de contenido: Se aplicó una lectura crítica para identificar patrones, vacíos, contradicciones y propuestas relevantes. Este análisis permitió detectar tendencias comunes, enfoques divergentes y buenas prácticas en la gestión de la seguridad química.
- Sistematización de hallazgos: Se construyeron matrices de análisis comparativo para contrastar enfoques normativos, estrategias de prevención y condiciones de seguridad descritas en los diferentes contextos educativos.

Esta técnica fue seleccionada por su capacidad para brindar una visión profunda y estructurada del fenómeno investigado, permitiendo acceder a una diversidad de perspectivas, sin necesidad de intervención directa. La revisión documental permitió establecer una base sólida para el análisis comparativo entre distintos modelos de gestión de seguridad química, sus alcances, limitaciones y posibilidades de implementación en laboratorios universitarios.

3.4. Criterios de búsqueda

Tabla 7. Criterios de búsqueda

Objetivo	Descriptores	Motores de búsqueda	Periodo de estudio	Idioma
Analizar, mediante una revisión bibliográfica comparativa, los	“seguridad química”, “accidentes químicos”,	Pubmed, Science	2015-2025	Español/Inglés

Objetivo	Descriptores	Motores de búsqueda	Periodo de estudio	Idioma
riesgos de intoxicación asociados a la gestión inadecuada de reactivos y residuos químicos en laboratorios académicos, así como las estrategias identificadas en la literatura científica para garantizar condiciones de seguridad química.	"gestión de residuos", "riesgos de laboratorio", "chemical safety", "chemical management"	Direct y Springer Link, Scielo		/ Portugués
Identificar los riesgos más frecuentes de intoxicación por sustancias químicas mal gestionadas en entornos de laboratorio educativo, según la literatura científica y técnica.	"riesgos de intoxicación", "exposición química", "mal manejo de reactivos", "accidentes en laboratorios académicos"	Scielo, Redalyc, PubMed, ResearchGate	2015-2025	Español/Inglés / Portugués

Objetivo	Descriptores	Motores de búsqueda	Periodo de estudio	Idioma
Describir las recomendaciones internacionales en cuanto a procedimientos de clasificación, almacenamiento, manipulación y disposición de reactivos y residuos químicos en laboratorios académicos.	“clasificación de sustancias químicas”, “almacenamiento o seguro”, “normativas internacionales”, “chemical handling”, “hazardous waste disposal”	OMS, ACS, UNEP (PNUMA), ScienceDirect, Google Scholar	2015-2025	Español/Inglés / Portugués
Examinar buenas prácticas de seguridad química y su aplicabilidad para la elaboración de protocolos de prevención de intoxicaciones en contextos educativos.	“buenas prácticas de laboratorio”, “protocolos de seguridad química”, “prevención de intoxicaciones”, “chemical safety in education”	ResearchGate, Google Scholar, Repositorios universitarios, Scielo	2015-2025	Español/Inglés / Portugués

Fuente: Elaboración propia, 2025

Las palabras clave utilizadas en la búsqueda bibliográfica incluyeron principalmente términos como seguridad química, riesgos de intoxicación, manejo de reactivos, residuos peligrosos, protocolos de laboratorio y chemical safety, en idiomas como español, inglés y portugués, junto con sus respectivas variantes semánticas adaptadas al contexto académico. La selección de estos descriptores respondió a la necesidad de identificar estudios pertinentes que abordaran la gestión de sustancias químicas en laboratorios educativos.

Es importante señalar que se excluyeron fuentes de información secundarias sin respaldo académico, como blogs, páginas web sin autor identificado o contenido no sometido a revisión científica. Esta decisión metodológica tuvo como propósito garantizar la validez, confiabilidad y rigurosidad del corpus documental analizado, lo que a su vez permite construir una base sólida para el análisis comparativo de estrategias de prevención de intoxicaciones químicas en entornos académicos.

3.5 Criterios de inclusión y exclusión

Para delimitar el corpus documental del estudio, se establecieron criterios de inclusión y exclusión que garantizaron la pertinencia, actualidad y calidad metodología de las fuentes utilizadas. En la siguiente tabla se resumen estos criterios:

Tabla 8. Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de Inclusión	Criterios de exclusión
Documentos publicados entre los años 2010 y 2025	Fuentes anteriores al año 2010
Textos en idioma inglés, español y portugués.	Documentos en otros idiomas sin traducción disponible.
Artículos científicos, tesis académicas, normativas, manuales o informes técnicos relacionados con seguridad química.	Artículos de opinión, noticias, blogs u otras fuentes sin revisión académica o científica.

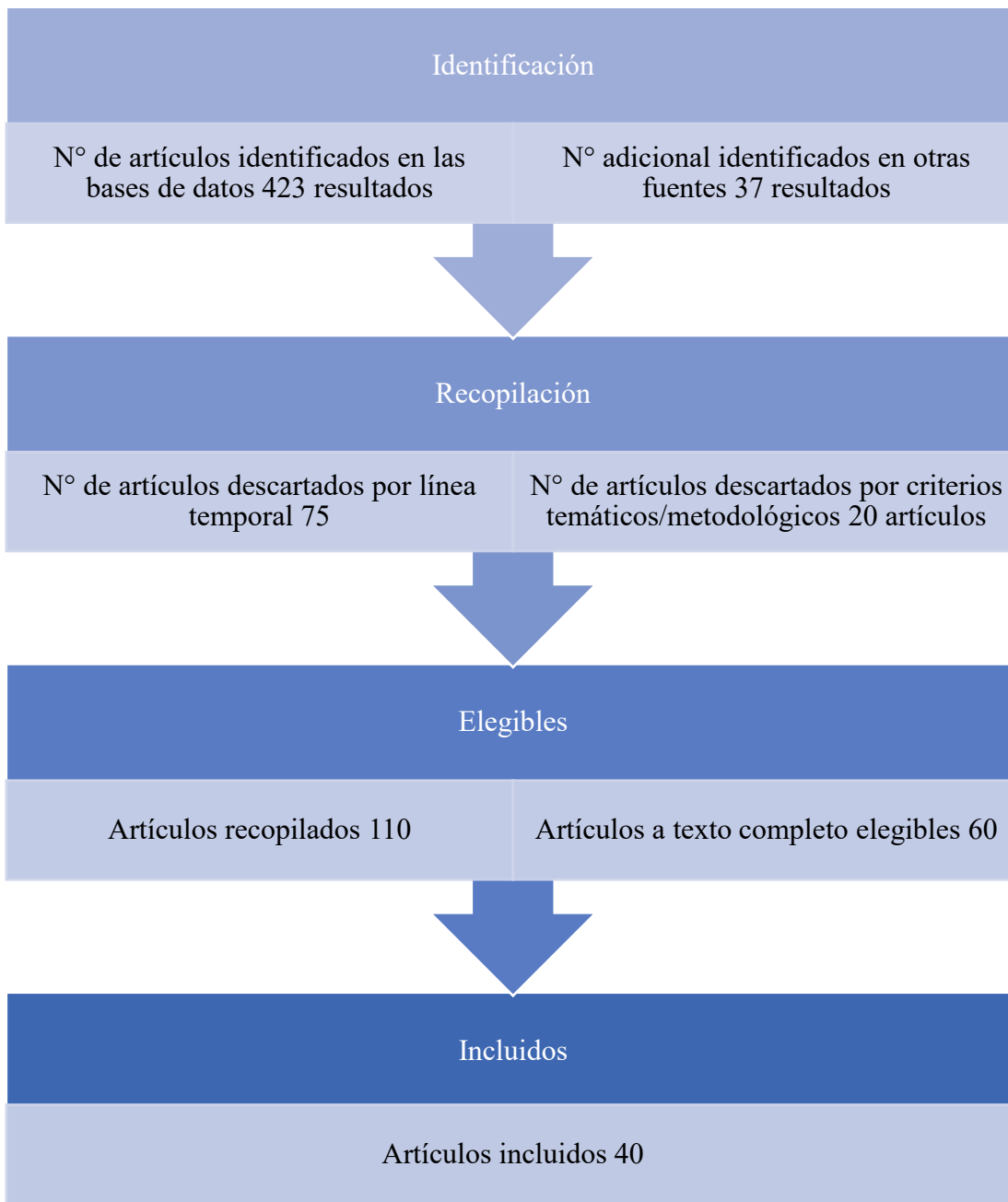
Estudios centrados en laboratorios académicos, ya sean de docencia o investigación.	Estudios enfocados exclusivamente en laboratorios clínicos o industriales sin conexión con el ámbito educativo.
Investigaciones que aborden riesgos de intoxicación, clasificación y manipulación de sustancias químicas o gestión de residuos.	Estudios que no traten temas vinculados a la gestión de reactivos ni riesgos químicos.

Fuente: Elaboración propia, 2025

La aplicación de estos criterios permitió enfocar la revisión documental en documentos relevantes para los objetivos de la investigación y con un nivel adecuado de validez científica.

3.6 Algoritmo de búsqueda y selección

Figura 3. Algoritmo de flujo para una estrategia de búsqueda y selección



3.7 Clasificación según niveles de evidencia

Para valorar la calidad metodológica de los estudios incluidos en esta revisión, se aplicó una clasificación basada en los niveles de evidencia propuestos por el Oxford for Evidence-Based Medicine (OCEBM). Esta jerarquía permite establecer un orden en función de la solidez del diseño del estudio y su capacidad para responder preguntas clínicas relevantes. A continuación, se presenta la distribución de los estudios según su tipo, nivel de evidencia y frecuencia relativa:

Tabla 9. Cantidad de artículos según nivel de evidencia

Nivel de evidencia	Tipo de estudio	Cantidad según tipo de estudio	Cantidad según nivel de evidencia	Porcentaje
1	Revisión Sistemática con homogeneidad y metaanálisis Ensayos Controlados Aleatorizados (ECA)	1	1	2.5%
2	Revisión sistemática con homogeneidad de estudios de cohortes	8	8	20.0%
3	Revisión sistemática con homogeneidad de estudios de casos y controles y estudio de casos y controles individuales	3	3	7.5%
4	Serie de casos, estudio de cohorte y casos de control	25	25	62.5%
5	Opiniones de expertos, informes anecdóticos sin análisis sistemático.	3	3	7.5%
Total				100%

Fuente: Elaboración propia, 2025

3.8 Análisis de la información

En función de los objetivos específicos del estudio, se establecieron categorías y subcategorías de análisis que permitieran organizar y clasificar la información obtenida durante la revisión documental. La siguiente tabla resume dicho esquema:

Tabla 10. Análisis de la información

Objetivo específico	Categoría de análisis	Subcategoría	Definición conceptual	Instrumento
Identificar los riesgos más frecuentes de intoxicación por sustancias químicas mal gestionadas en entornos de laboratorio educativo, según la literatura científica y técnica.	Riesgos de intoxicación química.	Tipos de riesgos reportados en la literatura científica	Situaciones que implican exposición a sustancias químicas mal manipuladas o almacenadas, que representan un riesgo para la salud en contextos educativos.	Revisión bibliográfica
Describir las recomendaciones internacionales en cuanto a procedimientos de clasificación, almacenamiento, manipulación y disposición de reactivos y residuos químicos en laboratorios académicos.	Gestión de sustancias químicas	Normativas, protocolos y estándares internacionales	Conjuntos de lineamientos técnicos emitidos por organismos internacionales para el manejo seguro de sustancias químicas y residuos en entornos académicos.	Revisión bibliográfica
Examinar buenas prácticas de	Buenas prácticas de	Procedimientos institucionales	Acciones sistemáticas implementadas para	Revisión bibliográfica

seguridad química y su aplicabilidad para la elaboración de protocolos de prevención de intoxicaciones en contextos educativos	seguridad en laboratorios	y estrategias preventivas	reducir riesgos químicos, fomentar la cultura de seguridad y proteger a los usuarios en espacios de laboratorios.	
--	---------------------------	---------------------------	---	--

Esta tabla orientó la interpretación de los documentos seleccionados, facilitando la sistematización de hallazgos relacionados con los riesgos, normativas y buenas prácticas en la gestión de seguridad química dentro de laboratorios académicos.

CAPÍTULO IV- ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta los hallazgos de la revisión de 40 estudios sobre seguridad química en laboratorios académicos (ver anexo A), publicados entre 2010 y 2025. Los resultados que se presentan a continuación responden directamente a los tres objetivos específicos planteados: identificar los riesgos de intoxicación más frecuentes, describir las recomendaciones internacionales sobre manejo de reactivos y residuos, y examinar buenas prácticas de seguridad aplicables a la elaboración de protocolos preventivos

Los estudios provienen de contextos diversos (universidades estadounidenses con presupuestos robustos, instituciones latinoamericanas con recursos limitados, laboratorios asiáticos y europeos con diferentes culturas de seguridad) lo cual permite un análisis comparativo robusto. Para mantener claridad en la exposición, el análisis se organiza en cuatro apartados principales: caracterización de riesgos de intoxicación, procedimientos de manejo de reactivos, gestión de residuos químicos y estrategias de prevención. Cada sección indica explícitamente a cuál objetivo responde, facilitando que la persona lectora identifique cómo cada fragmento aporta a la investigación.

Es importante destacar que, aunque la mayoría de estudios provienen de países desarrollados, se incluyen tres investigaciones realizadas en Costa Rica (Esquivel, 2021; León Mora, 2021; Benavides, 2016) que permiten contrastar la realidad nacional con los hallazgos internacionales, evidenciando brechas significativas que serán analizadas en detalle.

4.1 Caracterización de riesgos de intoxicación en laboratorios académicos

Esta sección responde directamente al primer objetivo específico de la investigación, que busca identificar los riesgos más frecuentes de intoxicación por sustancias químicas mal gestionadas en entornos de laboratorio educativo, según la literatura científica y técnica.

De los 40 estudios revisados, 32 documentan específicamente casos de intoxicación química: qué sustancias estaban involucradas, cómo ocurrió la exposición, qué factores contribuyeron y cuáles fueron las consecuencias para la salud de estudiantes y personal. El análisis se estructura en cuatro dimensiones: tipos de intoxicación más comunes, vías de exposición predominantes, factores de riesgo identificados y comparación entre el contexto

internacional y la realidad costarricense. Esta caracterización sistemática permite reconocer patrones recurrentes que fundamentan las estrategias preventivas analizadas posteriormente en relación con los objetivos 2 y 3.

Esta sección analiza cuatro aspectos clave: que tipos de intoxicación son más comunes según la literatura, por cuáles vías entran las sustancias tóxicas al cuerpo, qué factores aumentan el riesgo, y cómo se compara la situación internacional con lo que pasa en Costa Rica.

4.1.1 Tipos de intoxicación más frecuentes según la literatura

Al analizar los estudios incluidos, emerge una distinción fundamental entre intoxicaciones agudas y crónicas. Como respuesta al primer objetivo, que busca reconocer cuáles riesgos de intoxicación se reportan con mayor frecuencia, la evidencia documental converge en que la gran mayoría de los casos corresponde a eventos agudos. Las investigaciones coinciden en que estos incidentes se presentan con mayor frecuencia debido a la naturaleza intermitente y a corto plazo de la exposición que caracteriza a los entornos experimentales universitarios, en contraste con los ambientes laborales industriales donde es más habitual la exposición crónica.

La mayoría de estudios internacionales coincide en algo, las intoxicaciones agudas son mucho más frecuentes en laboratorios universitarios. Hastings et al. (2021), McLeod (2022), Ferjencik y Jalovy (2010) y el National Reserch Council (2011) reportan cifras bastante similares: entre 85% y 92% de los incidentes son de tipo agudo^{94,88,109,96}. Esto tiene sentido si pensamos que los estudiantes trabajan en laboratorio de manera intermitente y supervisada, a diferencia de trabajadores industriales que están expuestos continuamente.

Si surge la pregunta ¿qué sustancias causan con mayor frecuencia intoxicaciones agudas?, la respuesta apunta de manera consistente hacia los solventes orgánicos volátiles. Diversos reportes señalan reiteradamente compuestos como acetona, metanol, diclorometano, cloroformo y tolueno, los cuales se emplean de forma habitual en prácticas

de química orgánica y analítica, lo que incrementa el riesgo de exposición y, por ende, de intoxicación. Kim et al. (2024) analizaron 196 incidentes en universidades de Corea de Sur y encontraron algo preocupante: el 69% de los derrames accidentales involucraban estos solventes³.

En Estados Unidos, Abedsoltan y Shiflett (2024) hicieron una revisión sistemática de 48 estudios y confirmaron el patrón: entre 35% y 42% de las intoxicaciones agudas en laboratorios académicos involucran estos compuestos orgánicos volátiles⁴⁹. Esta prevalencia no resulta fortuita, dado que estas sustancias presentan alta volatilidad, entonces si la ventilación no es buena, las concentraciones en el aire pueden volverse peligrosas rápido.

Estas manifestaciones coinciden con lo descrito en la literatura sobre los riesgos más frecuentes, tal como indica el primer objetivo de esta investigación, que busca reconocer cuáles riesgos de intoxicación se reportan con mayor frecuencia en entornos de laboratorio educativo. En exposiciones de mayor intensidad, la progresión hacia confusión mental, somnolencia o pérdida de conciencia refuerza la necesidad de identificar estos patrones sintomáticos para fortalecer los protocolos de respuesta temprana

Los ácidos fuertes como el sulfúrico, clorhídrico y nítrico, junto con bases concentradas como hidróxido de sodio, aparecen en el 25-30% de los incidentes reportados.^{3,49,96} A diferencia de los solventes que principalmente se inhalan, estos compuestos causan daño directo cuando tocan la piel o los ojos. Las quemaduras químicas pueden ser severas: desde enrojecimiento superficial hasta quemaduras profundas que requieren hospitalización y pueden dejar cicatrices permanentes⁵³.

Estas manifestaciones coinciden con lo descrito en la literatura sobre los riesgos más frecuentes, tal como indica el primer objetivo, que busca reconocer cuáles riesgos de intoxicación se reportan con mayor frecuencia.

Aquí hay algo crítico, la gravedad depende principalmente de tres factores. Primero, la concentración del gas en el aire; segundo, la duración de la exposición; y tercero, si el sistema de ventilación es adecuado. Por ejemplo, organismos como la ACGIH y OSHA

establecen límites de exposición permisible (LEP) para gases tóxicos en laboratorios. Para el amoníaco, el límite es de 25 ppm como promedio ponderado para una jornada laboral de 8 horas, y para el tolueno es de 50 ppm. Si una campana extractora falla o alguien no detecta a tiempo el problema, una concentración que sobrepase estos límites puede transformar una irritación leve en consecuencias severas como edema pulmonar e insuficiencia respiratoria ²².

Aunque solo se reportan formalmente en el 8-15% de los incidentes ⁸⁸ es probable que las intoxicaciones crónicas estén significativamente subestimadas. Esto se debe a que resulta complejo establecer una relación causal directa entre síntomas que se manifiestan meses o años después y una exposición puntual en el entorno del laboratorio académico.

Adicionalmente, la rotación semestral de estudiantes dificulta el seguimiento sistemático de la salud a largo plazo, lo que limita la identificación precisa de casos crónicos derivados de exposiciones repetidas a bajas concentraciones. Un estudio interesante de Wiriyakraikul et al. (2022) en Tailandia evaluó a 340 técnicos de laboratorio con muchos años de experiencia (promedio 12 años). Encontraron prevalencias altas de problemas respiratorios crónicos (23%), dermatitis recurrente (18%) y cambios en la sangre relacionados con exposición a formaldehído, benceno y metales pesados (12%) ²².

Esto es importante para las universidades costarricenses. Aunque los estudiantes rotan cada semestre y su nivel de exposición es menor, el personal técnico que trabaja permanentemente en los laboratorios sí enfrenta este riesgo. Y según Esquivel (2021) y León Mora (2021), prácticamente no existe vigilancia médica ocupacional para este personal en nuestras universidades públicas ^{5,32}.

4.1.2 Vías de exposición predominantes

El saber cómo entran las sustancias tóxicas al cuerpo es fundamental para diseñar protecciones específicas. La literatura muestra patrones bastantes claros. El respirar vapores, gases o polvos químicos es la forma más común de intoxicación en laboratorios académicos. Los estudios reportan que representa entre 45% y 58% de los casos ^{49,99,112} y esto tiene sentido

ya que muchos reactivos se evaporan fácilmente, y si la ventilación falla, esos vapores se quedan en el aire.

Reina y Reina (2021) hicieron algo interesante en universidades españolas, midieron directamente las concentraciones de solventes orgánicos en el aire de laboratorios ¹⁴. Lo que encontraron es preocupante ya que, en laboratorios sin ventilación mecánica, durante procedimientos comunes como destilaciones o evaporaciones, las concentraciones podían ser 3 a 8 veces más altas que los límites seguros establecidos por OSHA. Se puede imaginar a alguien haciendo una destilación "rápida" en una bancada sin campana extractora puede estar respirando niveles peligrosos de vapores sin darse cuenta.

En el contexto costarricense, Esquivel (2021) evaluó 49 laboratorios del ITCR y determinó que el 32% de ellos no contaban con sistemas de ventilación mecánica funcional. Adicionalmente, del porcentaje de laboratorios que disponía de campanas extractoras, el 28% presentaba condiciones inadecuadas, tales como flujo de aire insuficiente, falta de mantenimiento regular y ausencia de procedimientos establecidos para la verificación de su correcto funcionamiento. Esta situación representa un problema relevante en términos de seguridad ocupacional y riesgo de exposición a agentes químicos volátiles. La segunda vía más importante es la piel y cuando sustancias químicas tocan directamente este órgano, representan entre 25% y 35% de las exposiciones tóxicas^{3,49}. Esto es especialmente peligroso con compuestos que se absorben a través de la piel (como fenol, dimetilsulfóxido, anilina) o con ácidos y bases que causan quemaduras inmediatas.

Kim et al. (2024) analizaron 196 incidentes en laboratorios de Corea del Sur y este dato muestra una actividad crítica que coincide con lo descrito en el primer objetivo, que busca reconocer cuáles riesgos de intoxicación se reportan con mayor frecuencia, y al mismo tiempo señala la necesidad de reforzar procedimientos preventivos según el tercer objetivo, que busca examinar buenas prácticas aplicables a la elaboración de protocolos de prevención³.

En Costa Rica, León Mora (2021) observó prácticas similares en la UNA. El 40% de las personas que observó en bodegas de reactivos solo usaban guantes cuando consideraban que algo era "muy peligroso", pero no para cosas rutinarias. El 15% reutilizaba los mismos

guantes entre diferentes tareas. Y el 8% ni siquiera tenía guantes del tamaño adecuado disponibles³². Y estos detalles marcan la diferencia e importan.

El contacto ocular con sustancias químicas, aunque representa únicamente entre el 8% y el 12% de los casos reportados, constituye uno de los eventos más graves debido a su potencial para causar daños severos, tales como lesiones corneales permanentes o incluso pérdida parcial o total de la visión. Hastings et al. (2021) y Ferjencik y Jalovy (2010) destacan la importancia de actuar con inmediatez, ya que cada segundo que transcurre sin un lavado ocular adecuado permite que la sustancia penetre más profundamente en los tejidos, incrementando considerablemente la magnitud del daño.

La mayoría de contactos oculares (84%) ocurren por proyección de líquidos cuando algo está a presión, el 12% son salpicaduras durante transferencias y el 4% pasa porque alguien se toca los ojos con guantes contaminados sin darse cuenta. Y el problema se agrava porque, según múltiples estudios de observación, entre 40% y 60% de usuarios de laboratorios académicos no usan gafas de seguridad consistentemente.

Finalmente, la ingestión accidental constituye la vía de exposición menos frecuente, representando menos del 3% de las intoxicaciones reportadas. No obstante, cuando estos casos ocurren, reflejan deficiencias fundamentales en la cultura de seguridad del laboratorio. Entre las causas documentadas se encuentran: el consumo de alimentos o bebidas dentro del área de trabajo, el uso de técnicas obsoletas y prohibidas como el pipeteo bucal, y el almacenamiento inadecuado de reactivos químicos en recipientes domésticos sin etiquetado apropiado. Estas situaciones evidencian la necesidad de fortalecer los protocolos de seguridad y la formación continua del personal y estudiantes en buenas prácticas de laboratorio.

4.1.3 Factores de riesgo identificados

A partir del análisis de los estudios revisados, se identifican tres categorías principales de factores de riesgo asociados a la ocurrencia de intoxicaciones químicas en laboratorios académicos como lo son los factores humanos (vinculados con el conocimiento, comportamiento y percepción del riesgo de los usuarios), factores técnicos (relacionados con

la infraestructura, equipamiento y sistemas de ventilación), y factores organizacionales (que abarcan aspectos de gestión, supervisión, capacitación y asignación de recursos institucionales). La interacción y convergencia de estos tres elementos determina el nivel de riesgo efectivo al que están expuestos los estudiantes, docentes y personal técnico en el entorno de laboratorio.

Varios estudios hicieron encuestas a estudiantes antes de empezar cursos de laboratorio. Los resultados son preocupantes. Entre 45% y 62% no conocían los riesgos específicos de las sustancias que iban a manipular. Muchos ni siquiera sabían qué era una Ficha de Datos de Seguridad ni cómo buscarla. Y es aquí donde está el problema, darles una charla teórica de inducción no siempre funciona. Si solo es una sesión de PowerPoint de 2-3 horas sin práctica, la información no se retiene.

Diversos estudios que analizaron el comportamiento de usuarios de laboratorios mediante observación directa revelaron un fenómeno paradójico que indica que las personas con mayor experiencia suelen omitir con mayor frecuencia las medidas de seguridad establecidas^{94,109}. Estudiantes de posgrado y técnicos con años de trayectoria tienden a subestimar los riesgos cuando perciben las tareas como breves, rutinarias o de bajo volumen. Este fenómeno se denomina técnicamente normalización de la desviación, y consiste en la reducción progresiva de la percepción del riesgo a partir de exposiciones reiteradas sin consecuencias aparentes. Aunque el nivel objetivo de riesgo permanece constante, la evaluación subjetiva de peligro disminuye, lo que incrementa la probabilidad de incidentes.

Cuando existe presión temporal (entregar un informe, finalizar el experimento antes del cierre del laboratorio, avanzar en proyectos de tesis con plazos apremiantes) los usuarios tienden a acelerar los procedimientos, lo cual incrementa la probabilidad de errores. Un estudio canadiense (Menard et al., 2022) documentó que el 34% de los incidentes ocurría en las últimas 2 horas del turno de laboratorio, precisamente cuando la presión por concluir actividades es mayor. La identificación de estos patrones conductuales responde al primer objetivo, al caracterizar factores que incrementan el riesgo de intoxicación, y a su vez informa

el tercer objetivo al evidenciar la necesidad de protocolos que consideren estos aspectos psicosociales en su diseño.¹⁸.

Entre 32% y 48% de los laboratorios evaluados en múltiples estudios tenían problemas serios de ventilación. Como campanas extractoras que no funcionaban, ausencia total de ventilación mecánica, o sistemas que no renovaban el aire suficientemente rápido. En Costa Rica específicamente, Esquivel (2021) documentó este problema en el 32% de los laboratorios del ITCR. No es solo cuestión de que no existan las campanas, a veces existen, pero nadie les da mantenimiento o nadie verifica que realmente estén extrayendo vapores.

Cuando se menciona algo acerca del Equipo de Protección Personal y es el inadecuado o mal seleccionado por los estudiantes, es aquí donde no solo importa si hay guantes y gafas disponibles. Importa si son los correctos para cada sustancia. Varios estudios documentan errores comunes: guantes de látex para solventes orgánicos (protección cero), gafas sin protección lateral, batas de material que se prende fuego fácilmente, mascarillas antipolvo usadas para vapores orgánicos (inútiles).

Las duchas y lavaojos de emergencia que no funcionan en un laboratorio académico es preocupante, en los estudios de Costa Rica, entre 15% y 28% de las duchas y lavaojos de emergencia instalados en laboratorios no funcionaban por falta de presión de agua, válvulas oxidadas, ubicación bloqueada, o peor aún se da la situación de que mucha gente ni siquiera sabía dónde estaban ubicados.

Existen factores organizacionales como rotación constante de estudiantes ya que cada semestre o cuatrimestre entran personas nuevas que nunca han trabajado en un laboratorio lo cual dificulta consolidar una cultura de seguridad porque siempre se va a empezar de cero. Y si a esto le sumamos la cantidad de estudiantes por supervisor, porque mientras universidades con buenos programas de seguridad mantienen grupos de 10-15 estudiantes por supervisor, en muchas universidades latinoamericanas puede haber 25-30 estudiantes con un solo profesor o técnico. Y esto hace físicamente imposible supervisar adecuadamente a tanta gente al mismo tiempo.

Por último, hay un tema que es el presupuesto limitado y que las prioridades compiten por el mismo, las universidades tienen recursos limitados lo que hace decidir ¿invertimos en un equipo analítico nuevo? ¿En reactivos? ¿En contratar más personal? ¿En arreglar la ventilación? Con frecuencia, la seguridad queda en un segundo plano porque no es tan visible como otras necesidades.

4.1.4 Análisis comparativo: contexto internacional vs. Costa Rica

Los tres estudios diagnósticos costarricenses incluidos en esta revisión (Esquivel, 2021; León Mora, 2021; Benavides et al., 2016) nos permiten comparar qué pasa aquí con lo documentado internacionalmente. Los principios toxicológicos son universalmente aplicables. Los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) causan los mismos síntomas neurológicos aquí y en Japón, los ácidos quemar tejidos de la misma forma en Costa Rica y en Alemania, la inhalación es la vía de exposición más frecuente en todos lados y los factores de riesgo humanos (desconocimiento, normalización de desviaciones, presión de tiempo) se repiten en todos los contextos.

A diferencia de lo reportado en Estados Unidos, en el contexto costarricense se observa una implementación más limitada, lo cual permite contrastar las prácticas descritas en el segundo objetivo, que busca señalar recomendaciones de manejo seguro, y en el tercer objetivo, que busca examinar buenas prácticas aplicables a protocolos de prevención de intoxicaciones

Las fichas de Datos de Seguridad en el idioma español que es el idioma natal de los latinoamericanos es un problema de esta región, León Mora (2021) reporta que el 30% de reactivos en la UNA no tenían FDS en español accesibles³². Esto no pasa en países donde el inglés es idioma nativo y aunque muchos fabricantes grandes ya tienen FDS en español, proveedores más pequeños no siempre las proporcionan. Por más que parezca menor, la barrera idiomática importa cuando alguien necesita consultar información de emergencia rápidamente.

Estudios en universidades norteamericanas y europeas reportan que el 75-85% ya usan sistemas informáticos para rastrear inventarios de reactivos, controlar caducidades,

documentar residuos. En Costa Rica, solo el ITCR ha intentado digitalizar inventarios parcialmente, y la mayoría de instituciones aún dependen de cuadernos manuales, con todos los problemas que eso implica como información desactualizada, difícil de buscar, fácil de perder.

Las inspecciones del Ministerio de Salud a laboratorios universitarios en Costa Rica ocurren cada 3-5 años, cuando se renuevan permisos sanitarios. En Estados Unidos y Europa, las inspecciones son anuales o bianuales¹². Y en términos a menor fiscalización va a significar menor presión institucional para mantener cumplimiento.

Todo esto va implicar que, aunque la naturaleza de los riesgos químicos es la misma en todas partes, las barreras para implementar medidas preventivas son diferentes. En Costa Rica, el desafío central no es desconocimiento de qué hacer (el marco regulatorio existe, las normativas son buenas), sino movilizar recursos, mantener consistencia en la implementación, y consolidar cultura de seguridad en contextos donde el presupuesto es limitado y las prioridades compiten entre sí.

Tabla 11. Intoxicaciones agudas por tipo de sustancia química en laboratorios académicos: síntesis de la literatura revisada

Tipo de sustancia	Estudios que lo reportan	Porcentaje de incidentes	Vía principal	Gravedad típica
Solventes orgánicos volátiles (acetona, metanol, cloroformo, etc.)	28	35-42%	Inhalación (85%)	Moderada a severa
Ácidos y bases concentrados (H ₂ SO ₄ , HCl, NaOH, KOH)	26	25-30%	Contacto piel/ojos (90%)	Severa (quemaduras)

Gases tóxicos (cloro, amoníaco, SO ₂ , NO ₂)	22	12-18%	Inhalación (95%)	Variable
Metales pesados y sales (plomo, mercurio, cadmio)	15	5-8%	Variable	Moderada/crónica
Oxidantes fuertes (peróxido de hidrógeno, permanganatos)	12	4-7%	Contacto (85%)	Severa
Formaldehído	14	3-6%	Inhalación	Crónica

Fuente: Elaboración propia basada en datos de 32 estudios del Anexo A que proporcionaron información desagregada ^{5,95}.

Nota: Los porcentajes no suman 100% porque algunos incidentes involucran múltiples sustancias. La gravedad es lo esperado en una exposición significativa, no lo que pasa en la mayoría de incidentes (que suelen ser leves).

4.2 Procedimientos de manejo y almacenamiento de reactivos químicos

Esta sección responde primordialmente al segundo objetivo específico, que busca describir las recomendaciones internacionales en cuanto a procedimientos de clasificación, almacenamiento, manipulación y disposición de reactivos y residuos químicos en laboratorios académicos.

Comprender qué riesgos existen y cómo se materializan permite fundamentar la prevención mediante el manejo y almacenamiento correcto de reactivos. Si los reactivos se almacenan inadecuadamente, se mezclan sustancias incompatibles o existe desconocimiento sobre el inventario disponible, el riesgo de intoxicación se incrementa exponencialmente. El análisis abarca cuatro dimensiones: sistemas de clasificación (GHS), estrategias de control de inventarios y trazabilidad, condiciones de almacenamiento seguro, y brechas identificadas en la implementación institucional. Cada uno de estos aspectos responde a las recomendaciones internacionales que constituyen el núcleo del segundo objetivo.

4.2.1 Sistemas de clasificación y organización (GHS)

La mayoría de universidades en el mundo ahora usan el Sistema Globalmente Armonizado (GHS) como base para clasificar y etiquetar sustancias químicas peligrosas. No es por capricho, es porque el GHS existe precisamente durante décadas y cada país, cada empresa, cada universidad usaba su propio sistema, lo cual era un caos por ejemplo un símbolo de calavera significaba algo en Estados Unidos, algo diferente en Europa, y posiblemente nada en Asia.

El GHS cambió eso ya que estableció una clasificación única de peligros (que aparecen en etiquetas con pictogramas específicos) y consejos de prudencia estandarizados (las famosas "Frases P" que aparecen en toda botella)⁴⁹. En teoría, un estudiante de química en Tailandia, Costa Rica o Alemania, debería poder mirar una etiqueta con el GHS y entender exactamente qué peligros representa esa sustancia.

Como parte del segundo objetivo, que busca describir las recomendaciones sobre clasificación y manejo seguro, resulta fundamental analizar no solo la existencia del sistema GHS, sino su implementación efectiva en la práctica.

En la literatura se indica que la aplicación del sistema GHS suele ser parcial y depende de la supervisión disponible. Abedsoltan y Shiflett (2024) documentaron que el 72% de laboratorios académicos estadounidenses implementaban correctamente el sistema de clasificación ⁴⁹. Este hallazgo se relaciona directamente con el segundo objetivo de la investigación, que busca describir las recomendaciones sobre clasificación y manejo seguro de reactivos y residuos, evidenciando la brecha entre la normativa establecida y su implementación efectiva.

Al verlo en Costa Rica la realidad es distinta, León Mora (2021) evaluó bodegas de reactivos en la Universidad Nacional y documentó que el 30% de frascos carecían de etiquetas legibles en español. (A2) A veces la información estaba solo en inglés, lo cual complica las cosas cuando alguien necesita información urgente. Además, encontró que el 15% de reactivos tenía etiquetas antiguas anteriores al GHS, con sistemas de clasificación obsoletos que nadie usa ya. (A2)

Esquivel (2021) en el ITCR reportó un problema adicional el cual era que, aunque los frascos nuevos llegaban con etiquetas GHS correctas, cuando se dividía una cantidad grande en frascos más pequeños para usar en prácticas, muchas veces esos frascos nuevos no se re-etiquetaban⁵. O se etiquetaban manualmente, pero los estudiantes a veces no lo hacían correctamente.

Si se hace la pregunta ¿Por qué importa la clasificación correcta?, se responde que afecta directamente qué tipo de protección usa la gente, si una etiqueta dice correctamente "irritante respiratorio", alguien usará mascarilla y campana extractora. Si la etiqueta está borrada o en idioma que no se entiende, la gente lo trata como "algo químico" sin protección específica lo que puede llegar a provocar un aumento en el riesgo de intoxicación.

4.2.2 Estrategias de control de inventarios y trazabilidad

Esta sección complementa el segundo objetivo específico al abordar las recomendaciones internacionales sobre disposición de reactivos y residuos químicos, y se vincula con el tercer objetivo al examinar buenas prácticas de minimización y tratamiento que son aplicables a la elaboración de protocolos preventivos.

La gestión de residuos químicos constituye el eslabón final en la cadena de seguridad que inicia con la adquisición y uso de reactivos. Una disposición inadecuada no solo genera riesgos ambientales, sino que puede producir nuevos escenarios de intoxicación para personal técnico, estudiantes y gestores de residuos. El análisis se estructura en cuatro componentes: métodos de segregación y almacenamiento temporal, estrategias de neutralización y tratamiento previo, disposición final conforme a normativas (Ley 8839 en Costa Rica), y prácticas de minimización basadas en principios de química verde

Hay un problema en los laboratorios al momento de los inventarios y lograr la trazabilidad soñada, el problema es de “no sé qué tengo guardado”. Si se tiene una suposición sobre que hace 3 años alguien compró 500 mL de éter dietílico para un experimento que nunca se hizo, la botella se olvidó en un armario y tres años después, nadie sabe que está ahí.

¿Cuándo caduca? ¿Dónde está? ¿Qué está pasando con esa botella? Este escenario es más común de lo que uno piensa en laboratorios académicos. Kim et al. (2024) reportan que, en su análisis de universidades coreanas, el 34% de laboratorios no tenía un inventario actualizado de reactivos³. Básicamente, no sabían con precisión qué tenían guardado.

Las consecuencias pueden llegar a ser serias, por ejemplo; reacción peligrosa como que alguna persona compra lo que cree es un reactivo nuevo cuando ya hay uno en el armario. Los dos se mezclan accidentalmente, el vencimiento de reactivos que al momento de expirar pueden degradarse y volverse más peligrosos, los desperdicios innecesarios ya que se compra algo que ya existe, y la responsabilidad legal si llega a ver un problema, ¿quién es responsable de un reactivo de hace 3 años del cual no hay registro?

Algunas soluciones que se han documentado en la literatura han sido por ejemplo Solano-Solano (2012) en el ITCR diseñó un sistema manual de registro de inventario que funciona así cada reactivo tiene una tarjeta con nombre, lote, fecha de compra, fecha de vencimiento, cantidad actual, ubicación exacta, docente/técnico responsable. Estas tarjetas se actualizan cada semana manualmente, se archivan en orden alfabético. La pregunta es ¿Funciona? Sí, pero requiere disciplina constante. Si nadie actualiza las tarjetas, se vuelve inútil.

Montero Miranda (2019) en el LACOMET (Laboratorio Costarricense de Metrología) implementó algo más avanzado lo cual fue un sistema digital simple en Excel⁹². Donde cada reactivo tiene una fila, se actualiza automáticamente la cantidad cuando alguien registra un uso, el sistema genera alertas cuando algo está cerca de vencer y genera reportes de qué se gastó, qué se debe comprar. ¿Cuál es el problema? Requiere que todos entren los datos correctamente. Si alguien usa reactivo, pero "olvida registrarlo", el sistema se desactualiza.

En entornos académicos internacionales, particularmente en universidades estadounidenses y europeas de mayor presupuesto, existen sistemas de software especializados para la gestión de laboratorios. Reina y Reina (2021) describen que estas plataformas integran funciones de control de inventario, generación de alertas de

vencimiento, elaboración automática de reportes, integración con sistemas de compras y auditoría digital. Sin embargo, estos sistemas representan una inversión económica considerable, con costos anuales que oscilan entre \$3,000 y \$10,000 USD, además de requerir capacitación específica del personal para su implementación y uso eficaz.

Estudios documentan que donde hay sistemas digitales robustos, la tasa de incidentes relacionados con reactivos se reduce significativamente¹⁴. Pero el costo es una barrera importante para instituciones con presupuestos limitados.

La realidad del país donde estamos se puede observar un poco, donde Solano-Solano (2012) identificó que ni el sistema manual ni uno digital básico se implementaban consistentemente en el ITCR porque este requería que docentes y técnicos dedicaran tiempo regularmente, y no había "consecuencias" si alguien no lo hacía. Cuando se iba personal, el sistema se desmoronaba porque la siguiente persona no sabía cómo funcionaba. Esquivel (2021) confirmó que, en 2021, el 55% de laboratorios del ITCR aún no tenía un sistema formal de inventario, más allá de un cuaderno donde "a veces" anotaban compras⁵.

4.2.3 Condiciones de almacenamiento seguro

Se hace el cuestionamiento del ¿Por qué importan las condiciones físicas? y no es lo mismo guardar un reactivo en cualquier lado ya que la luz puede degradar algunos compuestos, la humedad puede causar reacciones, a temperatura excesiva acelera descomposición y además la proximidad a ciertos otros compuestos puede ser peligrosa. Por ejemplo, guardar ácidos junto a bases, o inflamables cerca de oxidantes. Kim et al. (2024) analizaron incidentes en Corea y encontraron que el 28% estaban relacionados con almacenamiento inapropiado³. Algunas situaciones como, botellas rotas porque se apilaban mal, derrames porque estaban en superficies inestables, reacciones químicas porque se almacenaban sustancias incompatibles juntas y evaporación excesiva por temperatura inadecuada.

Los estándares internacionales según El National Research Council (2011) y Abedsoltan & Shiflett (2024) establecen principios básicos como almacenamiento por compatibilidad química (Ácidos separados de bases y reductores, oxidantes separados de

inflamables, sustancias reactivas con agua en lugares secos), por otro lado la ventilación (armarios de almacenamiento deben estar ventilados para evitar acumulación de vapores), contenedor adecuado, (botellas de vidrio resistente, no botellas de plástico que pueden degradarse con ciertos disolventes) temperatura controlada que generalmente entre 15-25°C, algunos reactivos requieren refrigeración (0-4°C) y la luz controlada ya que algunos reactivos sensibles a luz deben guardarse en botellas oscuras o gabinetes oscuros, y por último el acceso restringido que se debe de respetar que solo personal autorizado y capacitado debe acceder a áreas de almacenamiento.^{12,49}.

En la práctica de laboratorios costarricenses León Mora (2021) observó en la UNA que el 45% de almacenamientos no separaba ácidos de bases, el 30% no tenía control de temperatura (simplemente en un armario sin regulación), el 20% guardaba reactivos en recipientes inadecuados (plástico para solventes orgánicos y el 15% permitía acceso descontrolado (cualquier estudiante podía entrar)³². Y Esquivel (2021) en el ITCR encontró que solo el 32% de laboratorios tenía armarios de seguridad certificados. (A1) El resto almacenaba reactivos en estantes simples, lo cual aumenta riesgo de caídas y derrames.

4.2.4 Brechas identificadas en implementación institucional

Algunas de las brechas identificadas en implementación institucional pueden ser la brecha número uno la normativa existe, pero la implementación es incompleta. Costa Rica tiene la Ley 8839 de Gestión Integral de Residuos y varias normativas técnicas que especifican cómo deben manejarse reactivos químicos en instituciones. Pero como documentan los estudios diagnósticos costarricenses, la existencia de normativa no automáticamente se traduce en cumplimiento. Esquivel (2021) entrevistó coordinadores de laboratorio que dijeron "Sabemos qué debe hacerse, tenemos el manual, pero no tenemos suficiente personal para supervisar, y los estudiantes rotan cada semestre lo cual hace más difícil que todos cumplan y es casi imposible"⁵.

La brecha 2 e el entrenamiento inconsistente, todos los laboratorios dicen que capacitan a usuarios sobre manejo de reactivos. Pero ¿qué significa "capacitar"? En algunos casos es una sesión de 30 minutos al inicio del semestre donde se muestra dónde están los

armarios. En otros casos, hay un manual de 50 páginas que nadie lee y en pocos casos hay entrenamiento práctico donde alguien muestra cómo manejar y almacenar correctamente. León Mora (2021) encontró que estudiantes podían verbalmente describir procedimientos correctos de almacenamiento, pero en observación directa, no los aplicaban consistentemente³².

La brecha número 3 es el personal temporal versus sostenibilidad, los técnicos de laboratorio en universidades públicas costarricenses frecuentemente tienen contratos temporales (semestre a semestre). Cuando se van, llevan consigo el conocimiento sobre cómo funcionan los sistemas. El siguiente técnico tiene que empezar de cero y esto significa que sistemas bien diseñados por una persona pueden degradarse rápidamente cuando esa persona se va. En cuanto a la brecha número 4 falta de recursos digitales, como se mencionó, mientras laboratorios internacionales usan software especializado, la mayoría de universidades costarricenses depende de registros manuales.

Esto limita precisión, facilidad de auditoría, y generación de reportes. Solano-Solano (2012) propuso digitalizar inventario en el ITCR, pero no se implementó debido a falta de fondos para software, resistencia al cambio entre personal antiguo, y falta de personal técnico para mantener el sistema³¹. ¿Cómo se compara con lo internacional? En Estados Unidos, aunque hay variabilidad, los laboratorios universitarios típicamente van a tener sistemas de capacitación estructurados y documentados, van a usar software de gestión de inventario, realizan auditorías regulares, tienen fondos presupuestarios protegidos para seguridad y designan personas con responsabilidad explícita de supervisar cumplimiento. Cuando en Costa Rica, muchas veces esto depende de la buena voluntad individual, no de sistemas institucionalizados^{5,32}.

4.2.5 El rol del profesional farmacéutico en la gestión de reactivos y sustancias químicas

La gestión de sustancias químicas en laboratorios académicos no es exclusivamente responsabilidad de químicos o ingenieros químicos., los profesionales farmacéuticos poseen competencias específicas que los posicionan como actores potencialmente valiosos en la

supervisión, control y aseguramiento de calidad de reactivos químicos, particularmente en instituciones de educación superior donde se forman futuros profesionales de la salud.

Esta subsección explora desde la perspectiva de la formación farmacéutica, cómo las competencias profesionales del farmacéutico pueden complementar los equipos de gestión de seguridad química en laboratorios académicos, basándose en casos documentados en la literatura revisada y en el análisis de competencias aplicables.

Las competencias farmacéuticas directamente relevantes son la formación del profesional en farmacia y esta incluye tres áreas de conocimiento que tienen aplicación directa en manejo seguro de sustancias químicas farmacología y toxicología aplicada los farmacéuticos reciben entrenamiento exhaustivo en mecanismos de acción tóxica, farmacocinética (absorción, distribución, metabolización, excreción de sustancias), interacciones químicas, y manejo clínico de intoxicaciones. Esto permite identificar riesgos específicos que pueden no ser inmediatamente evidentes para personal sin formación toxicológica profunda.

Por ejemplo, un farmacéutico puede reconocer que el metanol no solo causa intoxicación directa, sino que su metabolito (ácido fórmico) es el verdadero agente tóxico que causa ceguera. Esta comprensión fisiopatológica informa decisiones sobre qué tipo de protección usar, cómo responder ante exposición, y cuándo se necesita intervención médica urgente. Álvarez-Chávez et al. (2019) documentan que estudiantes con formación en toxicología (incluyendo estudiantes de farmacia) mostraron mejor percepción de riesgos químicos comparados con estudiantes de química pura⁹². La diferencia estaba en que podían conectar exposición química con consecuencias fisiológicas específicas, no solo "saber que es peligroso" de manera abstracta.

El control de calidad y aseguramiento de calidad, los farmacéuticos están entrenados en sistemas de trazabilidad completos como registro de lotes, verificación de identidad de productos, control de fechas de vencimiento, condiciones de almacenamiento según estabilidad, documentación de cadenas de custodia. Estas competencias son directamente transferibles a gestión de inventarios de reactivos químicos. Montero Miranda (2019)

describe en su propuesta para el Laboratorio Costarricense de Metrología (LACOMET) cómo profesionales con experiencia en control de calidad farmacéutico adaptaron herramientas de la industria farmacéutica para gestionar sustancias químicas de referencia⁹².

Este sistema incluía un registro de lote y proveedor con trazabilidad completa (similar a medicamentos), control ambiental de temperatura y humedad (como productos termolábiles), verificación de identidad mediante espectroscopía (control de calidad farmacéutico aplicado), y documentación siguiendo principios de Buenas Prácticas de Laboratorio (BPL). Lo relevante de esta experiencia es que los protocolos desarrollados originalmente para medicamentos resultaron perfectamente aplicables a la gestión de reactivos químicos, demostrando que la lógica de control de calidad es transferible entre ambos contextos.

En cuanto a la interpretación de documentación técnica y normativas la lectura crítica de monografías farmacéuticas, farmacopeas (USP, BP, Farmacopea Europea), y documentación regulatoria (FDA, EMA, Ministerio de Salud) es parte central del entrenamiento farmacéutico. Esta habilidad facilita significativamente la interpretación de Fichas de Datos de Seguridad (FDS) y comprensión de sistemas como el GHS. Esto es particularmente útil cuando hay que interpretar FDS de 15 secciones para tomar decisiones sobre almacenamiento o respuesta ante derrames.

Un caso documentado de participación farmacéutica corresponde al trabajo de Solano-Solano (2012), quien describe que en el diseño del sistema de gestión de inventario del ITCR participaron técnicos con formación en tecnología farmacéutica. Estos profesionales implementaron protocolos de almacenamiento segregado basados en criterios de estabilidad química, aplicando principios similares a los utilizados en farmacias hospitalarias para la gestión de medicamentos termolábiles³¹.

Un ejemplo puede ser los reactivos sensibles a luz se trataron como medicamentos fotosensibles, reactivos higroscópicos se almacenaron con control de humedad (como tabletas que absorben humedad), el sistema FIFO (first in, first out) para rotación de

inventario Estos no son conceptos que típicamente se enseñan en química básica, pero son rutinarios en control de calidad farmacéutico.

En universidades estadounidenses existe el rol de "Chemical Hygiene Officer" (CHO), una persona designada responsable de supervisar cumplimiento de normativas de seguridad química en la institución y tradicionalmente este rol lo ocupan químicos, ingenieros químicos, o higienistas industriales. Kapin y Shariff (2011) argumentan que profesionales con formación toxicológica robusta (específicamente mencionando farmacéuticos clínicos) pueden desempeñar este rol efectivamente, especialmente en instituciones donde se manejan tanto reactivos químicos de investigación como sustancias farmacológicas controladas (narcóticos, psicotrópicos)¹¹².

Las competencias farmacéuticas útiles para este rol incluyen la gestión de sustancias controladas ya que los farmacéuticos tienen experiencia regulatoria en manejo de narcóticos y psicotrópicos (registro, almacenamiento seguro, auditoría, cumplimiento legal), el conocimiento de normativas sanitarias el profesional tiene familiaridad con Ministerio de Salud, procedimientos de inspección, requisitos documentales, la capacitación de personal debido a que tiene experiencia comunicando información técnica compleja a personal no especializado (como cuando capacitan a pacientes sobre medicamentos) y por último el profesional cuenta con la capacidad de identificar interacciones químicas problemáticas (como cuando evalúan interacciones medicamentosas).

Es fundamental ser honesto los farmacéuticos no reemplazan a químicos especializados en seguridad industrial, la formación farmacéutica tradicional generalmente no incluye estudios como de ingeniería de ventilación y diseño de sistemas HVAC, tratamiento de residuos químicos industriales a gran escala, química de materiales peligrosos de alto riesgo (explosivos, pirofóricos), técnicas avanzadas de síntesis química donde ocurren los riesgos. Por lo tanto, el rol óptimo del farmacéutico en gestión de reactivos académicos es complementario no sustitutivo.

Va a tener un funcionamiento mejor cuando el farmacéutico aporta conocimientos sobre toxicología, control de calidad, trazabilidad, cumplimiento normativo, el químico por

su lado aporta el conocimiento técnico de reactividad, síntesis, técnicas de laboratorio, y el ingeniero aporta con el diseño de infraestructura, ventilación, tratamiento de residuos. para así trabajar todos en equipo multidisciplinario.

En Costa Rica, donde recursos humanos especializados en seguridad química son limitados (como documentan Esquivel, 2021 y León Mora, 2021) aprovechar competencias de farmacéuticos graduados podría ser estratégico. Las facultades de farmacia de universidades públicas (UCR, UNA) y privadas (UIA, UCIMED, entre otras) forman cada año profesionales que podrían asumir roles de supervisión de seguridad química en laboratorios académicos, previa capacitación complementaria en sistemas de gestión ambiental (ISO 14001), seguridad industrial básica, interpretación de normativa específica de residuos peligrosos (Ley 8839).

Esta integración multidisciplinaria de farmacéuticos trabajando junto a químicos, biólogos, ingenieros y técnicos refleja la naturaleza inherentemente compleja de la seguridad química moderna. No es un problema que pueda resolver una sola profesión. Requiere conocimientos integrados de toxicología (farmacia), química aplicada (química), diseño de sistemas (ingeniería), normativa legal (derecho ambiental), y gestión de personas (administración)^{94,108}.

Estudios como los de Kou et al. (2022) sobre colaboración academia-industria para fortalecer cultura de seguridad demuestran que los modelos más exitosos son aquellos donde múltiples disciplinas aportan sus fortalezas específicas¹⁰⁸. El farmacéutico, en este contexto, aporta la perspectiva de ciencias de la salud aplicadas a sustancias químicamente activas, complementando perfectamente la perspectiva técnico-química tradicional.

Tabla 12. Comparación de sistemas de gestión de reactivos: teoría versus práctica en Costa Rica

Aspecto	Estándar internacional	Práctica en Costa Rica (hallazgos diagnósticos)	Brecha
---------	------------------------	---	--------

Clasificación de peligros	GHS completo en etiquetas legibles	30% sin FDS en español; 15% etiquetas obsoletas	Alto
Inventario digital	75-85% de universidades	Menos del 5% de universidades	Muy alto
Almacenamiento seguro	85-90% con armarios certificados	32% con armarios certificados	Alto
Separación por compatibilidad	Sistémica en el 90%+	45-55% cumplen	Alto
Acceso restringido	Sistema de permisos formal	15-20% sin restricción efectiva	Medio-alto
Capacitación inicial	Estructurada, documentada, práctica	Variable; a menudo solo teórica	Medio
Auditoría periódica	Anual o bianual	Casi nunca (excepto inspección de Salud)	Muy alto

Fuente: Síntesis de estudios diagnósticos costarricenses^{5,32}, versus literatura internacional 3,12,14,31,49,88

Aunque Costa Rica cuenta con normativa progresista y docentes conscientes de la importancia de la seguridad, las brechas en implementación sistemática son significativas comparadas con estándares internacionales. El desafío central no es "no saber qué hacer", sino "cómo hacerlo consistentemente con recursos limitados"

4.3 Gestión de residuos químicos peligrosos en entornos académicos

Hasta ahora hemos analizado los riesgos de intoxicación y cómo manejar reactivos correctamente, pero hay un tercer componente crítico: ¿qué pasa con los residuos químicos que se generan en laboratorios? Cada experimento produce desechos como solventes usados, soluciones que no se pueden reutilizar, frascos contaminados, residuos de síntesis. Si se manejan mal, estos residuos pueden ser tan peligrosos como los reactivos originales, o más.

En Costa Rica, la Ley 8839 establece obligaciones claras sobre gestión de residuos peligrosos. Pero como veremos, la normativa es una cosa y la práctica real es otra. Esta sección analiza cómo debería funcionar la gestión de residuos desde la segregación,

almacenamiento temporal, tratamientos previos hasta la disposición final, y estrategias para minimizar residuos desde el inicio.

4.3.1 Métodos de segregación y almacenamiento temporal

La segregación correcta es fundamental si se tiene un caso hipotético donde alguien mezcla en un mismo contenedor residuos de ácido sulfúrico con residuos de hidróxido de sodio. ¿Qué pasa? Una reacción exotérmica violenta que genera calor, gases, y potencialmente una explosión, o pueden mezclar solventes halogenados (como cloroformo) con solventes no halogenados (como acetona). ¿Hay problema? Necesitan tratamientos diferentes y mezclarlos complica la disposición final es por eso que los estudios internacionales insisten tanto en segregación, o es solo por orden es por seguridad y por cumplimiento legal.

Los 40 estudios revisados coinciden en que los residuos químicos de laboratorio deben segregarse en al menos seis categorías principales: ^{11,26,49,93, 105}.

1. Solventes orgánicos no halogenados: Acetona, etanol, metanol, tolueno, éter
2. Solventes orgánicos halogenados: Diclorometano, cloroformo, tetracloruro de carbono
3. Ácidos: Sulfúrico, clorhídrico, nítrico, acético
4. Bases: Hidróxido de sodio, hidróxido de potasio, amoníaco
5. Metales pesados: Residuos que contienen plomo, mercurio, cadmio, cromo
6. Residuos especiales: Peróxidos, cianuros, compuestos pirofóricos (cada uno en contenedor individual)

Algunos estudios proponen categorías más específicas, pero estas son las mínimas que todos recomiendan.

Benavides et al. (2016) evaluaron la gestión de residuos en la Universidad Nacional y encontraron que solo el 45% de los residuos se segregaban correctamente¹¹. Los problemas más comunes son la mezcla de solventes halogenados y no halogenados (28% de los casos), residuos de ácidos y bases en contenedores sin identificación clara (22%) , falta de

contenedores específicos para metales pesados (35% de laboratorios), residuos sólidos contaminados (como papel filtro, guantes) mezclados con líquidos.

León Mora (2021) en la UCR encontró situaciones similares. Observó que el 30% de contenedores de residuos no tenían etiquetas, o las etiquetas estaban tan ilegibles que nadie sabía qué había adentro³². Cuando preguntó por qué, las respuestas incluían: "No tenemos suficientes contenedores específicos", "Los estudiantes no siempre leen las etiquetas", "Falta supervisión constante".

Una vez segregados, los residuos necesitan almacenarse temporalmente hasta que se recolectan para disposición final. Los estándares internacionales establecen que estos espacios deben cumplir varios requisitos como área dedicada y señalizada, ventilación adecuada, piso impermeable, acceso restringido, extintor apropiado, contenedores compatibles (Plástico resistente (polietileno de alta densidad) para la mayoría, vidrio solo para ciertos ácidos).

En universidades estadounidenses y europeas, esto está estandarizado. Reina y Reina (2021) documentan que el 82% de laboratorios españoles tenían áreas de almacenamiento temporal que cumplían estos criterios¹⁴. En Costa Rica, la situación es diferente. Esquivel (2021) reporta que solo el 40% de laboratorios del ITCR tenían un área dedicada para almacenamiento temporal de residuos⁵. El resto almacenaba residuos en armarios regulares, bajo mesones, o en pasillos. León Mora (2021) en la UNA encontró que el 25% de contenedores de residuos estaban hechos de materiales no apropiados (botellas de refresco reutilizadas, recipientes de plástico delgado que podían romperse fácilmente)³².

Un problema recurrente documentado en múltiples estudios es el almacenamiento prolongado de residuos peligrosos. Diversos autores recomiendan que la recolección se realice cada 1 a 2 meses como máximo^{26,32,93,105, 101}. Sin embargo, según la normativa costarricense vigente (Ley 8839 y Reglamento RTCR 481:2015), todo ente generador de residuos debe contar con un contrato con un gestor autorizado o servir el mismo como gestor certificado. Cuando las universidades enfrentan dificultades presupuestarias para pagar estos servicios o carecen del contrato correspondiente, los residuos se acumulan durante períodos

prolongados, en ocasiones semestres o cuatrimestres completos. León Mora (2021) identificó contenedores con residuos almacenados durante más de un año en la UNA^(A2). Esta situación representa un riesgo significativo, ya que ciertos residuos se degradan con el tiempo y aumentan su peligrosidad; por ejemplo, el éter dietílico puede formar peróxidos explosivos si permanece almacenado durante períodos extendidos.

4.3.2 Estrategias de neutralización y tratamiento previo

No todos los residuos químicos necesitan tratamiento previo, hay muchos que pueden entregarse directamente a un gestor autorizado que se encarga de tratarlos o incinerarlos. Pero hay casos donde hacer un tratamiento previo en el laboratorio es más seguro, más barato, o legalmente requerido.

Nash et al. (2010) y de Oliveira et al. (2021) describen varios métodos de tratamiento previo que son seguros y viables en contextos académicos. Entre estos se encuentra la neutralización de ácidos y bases, donde los ácidos diluidos pueden neutralizarse con bicarbonato de sodio o hidróxido de sodio diluido hasta alcanzar un pH entre 6 y 8. Una vez neutralizados, y en ausencia de otros químicos peligrosos, estos efluentes pueden descargarse al alcantarillado según la normativa costarricense, que permite disposición por esta vía siempre que el pH se encuentre entre 6 y 9. Otro método aplicable es la precipitación de metales pesados, donde las soluciones que contienen metales pueden tratarse con sulfuro de sodio o hidróxido para precipitar el metal; posteriormente, el sólido se filtra, se seca y se entrega como residuo sólido a un gestor autorizado.

Otras técnicas aplicables incluyen la destilación para recuperar solventes orgánicos simples, tales como acetona, etanol y tolueno, siempre que no se encuentren altamente contaminados. El solvente recuperado puede reutilizarse en nuevos procedimientos, lo que reduce significativamente los costos de adquisición de reactivos y el volumen de residuos generados. Asimismo, la oxidación química permite tratar compuestos orgánicos tóxicos mediante agentes oxidantes como permanganato de potasio o peróxido de hidrógeno, transformando moléculas complejas en productos menos peligrosos como dióxido de carbono y agua.

En la literatura se indica que su aplicación suele ser parcial y depende de la supervisión disponible, tal como se relaciona con el segundo objetivo, que busca descubrir las recomendaciones sobre clasificación y manejo seguro de reactivos y residuos^{98, 101}.

En Costa Rica, Benavides et al. (2016) reportan que la UNA intentó implementar neutralización de ácidos/bases en laboratorios, pero solo funcionó consistentemente en el 55% de los casos.¹¹ ¿Por qué? Quizás por falta de supervisión, estudiantes que no sabían cómo hacerlo correctamente, y ocasionalmente neutralizaciones incorrectas que causaban más problemas.

Nolasco et al. (2006) documentan un incidente en Brasil donde estudiantes intentaron neutralizar ácido sulfúrico concentrado agregando hidróxido de sodio directamente sin diluir primero²⁶. El resultado fue una reacción violenta que generó salpicaduras y quemaduras y el punto es los tratamientos previos son útiles, pero solo si se hacen correctamente bajo supervisión no debería ser algo que estudiantes sin experiencia hagan solos.

4.3.3 Disposición final conforme a normativas (Ley 8839)

El marco legal costarricense en materia de gestión de residuos químicos peligrosos está constituido por la Ley 8839 de 2010 sobre Gestión Integral de Residuos, la cual establece normativamente que todos los residuos peligrosos generados en laboratorios académicos deben ser entregados a gestores autorizados por el Ministerio de Salud. La disposición al drenaje, entierro, incineración in situ o cualquier forma no autorizada de disposición está expresamente prohibida en el territorio nacional y su incumplimiento conlleva sanciones administrativas y legales para las instituciones responsables.

El Reglamento Técnico RTCR 481:2015 complementa la legislación, especificando los procedimientos de clasificación, etiquetado y documentación de residuos. Conforme a este reglamento, cada universidad está obligada a contar con al menos un contrato activo con un gestor autorizado para la recolección regular de residuos, así como a disponer de registros detallados y actualizados de los volúmenes y tipos de residuos entregados.

En la práctica, sin embargo, existen importantes brechas entre la normativa y la implementación institucional. Por ejemplo, León Pocasangre et al. (2020) observaron que, aunque el 85% de las universidades consultadas en El Salvador reportaron conocimiento de la obligatoriedad legal, únicamente el 42% mantenía contratos activos con gestores autorizados, citando como principales obstáculos el alto costo de la disposición (oscila entre \$2 y \$5 USD por kilogramo de residuo peligroso), la complejidad de los trámites administrativos y la falta de presupuesto asignado específicamente para este fin ⁹³.

Consecuentemente, la acumulación de residuos durante semestres completos es una práctica frecuente, incrementando el riesgo de incidentes por almacenamiento prolongado. En el caso costarricense, Benavides Benavides et al. (2016) documentaron que la Universidad Nacional realizaba entregas a gestores autorizados aproximadamente cada 6 a 8 meses, lo que resultaba en la acumulación continua de volúmenes considerables de residuos en los laboratorios y bodegas institucionales ¹¹.

Por otro lado, Esquivel Garita (2021) reportó que algunos laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica no habían realizado entrega formal de residuos en más de un año⁵. La legislación costarricense también exige el mantenimiento riguroso de documentación para la cadena de custodia esto quiere decir que cada entrega debe ir acompañada de manifiestos de transporte, certificados de destrucción o tratamiento y registros detallados. León Mora (2021) halló que el 68% de los laboratorios evaluados en la Universidad de Costa Rica no conservaban un registro completo de las entregas, reflejando debilidades institucionales en la gestión documental³².

Ante una inspección del Ministerio de Salud, la ausencia de estos documentos constituye una violación que puede ser sancionada con multas y restricciones operativas. A nivel internacional, el cumplimiento es más estricto y sistematizado en universidades estadounidenses y europeas. Estas instituciones suelen contar con departamentos especializados de Environmental Health & Safety, que programan recolecciones de residuos mensualmente, mantienen registros digitalizados y someten sus procesos a auditorías internas y externas regulares ¹⁰⁸.

Como referencia, Kou et al. (2022) describen la implementación de sistemas digitales de solicitud y rastreo de recolección (incluyendo códigos QR en cada laboratorio), lo que permite una trazabilidad absoluta y reducción del riesgo administrativo. En resumen, si bien la legislación y la normativa técnica existente en Costa Rica son consistentes con los estándares internacionales, la brecha radica en la implementación operativa y en la asignación efectiva de recursos financieros y humanos para garantizar la disposición final adecuada de los residuos peligrosos generados en laboratorios académicos.

4.3.4 Prácticas de minimización y química verde

La gestión moderna de residuos químicos en laboratorios académicos no debe limitarse únicamente al tratamiento y disposición final de los mismos, sino que debe incorporar estrategias preventivas enfocadas en la minimización de su generación. El principio rector de la “química verde” establece que el mejor residuo es aquel que no se genera, proponiendo una jerarquía de opciones que priorizan la prevención, minimización, reutilización, reciclaje y, solo finalmente, la disposición controlada de desechos peligrosos^{26,97,100}.

Los principios de química verde, originalmente desarrollados para su aplicación en la industria, han demostrado ser adaptables a contextos educativos universitarios. Gutiérrez et al. (2020) describen la implementación de un “laboratorio verde” en el cual los experimentos se rediseñaron para utilizar de un 50% a un 75% menos de reactivos, sustituyéndose solventes tóxicos por alternativas menos peligrosas, como etanol en lugar de benceno o agua en lugar de solventes orgánicos siempre que fuera viable¹⁰⁰.

Asimismo, aquellas prácticas docentes que originalmente generaban residuos de alta peligrosidad fueron reemplazadas por procedimientos equivalentes menos contaminantes, sin el deterioro del aprendizaje de los estudiantes. Esta orientación hacia la minimización se tradujo en resultados concretos como la reducción del volumen total de residuos peligrosos excedió el 65% y los costos asociados a su disposición disminuyeron más de un 40%.

Además, la percepción de los estudiantes respecto a la sostenibilidad de sus actividades experimentales mejoró notablemente. La reducción del volumen de desechos

peligrosos puede lograrse también mediante el rediseño de prácticas a microescala. Nash et al. (2010) documentan que la reducción del tamaño de las muestras en experimentos clásicos de química orgánica, por ejemplo, disminuye hasta en un 90% la cantidad de residuos generados, sin sacrificar los conceptos pedagógicos fundamentales ¹⁰⁵.

Sin embargo, esta estrategia exige la adquisición de material especializado para microescala y la capacitación docente para adaptar protocolos, representando una inversión inicial significativa. Otras estrategias ampliamente documentadas incluyen la recuperación y reutilización de solventes por destilación, la sustitución planificada de reactivos peligrosos por alternativas menos tóxicas, la neutralización in situ de ácidos y bases, la adquisición “just-in-time” de solo los insumos estrictamente necesarios y la reutilización planificada de reactivos entre prácticas experimentales ^{32, 11, 105, 97, 98, 100, 92, 31, 26}.

En el contexto latinoamericano y costarricense, Benavides Benavides et al. (2016) señalan que las universidades nacionales han realizado esfuerzos iniciales en la incorporación de química verde en laboratorios docentes, si bien la adopción plena es aún limitada debido a barreras presupuestarias, resistencia al cambio por parte de personal experimentado y la necesidad de tiempo curricular adicional para rediseño de prácticas ¹¹. León Mora (2021) documenta que una propuesta de recuperación sistemática de solventes en la Universidad de Costa Rica no se implementó por limitaciones presupuestarias para la adquisición e instalación de equipos de destilación ³².

Finalmente, la Tabla 9 sintetiza las estrategias documentadas en la literatura para la minimización de residuos, detallando el impacto potencial, la dificultad de implementación y los estudios en que se respaldan.

Tabla 13. Estrategias de minimización de residuos químicos en laboratorios académicos

Estrategia	Reducción de residuos documentada	Costo de implementación	Dificultad	Estudios que lo reportan
Experimentos a microescala	80-90%	Alto (material nuevo)	Media	A18, A28
Sustitución de reactivos peligrosos	40-60%	Bajo	Media	A26, A28
Recuperación de solventes por destilación	65-75%	Medio (\$2-3k USD)	Media-Alta	A26, A27
Neutralización in-situ de ácidos y bases	30-40%	Bajo	Baja	A18, A27, A37
Compra just-in-time	20-30%	Bajo	Baja	A2, A32, A33
Reutilización de reactivos entre prácticas	15-25%	Bajo	Media	A3, A27

Fuente: Síntesis de estudios que evaluaron estrategias de minimización de residuos ^{32, 11,}
105, 97, 98, 100, 92, 31, 26.

Las estrategias de minimización presentadas en esta tabla responden integralmente a los tres objetivos específicos de la investigación: al identificar las actividades que generan mayor volumen de residuos peligrosos y los riesgos asociados (primer objetivo), al describir las recomendaciones internacionales sobre disposición de residuos basadas en evidencia, y al examinar buenas prácticas aplicables como la química verde, los experimentos a microescala y la sustitución de reactivos.

Es particularmente relevante observar que las estrategias más eficaces como la reducción a microescala (80-90%) y sustitución de reactivos (40-60%) requieren inversiones iniciales y adaptación curricular que no siempre resultan factibles en universidades con recursos limitados. Este hallazgo tiene implicaciones directas para el contexto costarricense, donde la selección de enfoques óptimos debe balancear el impacto ambiental con la viabilidad institucional y docente.

4.4 Estrategias de prevención y cultura de seguridad

Esta sección responde centralmente al tercer objetivo específico, que busca examinar buenas prácticas de seguridad química y su aplicabilidad para la elaboración de protocolos de prevención de intoxicaciones en contextos educativos.

Las estrategias de prevención trascienden los aspectos técnicos de manejo de reactivos y residuos para abordar los componentes humanos y organizacionales que determinan la efectividad de cualquier sistema de seguridad. La evidencia internacional converge en que la prevención efectiva requiere la integración de cuatro pilares: programas de capacitación que modifiquen conductas, infraestructura y equipamiento funcional y mantenido, protocolos de emergencia conocidos y practicados, y factores organizacionales que favorezcan una cultura institucional de seguridad. Cada uno de estos componentes se analiza considerando su aplicabilidad al contexto de laboratorios académicos costarricenses.

4.4.1 Programas de capacitación efectivos

La literatura converge consistentemente en que la capacitación del personal académico, técnico y estudiantil constituye el pilar fundamental para una prevención sostenida de incidentes. Este hallazgo responde directamente al tercer objetivo específico, que examina buenas prácticas de seguridad química aplicables a la elaboración de protocolos de prevención, posicionando la formación continua como estrategia prioritaria para reducir los riesgos de intoxicación identificados en el primer objetivo⁵⁴.

En el contexto costarricense, León Mora (2021) reportó que, aunque la capacitación se ofrecía en la mayoría de laboratorios, su ejecución era predominantemente teórica, sin prácticas demostrativas ni evaluaciones posteriores de competencias adquiridas³². Las mejores prácticas documentadas exigen retroalimentación periódica al personal, revisión continua de protocolos y la inclusión de simulacros de emergencia como parte rutinaria de la formación.

La renovación anual de certificaciones en seguridad química y la actualización de contenidos a partir de incidentes recientes locales o internacionales fomenta un aprendizaje adaptativo y evita la “normalización de desviaciones” en el comportamiento cotidiano del laboratorio^{109,110}.

4.4.2 Infraestructura y equipamiento necesario

La existencia de una infraestructura adecuada y de equipo de protección personal (EPP) en cantidad y calidad suficientes es una condición indispensable, aunque no suficiente, para la implementación exitosa de las estrategias preventivas. Estudios internacionales resaltan la importancia de sistemas de ventilación funcional, extremo cuidado en la selección de material de vidrio y plástico resistente a productos químicos, la disponibilidad permanente de duchas y lavaojos de emergencia certificados, y la existencia de armarios especiales para almacenamiento seguro^{7,22,49,89}.

La evidencia demuestra que la deficiencia en cualquiera de estos componentes aumenta exponencialmente el riesgo de incidentes severos y dificulta la respuesta oportuna ante emergencias^{5,32,36}. En Costa Rica, la brecha entre normativa y realidad persiste, siendo frecuente la identificación de equipamientos fuera de servicio, con mantenimiento insuficiente o con ubicaciones que dificultan su acceso inmediato^{5,32}.

4.4.3 Protocolos de emergencia y respuesta

La gestión institucional de la respuesta a emergencias químicas exige la existencia de protocolos específicos, actualizados y conocidos por todos los usuarios habituales. Fatemi et al. (2022) documentan que los laboratorios con mejores índices de respuesta ante accidentes cuentan con protocolos escritos accesibles, señalización clara, roles previamente asignados durante emergencias y simulacros funcionales realizados al menos semestralmente⁵⁴.

La comunicación eficiente durante una emergencia resulta ser tan crucial como la infraestructura. Esquivel Garita (2021) halló que una parte significativa del personal no conocía la localización de duchas y lavaojos, mientras que Benavides Benavides et al. (2016) señalaron la ausencia de protocolos específicos para situaciones de derrame masivo, inhalación aguda o exposición cutánea grave^{5,76}. Se recomienda la integración de

herramientas tecnológicas para la notificación y activación de protocolos, así como la capacitación recurrente en primeros auxilios químicos específicos, acorde con la naturaleza de las sustancias manipuladas ^{93,109}.

4.4.4 Factores que favorecen u obstaculizan la implementación

Numerosos estudios internacionales y nacionales subrayan la importancia de factores organizativos, socioculturales y económicos para la configuración exitosa o el fracaso de la cultura de seguridad en laboratorios académicos. Como factores facilitadores destacan el compromiso explícito de la alta dirección institucional, la asignación de recursos financieros protegidos para seguridad, la existencia de equipos multidisciplinarios de gestión (incluyendo profesionales con experiencia en toxicología, control de calidad y gestión ambiental), y la evaluación periódica de indicadores cuantitativos y cualitativos relacionados con prácticas seguras ^{94,107,109,118}.

En contraste, los principales obstáculos observados son la alta rotación de estudiantes y técnicos, la ausencia de incentivos para el cumplimiento sostenido de las prácticas seguras, la insuficiencia de presupuesto para infraestructura y materiales de recambio, y el escaso reconocimiento institucional de roles clave como el de “Chemical Hygiene Officer” o coordinador de seguridad química ^{9,93,110,113}.

En el ámbito costarricense, estudios recientes sugieren que el aprovechamiento de competencias profesionales provenientes del área de farmacia podría aportar valor a la construcción de una cultura de seguridad más robusta, particularmente en lo relativo a la gestión documental, control de calidad y capacitación sobre riesgos toxicológicos ^{31,93}.

En síntesis, la construcción de una cultura de seguridad química sostenible en laboratorios académicos no depende exclusivamente de la existencia de normativas, infraestructura o equipamiento, sino de la integración sistémica de capacitación continua, liderazgo institucional comprometido, asignación presupuestaria protegida y equipos multidisciplinarios que incluyan competencias en toxicología, química aplicada y gestión ambiental.

Los estudios revisados demuestran que las instituciones con mejores indicadores de seguridad son aquellas que han institucionalizado estos componentes como prioridad estratégica permanente, superando así las limitaciones inherentes a la alta rotación de personal estudiantil y a las restricciones presupuestarias características del contexto latinoamericano ^{94,109,107}.

4.5 Síntesis integradora de hallazgos

El análisis detallado presentado en las secciones 4.1 a 4.4 ha desarrollado sistemáticamente cada dimensión de la gestión de seguridad química en laboratorios académicos. Esta sección sintetiza explícitamente cómo los hallazgos responden a cada objetivo específico planteado, facilitando la trazabilidad entre las preguntas de investigación iniciales y las evidencias documentales analizadas.

Respecto al primer objetivo, identificar los riesgos más frecuentes de intoxicación por sustancias químicas mal gestionadas, la revisión documental evidencia que los compuestos orgánicos volátiles (35-42% de incidentes), ácidos y bases concentrados (25-30%), y gases tóxicos e irritantes (12-18%) constituyen las principales fuentes de intoxicación aguda. La vía de exposición predominante es la inhalación (58-65% de casos), seguida por contacto dérmico (28-35%) e ingestión accidental (<3%). Los factores de riesgo se distribuyen en tres categorías: humanos (desconocimiento, normalización de desviaciones), técnicos (ventilación deficiente, infraestructura inadecuada) y organizacionales (supervisión insuficiente, presión temporal, restricciones presupuestarias).

En relación con el segundo objetivo, describir las recomendaciones internacionales sobre manejo de reactivos y residuos, la literatura documenta que el Sistema Globalmente Armonizado (GHS) constituye el estándar obligatorio para clasificación y etiquetado. Los sistemas digitales de gestión de inventarios reducen significativamente incidentes relacionados con reactivos vencidos y almacenamiento incompatible. Las condiciones de almacenamiento seguro exigen segregación por compatibilidad química, ventilación, contenedores certificados, control ambiental y acceso restringido. Respecto a residuos, la jerarquía universalmente aceptada prioriza: prevención/minimización,

reutilización/recuperación, tratamiento previo seguro, y disposición final mediante gestores autorizados con documentación de trazabilidad.

Finalmente, respecto al tercer objetivo, examinar buenas prácticas aplicables a protocolos preventivo, la evidencia indica que las instituciones con mejores indicadores integran cinco componentes: capacitación continua con evaluación de competencias, infraestructura funcional y mantenida, cultura institucional que priorice seguridad, equipos multidisciplinarios, y sistemas de reporte no punitivo que fomenten aprendizaje organizacional. Las estrategias de química verde (microescala, sustitución de reactivos) demuestran reducciones de 65-90% en residuos peligrosos, constituyendo la aproximación preventiva más eficaz documentada.

4.5.1 Respuesta explícita a los objetivos específicos

El análisis sistemático de 32 de los 40 estudios incluidos que abordan específicamente intoxicaciones químicas permite concluir que los compuestos orgánicos volátiles (COV) constituyen la principal causa de intoxicación aguda en laboratorios académicos a nivel global, representando entre el 35% y el 42% de los incidentes reportados^{3,50}. Dentro de esta categoría, acetona, metanol, diclorometano, cloroformo y tolueno emergen como los agentes más frecuentemente implicados, dada su amplia utilización en prácticas de química orgánica, analítica y bioquímica.

La vía de exposición predominante es la inhalación (45-58% de los casos), seguida por contacto dérmico (25-35%) y contacto ocular (8-12%). La ingestión accidental, aunque infrecuente (menos del 3%), constituye un indicador de fallas críticas en la cultura de seguridad^{3,14,22,50,89}. Los factores de riesgo identificados se agrupan en tres categorías interdependientes factores humanos (desconocimiento de riesgos específicos, normalización de desviaciones, presión temporal), factores técnicos (ventilación deficiente, equipo de protección inadecuado, equipos de emergencia no funcionales) y factores organizacionales (alta rotación de usuarios, grupos elevados estudiante-supervisor, insuficiencia presupuestaria crónica).

En el contexto costarricense específicamente, los estudios diagnósticos revelan que, aunque la naturaleza de los riesgos químicos es universal, las deficiencias de infraestructura son significativamente más pronunciadas casi el 32-40% de laboratorios carecen de ventilación mecánica funcional o armarios de seguridad certificados, en comparación con 8-12% en universidades estadounidenses ^{5,32,50,89}.

La literatura convergió en la identificación del Sistema Globalmente Armonizado (GHS) como el estándar internacional obligatorio para clasificación y etiquetado de sustancias químicas peligrosas. Su implementación correcta requiere no solo la actualización de etiquetas físicas, sino la capacitación sistemática de usuarios en la interpretación de pictogramas y consejos de prudencia ^{12,50}. En materia de control de inventarios, los estudios documentan que los sistemas digitales de gestión reducen significativamente la tasa de incidentes relacionados con reactivos vencidos, almacenamiento incompatible y pérdida de trazabilidad.

Sin embargo, su implementación en universidades con recursos limitados enfrenta barreras económicas y de capacitación técnica ^{14,31,93}. Las condiciones de almacenamiento seguro exigen segregación por compatibilidad química, ventilación adecuada de áreas de almacenamiento, contenedores certificados, control de temperatura y luz, y restricción de acceso a personal autorizado. La evidencia demuestra que el cumplimiento parcial de estos principios incrementa exponencialmente el riesgo de reacciones no deseadas y exposiciones accidentales ^{3,50,12}.

Respecto a la gestión de residuos, la jerarquía universalmente aceptada prioriza de mayor a menor el siguiente orden; prevención y minimización, reutilización y recuperación, tratamiento previo cuando sea seguro, y disposición final mediante gestores autorizados con documentación completa de cadena de custodia. La química verde emerge como estrategia de largo plazo más eficaz que el tratamiento posterior de residuos, con reducciones documentadas de hasta 65-90% en volumen de desechos peligrosos cuando se implementan experimentos a microescala y sustitución de reactivos tóxicos ^{26,106,98,101}.

El análisis reveló que las buenas prácticas documentadas trascienden la mera existencia de protocolos escritos, requiriendo tres componentes interdependientes primero, capacitación efectiva que combine instrucción teórica, talleres prácticos y simulaciones de escenarios reales, con evaluaciones periódicas de competencias adquiridas y actualización continúa basada en lecciones aprendidas de incidentes locales e internacionales ^{89,90,95}.

Segundo, infraestructura funcional y mantenida que incluya sistemas de ventilación certificados, equipos de emergencia accesibles y operativos, armarios de seguridad apropiados y equipo de protección personal adecuado para cada tipo de sustancia manipulada. La evidencia demuestra que la inversión preventiva en infraestructura se amortiza mediante la reducción de costos asociados a incidentes (cada incidente cuesta entre \$5,000 y \$15,000 USD en limpieza, reparaciones y días de laboratorio cerrado) ⁸⁹.

Tercero, cultura institucional que posicione la seguridad como prioridad estratégica permanente, con asignación presupuestaria protegida, designación de responsables específicos (como el "Chemical Hygiene Officer"), equipos multidisciplinarios que integren competencias en toxicología, química, ingeniería y gestión ambiental, y sistemas de reporte no punitivo que fomenten el aprendizaje organizacional ^{95,107,109}.

4.5.2 Modelo conceptual de gestión integral

El análisis comparativo de los 40 estudios incluidos permite identificar tres patrones transversales que trascienden contextos geográficos, niveles de desarrollo económico y tipos de instituciones, el patrón número uno es la infraestructura la cual es una condición necesaria pero insuficiente.

Múltiples estudios documentan casos de instituciones con infraestructura de primer nivel que continúan experimentando tasas elevadas de incidentes debido a deficiencias en capacitación o cultura organizacional. Inversamente, algunas instituciones con infraestructura limitada logran indicadores de seguridad aceptables mediante capacitación rigurosa, supervisión estrecha y compromiso institucional sostenido ^{95,110}. Este patrón sugiere que la seguridad química es fundamentalmente un problema de gestión de personas y procesos, no solo de inversión en equipamiento.

El patrón número dos indica que la capacitación teórica no garantiza cambio conductual sostenido, diversos estudios que incluyeron observación directa de comportamiento en laboratorios reportan que usuarios capaces de describir verbalmente procedimientos correctos de seguridad no necesariamente los aplican en la práctica cotidiana, especialmente cuando perciben presión temporal o cuando las tareas se vuelven rutinarias. Este fenómeno, denominado "normalización de la desviación", indica que la capacitación efectiva debe incluir componentes prácticos, refuerzo periódico y consecuencias institucionales consistentes para el incumplimiento ^{32,96,110}.

Y el patrón número 3 es la cultura institucional llega a superar a las normativas escritas, en todos los contextos estudiados, la existencia de normativas formales de seguridad no predice su cumplimiento efectivo. Las instituciones con mejor desempeño son aquellas donde el liderazgo académico y administrativo comunica explícitamente que la seguridad es una prioridad no negociable, asigna recursos protegidos, reconoce y premia el cumplimiento, y establece consecuencias claras para desviaciones. La cultura informal transmitida por docentes y técnicos experimentados influye más en el comportamiento estudiantil que los manuales institucionales ^{90,95,107,109}.

4.5.3 Implicaciones para el contexto costarricense

Los tres estudios diagnósticos costarricenses incluidos en esta revisión ^{5,32,76} revelan que, aunque la naturaleza química de los riesgos es universal, existen brechas significativas en la implementación de estándares internacionales, como la brecha de infraestructura (magnitud alta) donde la proporción de laboratorios académicos costarricenses que carecen de infraestructura esencial (ventilación mecánica funcional, armarios de seguridad certificados, duchas y lavaojos operativos) es de 28 a 32 puntos porcentuales superior a la documentada en universidades estadounidenses y europeas. Esta brecha refleja restricciones presupuestarias institucionales crónicas y priorización de inversiones en equipamiento analítico sobre infraestructura de seguridad ^{5,32}.

En cuanto a la brecha de sistematización (magnitud muy alta) esta indica que mientras el 75-85% de universidades en países desarrollados utilizan sistemas digitales para gestión

de inventarios, trazabilidad de reactivos y documentación de residuos, menos del 5% de laboratorios costarricenses cuentan con estas herramientas. La dependencia de registros manuales limita la auditoría, facilita errores de documentación y dificulta la continuidad operativa ante rotación de personal técnico ^{14,31,93}.

Y por último la brecha de sostenibilidad institucional (magnitud media-alta), la misma indica la alta rotación de técnicos de laboratorio con contratos temporales, la ausencia de roles institucionalizados equivalentes al "Chemical Hygiene Officer", y la irregularidad en asignación presupuestaria para seguridad química dificultan la consolidación de sistemas de gestión sostenibles en el tiempo ^{5,31,32}.

Una particularidad adicional del contexto latinoamericano es la limitada disponibilidad de Fichas de Datos de Seguridad (FDS) en idioma español, especialmente para reactivos de proveedores pequeños, lo cual constituye una barrera de acceso a información crítica durante emergencias³². No obstante, estas brechas, el marco normativo costarricense (Ley 8839, Reglamento RTCR 481:2015) es consistente con estándares internacionales. El desafío central no reside en ausencia de conocimiento sobre qué debe hacerse, sino en la movilización de recursos y voluntad institucional para implementación sistemática y sostenida.

4.5.4 Implicaciones para la formación y práctica profesional farmacéutica

El análisis realizado desde la perspectiva de las ciencias farmacéuticas revela oportunidades específicas para la contribución de profesionales con esta formación a la gestión de seguridad química en laboratorios académicos, particularmente en contextos con recursos humanos especializados limitados como el costarricense.

La formación farmacéutica en farmacología y toxicología proporciona comprensión profunda de mecanismos de acción tóxica, farmacocinética de sustancias químicas, interacciones y manejo clínico de intoxicaciones. Esta competencia facilita la evaluación de riesgos específicos, la selección apropiada de medidas de protección y la respuesta fundamentada ante exposiciones accidentales. Los estudios que compararon percepción de

riesgos entre estudiantes con y sin formación toxicológica documentan mejor identificación de peligros en aquellos con entrenamiento farmacológico ⁹⁶.

Los farmacéuticos están entrenados en sistemas de gestión de inventarios con trazabilidad completa, verificación de identidad de productos, control de caducidades y documentación de cadenas de custodia, competencias directamente transferibles a la gestión de reactivos químicos. Los casos documentados de implementación exitosa de sistemas de gestión en instituciones costarricenses destacan la participación de profesionales con formación en control de calidad farmacéutico ^{31,93}.

En cuanto a la experiencia farmacéutica en el manejo regulatorio de narcóticos y psicotrópicos (registro, almacenamiento seguro, auditoría, cumplimiento legal) constituye un modelo aplicable a la gestión de reactivos químicos de alto riesgo en laboratorios académicos ¹¹³. Y la evidencia revisada sugiere que los modelos más exitosos de gestión de seguridad química son aquellos que integran múltiples disciplinas, cada una aportando competencias específicas: toxicología y control de calidad (farmacia), reactividad química y técnicas de laboratorio (química), diseño de infraestructura y tratamiento de residuos (ingeniería), y cumplimiento normativo (gestión ambiental).

En el contexto costarricense, donde la designación de "Chemical Hygiene Officers" es prácticamente inexistente, la incorporación de farmacéuticos en equipos de gestión de seguridad podría representar una estrategia viable para fortalecer capacidades institucionales ^{31,93,95,109}. En los programas de formación farmacéutica podrían incorporar módulos específicos sobre gestión de seguridad química y residuos peligrosos, preparando a futuros profesionales para roles de supervisión en laboratorios académicos, farmacias hospitalarias, industria farmacéutica y organismos regulatorios.

La síntesis presentada evidencia que la gestión efectiva de seguridad química en laboratorios académicos requiere una aproximación sistémica que integre infraestructura adecuada, capacitación efectiva, cultura institucional sólida y equipos multidisciplinarios con competencias complementarias. Los hallazgos documentados en este capítulo proporcionan la base empírica para las conclusiones y recomendaciones específicas que se desarrollarán

en el Capítulo V, incluyendo propuestas aplicables al contexto costarricense que consideren tanto las limitaciones presupuestarias como las oportunidades de aprovechamiento de competencias profesionales disponibles, particularmente aquellas provenientes de las ciencias farmacéuticas.

CAPÍTULO V- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este capítulo final presenta las conclusiones derivadas del análisis bibliográfico de 40 estudios sobre gestión de seguridad química en laboratorios académicos, integra las limitaciones metodológicas reconocidas y propone recomendaciones específicas aplicables al contexto costarricense. La estructura responde directamente a los objetivos planteados en el Capítulo I y se fundamenta en la síntesis integradora desarrollada en la sección 4.5 del Capítulo IV.

5.1 Conclusiones generales

La presente investigación permite responder a la pregunta central planteada: las estrategias más efectivas para prevenir intoxicaciones en laboratorios académicos, según la literatura científica, son aquellas que integran de manera coherente cinco componentes: capacitación práctica continua, infraestructura funcional, sistemas documentados de gestión, cultura institucional de seguridad y equipos multidisciplinarios.

El hallazgo principal de esta revisión es que la existencia de normativas y protocolos no garantiza su cumplimiento efectivo. Las instituciones con mejores indicadores de seguridad no son necesariamente las de mayor presupuesto, sino aquellas donde el liderazgo institucional comunica explícitamente que la seguridad es una prioridad no negociable y donde la cultura informal transmitida por docentes y técnicos experimentados refuerza en lugar de contradecir los protocolos escritos.

Para el contexto costarricense, esta conclusión tiene implicaciones directas como las universidades nacionales cuentan con el marco normativo necesario (Ley 8839, RTCR 478 y 481), pero enfrentan una brecha significativa entre la teoría y la práctica. El desafío principal no es la ausencia de conocimiento sobre qué hacer, sino la movilización consistente de recursos y voluntad institucional para implementar sistemáticamente las buenas prácticas documentadas en la literatura internacional.

Los factores de riesgo documentados se distribuyen en tres categorías humanas (desconocimiento, normalización de desviaciones, presión temporal), técnicos (infraestructura deficiente) y organizacionales (alta rotación de personal, personal insuficiente de supervisión, insuficiencia presupuestaria).

En el contexto costarricense específicamente, aunque el marco normativo nacional (Ley 8839, Reglamento RTCR 481:2015) es consistente con estándares internacionales, existen brechas significativas en la implementación práctica. Los estudios diagnósticos realizados en el ITCR, UCR y UNA revelan que entre el 28% y el 40% de laboratorios académicos carecen de infraestructura esencial como ventilación mecánica funcional, armarios de seguridad certificados o equipos de emergencia operativos, cifras que contrastan marcadamente con el 8-12% reportado en universidades estadounidenses y europeas.

Asimismo, la sistematización digital de inventarios y residuos es prácticamente inexistente en instituciones costarricenses (menos del 5% implementado), mientras que en países desarrollados supera el 75-85%.

El análisis realizado desde la perspectiva de las ciencias farmacéuticas reveló oportunidades específicas para la contribución de profesionales con esta formación a la gestión de seguridad química, particularmente en contextos con recursos humanos especializados limitados. Las competencias farmacéuticas en toxicología aplicada, control de calidad, trazabilidad de sustancias controladas y gestión documental representan un complemento valioso a los equipos tradicionalmente conformados exclusivamente por químicos e ingenieros.

Finalmente, se concluye que el desafío central para las universidades costarricenses no reside en ausencia de conocimiento sobre qué debe hacerse (la literatura internacional es abundante y accesible), sino en la movilización efectiva de recursos financieros, humanos y organizacionales para implementación sistemática, sostenida y auditable de las buenas prácticas documentadas.

5.2 Conclusiones específicas

5.2.1 Sobre caracterización de riesgos de intoxicación química

Los riesgos de intoxicación química en laboratorios académicos son predecibles y prevenibles. La mayoría de las intoxicaciones agudas involucran un grupo reducido de sustancias de uso común (solventes orgánicos volátiles, ácidos y bases concentrados, gases

tóxicos), lo que significa que las intervenciones preventivas pueden focalizarse estratégicamente.

El predominio de la inhalación como vía de exposición indica que la ventilación constituye el factor técnico más crítico para la prevención. Esto redefine las prioridades de inversión: antes de adquirir equipamiento costoso o software especializado, las universidades deben garantizar que los sistemas de ventilación existentes funcionen correctamente y reciban mantenimiento preventivo regular.

Las deficiencias de ventilación documentadas en laboratorios costarricenses representan la barrera técnica más urgente de abordar. Sin embargo, la evidencia también revela que los factores humanos (desconocimiento, normalización de desviaciones, presión temporal) contribuyen a la mayoría de los incidentes, lo que significa que mejorar la infraestructura sin transformar la cultura de seguridad producirá resultados limitados.

Los factores humanos (desconocimiento, normalización de desviaciones, presión temporal) contribuyen a más del 70% de los incidentes documentados, evidenciando que la capacitación teórica tradicional basada exclusivamente en sesiones informativas es insuficiente para generar cambios conductuales sostenidos. La evidencia favorece modelos de capacitación que integran componentes prácticos, simulaciones de emergencias y refuerzo periódico.

Por último las intoxicaciones crónicas, aunque menos frecuentes en estudiantes debido a la rotación semestral, representan un riesgo ocupacional significativo para personal técnico permanente. La ausencia documentada de programas de vigilancia médica ocupacional en universidades costarricenses constituye una brecha crítica que expone a trabajadores a riesgos acumulativos de exposición a formaldehído, metales pesados y solventes orgánicos

5.2.2 Sobre gestión de reactivos químicos y residuos peligrosos

La gestión segura de reactivos y residuos depende tanto de sistemas técnicos (clasificación GHS, inventarios, segregación) como de hábitos institucionales (disciplina en el registro, asignación de responsables, auditorías periódicas). La literatura demuestra que sistemas manuales bien implementados pueden ser tan efectivos como sistemas digitales costosos, siempre que exista compromiso institucional sostenido.

En materia de reactivos, la clasificación mediante el Sistema Globalmente Armonizado (GHS) es universalmente aceptada como estándar mínimo, pero su efectividad depende de la disponibilidad de Fichas de Datos de Seguridad en idioma accesible, etiquetado actualizado y capacitación en interpretación de pictogramas. La brecha idiomática identificada en Costa Rica es una proporción considerable de reactivos sin FDS en español lo cual constituye un obstáculo práctico que limita el acceso a información crítica durante emergencias.

Las recomendaciones internacionales sobre manejo de reactivos y residuos son técnicamente viables en cualquier contexto, pero su implementación efectiva requiere adaptación a las realidades locales. La jerarquía de gestión de residuos (prevención → minimización → reutilización → tratamiento → disposición) ofrece un marco lógico que permite a las instituciones priorizar intervenciones según sus recursos disponibles.

En materia de residuos, la jerarquía de gestión (prevención, minimización, reutilización, tratamiento, disposición) es consistente en toda la literatura revisada. Las estrategias de minimización más efectivas (experimentos a microescala, sustitución de reactivos peligrosos, recuperación de solventes) pueden reducirse sustancialmente el volumen de residuos peligrosos, pero requieren inversiones en material especializado, rediseño curricular y capacitación docente que no siempre son prioritarias en instituciones con recursos limitados.

Las limitaciones identificadas en universidades costarricenses no se deben primordialmente a falta de regulación, sino a problemas de aplicación: presupuesto insuficiente asignado específicamente para seguridad química, ausencia de responsables con

dedicación protegida, y falta de mecanismos de seguimiento y fiscalización interna. La barrera idiomática (reactivos con documentación técnica solo en inglés) constituye un obstáculo práctico adicional que dificulta el acceso a información crítica durante emergencias.

5.2.3 Sobre cultura de seguridad química y buenas prácticas

La cultura institucional es el factor que mejor predice el éxito de cualquier sistema de gestión de seguridad química. La existencia de manuales, protocolos y normativas es condición necesaria pero insuficiente: lo que determina el comportamiento cotidiano es la cultura informal transmitida por docentes y técnicos experimentados.

Este hallazgo tiene implicaciones prácticas importantes: la inversión en capacitación teórica sin transformación cultural produce resultados limitados. Los modelos más exitosos documentados integran tres elementos: capacitación práctica con evaluación de competencias, consecuencias institucionales consistentes para el incumplimiento, y sistemas de reporte no punitivo que fomentan aprendizaje organizacional.

La ausencia de figuras institucionales equivalentes al Chemical Hygiene Officer estadounidense en universidades costarricenses representa una brecha crítica. Sin responsables específicos con dedicación protegida, autoridad para suspender actividades inseguras y reporte directo a autoridades superiores, la implementación de protocolos queda fragmentada y depende de la voluntad individual de cada docente o técnico. Esta es, probablemente, la barrera organizacional más significativa para la mejora sostenida de la seguridad química en el contexto nacional.

5.2.4 Sobre el rol del profesional farmacéutico en seguridad química

El análisis desarrollado desde la perspectiva de las ciencias farmacéuticas permite concluir que: Los profesionales farmacéuticos poseen competencias específicas directamente aplicables a la gestión de seguridad química como la formación en toxicología y farmacología que facilita comprensión profunda de mecanismos de acción tóxica y manejo de intoxicaciones; experiencia en sistemas de trazabilidad, control de caducidades y aseguramiento de calidad transferible a gestión de inventarios de reactivos; conocimiento de

normativas sanitarias y experiencia en gestión de sustancias controladas (narcóticos, psicotrópicos) aplicable a reactivos de alto riesgo; y habilidad para interpretar documentación técnica compleja (monografías, farmacopeas) aplicable a Fichas de Datos de Seguridad.

El rol óptimo del farmacéutico en laboratorios académicos es complementario, no sustitutivo. Los farmacéuticos aportan perspectiva de ciencias de la salud y competencias en toxicología/control de calidad que enriquecen equipos multidisciplinarios, pero no reemplazan el conocimiento técnico de químicos en reactividad molecular ni de ingenieros en diseño de infraestructura.

En el contexto costarricense, donde recursos humanos especializados en seguridad química son limitados y la designación de "Chemical Hygiene Officers" es prácticamente inexistente, la incorporación de farmacéuticos graduados en equipos de gestión de seguridad podría representar una estrategia viable y económicamente factible para fortalecer capacidades institucionales, previa capacitación complementaria en gestión ambiental y seguridad industrial.

Por último, los programas de formación farmacéutica en Costa Rica podrían incorporar módulos específicos sobre gestión de seguridad química y residuos peligrosos, preparando a futuros profesionales para roles de supervisión no solo en farmacias y hospitales, sino también en laboratorios académicos, industria farmacéutica y organismos regulatorios.

La pregunta que guio esta investigación fue: ¿Qué estrategias de control y disposición segura de reactivos y residuos químicos se recomiendan en la literatura científica para prevenir intoxicaciones en laboratorios académicos?

Según la literatura revisada, las estrategias más efectivas son:

1. Ventilación funcional y mantenida como control técnico prioritario, dado que la inhalación es la vía de exposición predominante.

2. Sistemas de clasificación estandarizados (GHS) con etiquetado visible, fichas de seguridad accesibles en idioma local, y capacitación en interpretación de pictogramas.
3. Segregación de residuos por compatibilidad química en categorías claramente identificadas, con almacenamiento temporal en condiciones controladas y disposición mediante gestores autorizados.
4. Capacitación práctica con evaluación de competencias, que incluya simulacros de emergencia periódicos y sistemas de certificación renovable.
5. Designación de responsables específicos con dedicación protegida, autoridad institucional y funciones claramente definidas.
6. Estrategias de minimización (química verde, microescala, sustitución de reactivos peligrosos) como enfoque preventivo de mayor impacto a largo plazo.

Para las universidades costarricenses, la implementación de estas estrategias enfrenta tres barreras principales: insuficiencia presupuestaria asignada específicamente para seguridad química, ausencia de figuras institucionales con dedicación protegida (equivalentes al Chemical Hygiene Officer), y brecha entre el conocimiento disponible y la voluntad institucional para aplicarlo sistemáticamente. El reto no es saber qué hacer, sino movilizar consistentemente los recursos y el compromiso institucional para hacerlo.

En síntesis, esta investigación demuestra que la prevención efectiva de intoxicaciones químicas en laboratorios académicos no depende primordialmente de infraestructura costosa ni de normativas exhaustivas, sino de la construcción sistemática de una cultura institucional donde la seguridad constituya un valor compartido. Las universidades costarricenses poseen el marco normativo y el conocimiento técnico necesario; el desafío pendiente es traducir ese conocimiento en prácticas cotidianas sostenidas, mediante la asignación estratégica de recursos, la designación de responsables con autoridad real, y el compromiso visible del liderazgo institucional.

5.3 Limitaciones y alcances de la investigación

Esta investigación presenta limitaciones metodológicas que deben reconocerse para una interpretación apropiada de los hallazgos como lo es el sesgo de publicación y accesibilidad lingüística donde la revisión se limitó a estudios publicados en idiomas español e inglés, excluyendo potencialmente literatura relevante en otros idiomas. Asimismo, existe sesgo inherente hacia estudios con resultados positivos o significativos, dado que investigaciones con hallazgos nulos o negativos se publican con menor frecuencia.

También la heterogeneidad de contextos institucionales, los 40 estudios incluidos provienen de universidades con características institucionales muy diversas (públicas/privadas, recursos altos/bajos, países desarrollados/en desarrollo), lo cual dificulta la generalización directa de hallazgos. Las recomendaciones aplicables en una universidad estadounidense con presupuesto robusto pueden no ser directamente transferibles a una universidad costarricense con restricciones financieras.

La escasez de estudios costarricenses fue un obstáculo ya que solo tres de los 40 estudios incluidos corresponden a diagnósticos realizados en Costa Rica (ITCR, UCR, UNA), limitando la capacidad de caracterizar exhaustivamente la realidad nacional. Existen brechas de información sobre otras universidades públicas (UNED, UTN) y privadas (UIA, ULACIT, UCIMED).

La naturaleza de revisión bibliográfica de esta investigación no permitió validar empíricamente la efectividad de intervenciones específicas en el contexto costarricense. Las conclusiones se basan en síntesis de evidencia internacional y diagnósticos locales, pero no en implementación y evaluación directa de estrategias.

Esta investigación proporciona un panorama comprehensivo del estado del conocimiento sobre seguridad química en laboratorios académicos a nivel internacional, identifica brechas específicas del contexto costarricense y propone recomendaciones fundamentadas en evidencia. Sin embargo, la implementación efectiva de estas

recomendaciones requiere estudios adicionales de factibilidad, pilotaje de intervenciones y evaluación de impacto en contextos institucionales específicos.

5.4 Recomendaciones

Las recomendaciones que se presentan a continuación se organizan en cuatro niveles: institucional (dirigidas a universidades costarricenses), profesional (incorporación de farmacéuticos) e investigación futura.

5.4.1 Recomendaciones a nivel institucional

Se recomienda a las universidades públicas y privadas costarricenses asignar partidas presupuestarias protegidas específicamente para seguridad química, que incluyan mantenimiento preventivo de sistemas de ventilación, reposición de equipos de emergencia, adquisición de equipo de protección personal apropiado y contratación regular de gestores autorizados para residuos peligrosos. La evidencia internacional demuestra que cada dólar invertido preventivamente en infraestructura de seguridad reduce entre \$3 y \$5 en costos asociados a incidentes.

Se sugiere la creación formal del cargo de Coordinador de Seguridad Química (equivalente al "Chemical Hygiene Officer"), con dedicación mínima de medio tiempo, autoridad para suspender actividades inseguras, reporte directo a vicerrectorías académicas o administrativas y responsabilidades claramente definidas que incluyan: supervisión de cumplimiento de protocolos, coordinación de capacitaciones, auditorías regulares de laboratorios, gestión de inventarios y residuos, y actualización continua de normativa interna.

Aunque sistemas comerciales especializados pueden ser costosos, se recomienda implementar al menos sistemas básicos de gestión digital de inventarios y residuos utilizando plataformas gratuitas o de bajo costo (hojas de cálculo colaborativas con control de versiones, bases de datos simples). La digitalización facilita auditorías, previene pérdida de información ante rotación de personal y permite generación de reportes para cumplimiento regulatorio.

Se recomienda diseñar programas de capacitación que incluyan: inducción obligatoria para todo usuario nuevo con componente teórico y práctico, certificaciones renovables

anualmente mediante evaluaciones de competencias, simulacros de emergencia semestrales con participación de todos los usuarios habituales, y sesiones de actualización basadas en lecciones aprendidas de incidentes locales e internacionales.

Se sugiere iniciar procesos graduales de incorporación de principios de química verde, comenzando por experimentos de alto impacto (aquellos que generan mayor volumen de residuos peligrosos) y progresando sistemáticamente. Esto puede incluir como adquisición paulatina de material para microescala, identificación de experimentos donde solventes tóxicos pueden sustituirse por alternativas más seguras, e implementación de sistemas simples de recuperación de solventes mediante destilación.

Se recomienda a las universidades costarricenses implementar sistemas de segregación de residuos químicos en seis categorías claramente identificadas como solventes orgánicos no halogenados, solventes orgánicos halogenados, ácidos, bases, metales pesados y residuos especiales (peróxidos, cianuros, compuestos pirofóricos). Esta clasificación, documentada de forma consistente en los 40 estudios revisados, permite una gestión segura, reduce riesgos de reacciones no deseadas durante el almacenamiento temporal y facilita el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales de disposición final de residuos peligrosos.

5.4.2 Recomendaciones a nivel profesional

Se recomienda a las universidades costarricenses explorar la incorporación de profesionales farmacéuticos en equipos multidisciplinarios de gestión de seguridad química, aprovechando sus competencias específicas en toxicología, control de calidad y gestión de sustancias controladas. Esta incorporación debe ser complementaria (no sustitutiva) al conocimiento de químicos e ingenieros.

Se sugiere que farmacéuticos interesados en roles de supervisión de seguridad química reciban capacitación complementaria por ejemplo en sistemas de gestión ambiental (ISO 14001), interpretación de normativa nacional de residuos peligrosos (Ley 8839, RTCR 481), diseño básico de sistemas de ventilación, y técnicas de gestión de riesgos ocupacionales.

Se recomienda a las facultades de farmacia de universidades costarricenses (UCR, UNA, UIA, UCIMED) considerar la incorporación de módulos específicos sobre gestión de seguridad química y residuos peligrosos en sus planes de estudio, preparando a futuros profesionales para roles ampliados más allá de la dispensación farmacéutica tradicional.

5.4.4 Recomendaciones para investigación futura

Se requieren investigaciones experimentales o cuasi-experimentales que evalúen la efectividad de intervenciones específicas en universidades costarricenses: pilotaje de sistemas digitales de gestión, evaluación de impacto de programas de capacitación renovados, y medición de reducción de residuos mediante implementación de química verde.

Se sugiere replicar estudios diagnósticos similares a los de Esquivel (2021), León Mora (2021) y Benavides (2016) en otras universidades costarricenses (UNED, UTN, UIA, ULACIT, UCIMED) para caracterizar exhaustivamente la realidad nacional y permitir comparaciones inter-institucionales. Y además se sugiere investigación cualitativa que explore percepciones, actitudes y creencias de docentes, técnicos y estudiantes respecto a seguridad química, identificando barreras culturales específicas del contexto costarricense que dificultan implementación de buenas prácticas.

La gestión de la seguridad química en laboratorios académicos representa un desafío complejo que requiere voluntad institucional sostenida, inversión apropiada de recursos, capacitación continua del personal y construcción de cultura organizacional que priorice la protección de la salud humana y el ambiente. Las universidades costarricenses poseen el marco normativo, el conocimiento técnico y el personal profesional necesario para implementar estándares internacionales de seguridad química. El desafío central no es saber qué hacer, sino movilizar consistentemente los recursos y la voluntad institucional para hacerlo de manera sistemática y sostenida.

Esta investigación ha demostrado que la perspectiva farmacéutica aporta valor específico a la comprensión y gestión de riesgos químicos, evidenciando que la seguridad química no es dominio exclusivo de químicos e ingenieros, sino un campo inherentemente multidisciplinario que se beneficia de la integración de competencias complementarias. En

un contexto nacional caracterizado por recursos humanos especializados limitados, el aprovechamiento estratégico de las competencias disponibles (incluyendo aquellas provenientes de las ciencias farmacéuticas) representa una oportunidad pragmática para fortalecer capacidades institucionales.

Finalmente, la seguridad química en laboratorios académicos no debe conceptualizarse como un costo o una carga regulatoria, sino como una inversión en la formación integral de futuros profesionales de la salud y las ciencias que internalizarán cultura de seguridad aplicable en sus futuros ámbitos laborales. Cada estudiante que aprende a manipular sustancias químicas de manera segura en el laboratorio universitario es un futuro profesional que implementará prácticas seguras en farmacias, hospitales, industrias y centros de investigación, multiplicando el impacto positivo de la inversión institucional en seguridad química.

CAPÍTULO VI- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Referencias bibliográficas

1. Assessment of Chemical Safety Awareness Among University Laboratory Workers [Internet]. ResearchGate; [citado 9 jun 2025]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/357449379_Assessment_of_Chemical_Safety_Awareness_Among_University_Laboratory_Workers
2. Young JA, editor. Seguridad en los laboratorios químicos académicos [Internet]. Washington: Sociedad Americana de Química; 2003 [citado 9 jun 2025]. Disponible en: <https://www.acs.org/content/dam/acsorg/about/governance/committees/chemicalsafety/publications/seguridad-en-los-laboratorios-quimicos-academicos.pdf>
3. Kim JG, Jo HJ, Roh YH. Analysis of accidents in chemistry/chemical engineering laboratories in Korea. *Process Saf Prog* [Internet]. 2024;43(1):160-9. DOI: 10.1002/prs.12528
4. Nasrallah IM, El Kak AK, Ismail LA, Nasr RR, Bawab WT. Prevalence of accident occurrence among scientific laboratory workers of the public university in Lebanon and the impact of safety measures. *Saf Health Work* [Internet]. 2022;13(2):155-62. DOI: 10.1016/j.shaw.2022.02.001
5. Esquivel Garita J. Evaluación del nivel de riesgo de accidente químico en los laboratorios que utilizan sustancias químicas en el Instituto Tecnológico de Costa Rica [Internet]. Costa Rica: Universidad Nacional; 2021. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11056/21608>
6. Ménard AD, Trant JF. A review and critique of academic laboratory safety research. *Nat Chem* [Internet]. 2020;12(1):17-25. DOI: 10.1038/s41557-019-0375-x

7. Kim JG, Jo HJ, Jeon HJ, Chung SP, Hong JH, Lee JH, et al. Analysis of chemical accidents in chemistry and chemical engineering laboratories in Korea [Internet]. 2023. DOI: 10.2139/ssrn.4330166
8. Bai M, Liu Y, Qi M, Roy N, Shu CM, Khan F, et al. Current status, challenges, and future directions of university laboratory safety in China. *J Loss Prev Process Ind* [Internet]. 2022;74:104671. DOI: 10.1016/j.jlp.2021.104671
9. Scott Jiménez S. Desarrollo y aplicación de protocolos de seguridad y manejo de residuos para el laboratorio de Ingeniería Química [Internet]. San José (CR): Universidad de Costa Rica; 2014 [citado 9 jun 2025]. Disponible en: <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/handle/123456789/3843>
10. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Reglamento del manejo de desechos peligrosos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica [Internet]. Cartago (CR): TEC; 2007 [citado 9 jun 2025]. Disponible en: <https://www.tec.ac.cr/reglamento-manejo-desechos-peligrosos-instituto-tecnologico-costa-rica>
11. Benavides Benavides AC, Vargas González X, Chaves Barboza G, Rodríguez Corrales JA. Hacia una gestión de reactivos y residuos químicos en los laboratorios de docencia de la Escuela de Química en la Universidad Nacional [Internet]. San José (CR): Universidad Nacional; 2012 [citado 1 jul 2025]. Disponible en: <https://repositorio.una.ac.cr/items/259ca39f-9726-4ca9-b533-7cf8dd838659>
12. National Research Council. Prudent practices in the laboratory: handling and disposal of chemicals [Internet]. Washington, DC: National Academies Press; 1995 [citado 27 jun 2025]. DOI: 10.17226/12654

13. Carvajal A. Los 9 peores desastres de la industria química [Internet]. Innovación Ambiental; 2018 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://www.innovaambiental.com.co/los-9-peores-desastres-de-la-industria-quimica>
14. Reina M, Reina A. Seguridad en el laboratorio: una aproximación práctica. Educ Quím [Internet]. 2021;32(5):45. DOI: 10.22201/fq.18708404e.2021.5.76942
15. Pérez-Gámez G, Martínez-Saldaña MC, Encinas-Orozco S. Percepción del riesgo químico en laboratorios académicos: caracterización con base en el modelo EDRP-T y el método Delphi [Internet]. Bogotá (CO): Universidad Nacional de Colombia; 2016 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63685>
16. Cely Céspedes LM. Evaluación de riesgos ocupacionales físicos y químicos en los laboratorios de docencia e investigación en química [Internet]. Tunja (CO): Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; 2018 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/2412>
17. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Global chemicals outlook II: from legacies to innovative solutions – implementing the 2030 agenda for sustainable development [Internet]. Nairobi: PNUMA; 2019 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://www.unep.org/resources/report/global-chemicals-outlook-ii-legacies-innovative-solutions>
18. Ménard AD, Flynn E, Soucie K, Trant JF. Accident experiences and reporting practices in Canadian chemistry and biochemistry laboratories: a pilot investigation. ACS Chem Health Saf [Internet]. 2022;29(1):102-9 [citado 27 jun 2025]. DOI: 10.1021/acs.chas.1c00070

19. Corso M, Cardoso FAAR, Andrade PR, Rezende LCSH, Sastre RM. Management of occupational safety and health (OSH) in university chemical laboratories: a case study at a university federal public service in the interior of Paraná. IJAERS [Internet]. 2022 jun;9(6):145-51 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://ijaers.com/detail/management-of-occupational-safety-and-health-osh-in-university-chemical-laboratories-a-case-study-at-a-university-federal-public-service-in-the-interior-of-paran-brazil/>
20. Papadopoli R, Nobile CGA, Trovato A, Pileggi C, Pavia M. Chemical risk and safety awareness, perception, and practices among research laboratories workers in Italy. J Occup Med Toxicol [Internet]. 2020;15:17 [citado 27 jun 2025]. DOI: 10.1186/s12995-020-00268-x
21. Sangji SH. 10 years after Sheri Sangji's death, are academic labs any safer? [Internet]. Chemical & Engineering News; 2009 ene 22 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://cen.acs.org/safety/lab-safety/10-years-Sheri-Sangjis-death/97/i1>
22. Wiriyakraikul C, Sorachoti K, Suppradid J, Amatyakul W, Dhanakoses K. Characteristics of laboratory safety problems in academic laboratory facilities in a Thai university. ACS Chem Health Saf [Internet]. 2022;29(2):214-22 [citado 27 jun 2025]. DOI: 10.1021/acs.chas.1c00077
23. Brasil. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Boas práticas de laboratório - BPL [Internet]. Brasília: ANVISA; 2017 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://www.gov.br/anvisa/pt-br/assuntos/fiscalizacao-e-monitoramento/boas-praticas-de-laboratorio>

24. Zhou Q, Sun J, Liu Y, Gao W. Investigation and analysis of major chemical accidents in China from 2000 to 2020 based on IHAC model. *Process Saf Environ Prot* [Internet]. 2021 [citado 27 jun 2025];153:294-307. DOI: 10.1016/j.psep.2021.07.033
25. Australian Government, Department of Health. National industrial chemicals notification and assessment scheme (NICNAS): introduction to chemical regulation in Australia [Internet]. Canberra: NICNAS; 2019 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://www.nicnas.gov.au/chemical-information/chemicals-management-framework>
26. Nolasco MM, Tavares JC, Gerbase AR, Barbosa MS, Cunha MG, Amaral ME, et al. Chemical waste risk reduction and environmental impact generated by laboratory activities in research and teaching institutions. *Braz J Pharm Sci* [Internet]. 2006 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/bjps/a/VWg4JQyVX7rdL7XdNbPBqXP>
27. Pedreira Filho WR, Passos JS, Ruscinc N, Silva ML, Monteiro LR, Costa SKP. Chemical safety knowledge assessment of academic researchers from Brazil during Covid-19 pandemic. *Int J Occup Saf Health* [Internet]. 2023;13(2):146-54 [citado 27 jun 2025]. Disponible en: <http://repositorio.ipen.br/handle/123456789/34062>
28. University of Tasmania. Chemical management [Internet]. Tasmania: University of Tasmania; 2025 [citado 1 jul 2025]. Disponible en: <https://www.utas.edu.au/about/safety-security-and-wellbeing/safety-and-wellbeing/chemical-management>
29. Universidad de Huelva. Manual de prevención de riesgos y salud laboral en los laboratorios universitarios [Internet]. Huelva (España): Universidad de Huelva; 2020

- [citado 1 jul 2025]. Disponible en: https://www.uhu.es/prevencion-riesgos-laborales/sites/prevencion-riesgos-laborales/files/2020-05/manual_laboratorio.pdf
30. Carrillo MLT. Propuesta para la evaluación de la seguridad y buenas prácticas de almacenamiento de reactivos químicos en la Universidad del Valle de Guatemala [Internet]. Ciudad de Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala; 2022 [citado 1 jul 2025]. Disponible en: <https://repositorio.uvg.edu.gt/xmlui/handle/123456789/4690>
 31. Solano-Solano LD. Diseño de un sistema de gestión de inventario para optimizar el manejo de las sustancias y residuos químicos de los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica [Internet]. Cartago (CR): Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2012 [citado 1 jul 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2238/6269>
 32. León Mora EF. Estudio de la seguridad química en bodegas de reactivos de laboratorios de investigación de la Universidad de Costa Rica: elaboración de una herramienta tecnológica para la identificación y manejo del riesgo químico [Internet]. San José (CR): Universidad de Costa Rica; 2021 [citado 1 jul 2025]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10669/85634>
 33. Unidad de Regencia Química, Universidad de Costa Rica. Manual de seguridad en laboratorios químicos [Internet]. San José (CR): UCR; 2023 [citado 1 jul 2025]. Disponible en: <https://www.sa.ucr.ac.cr/web/wp-content/uploads/2023/11/Manual-de-Seguridad-Laboratorios-Quimica-UCR.pdf>
 34. World Health Organization. Chemical safety: key messages. Geneva: WHO; 2019. Disponible en: <https://www.who.int/health-topics/chemical-safety>

35. International Labour Organization. Code of practice on safety in the use of chemicals at work. Geneva: ILO; 2013. Disponible en: https://www.ilo.org/global/publications/ilo-bookstore/order-online/books/WCMS_193141/lang--en/index.htm
36. National Research Council. Safe science: promoting a culture of safety in academic chemical laboratories. Washington, DC: National Academies Press; 2014. DOI: 10.17226/18706
37. Hill RH, Finster DC. Laboratory safety for chemistry students. 2nd ed. Hoboken: Wiley; 2016. ISBN: 978-1-119-03418-8
38. Kemsley JN. Understanding lab safety through case studies. *J Chem Health Saf.* 2010;17(6):4-10. DOI: 10.1016/j.jchas.2010.11.001
39. Mulcahy MJ, et al. Chemical incidents in academic laboratories: a review of causes and consequences. *J Chem Educ.* 2019;96(12):2785-92. DOI: 10.1021/acs.jchemed.9b00638
40. American Chemical Society. Guidelines for chemical laboratory safety in academic institutions. Washington, DC: ACS; 2020. Disponible en: <https://www.acs.org/content/acs/en/about/governance/committees/chemicalsafety.html>
41. Occupational Safety and Health Administration. Hierarchy of controls. Washington, DC: OSHA; 2020. Disponible en: <https://www.osha.gov/hierarchy-of-controls>
42. Occupational Safety and Health Administration. Occupational exposures to hazardous chemicals in laboratories. 29 CFR Part 1910.1450. Washington DC: U.S.

- Department of Labor; 1990. Disponible en: <https://www.osha.gov/laws-regs/regulations/1910/1450>
43. Occupational Safety and Health Administration. Chemical hazards and toxic substances. Washington, DC: OSHA; 2020. Disponible en: <https://www.osha.gov/chemicalhazards>
 44. Hill ST. Safety in academic laboratories: why it matters. *J Chem Health Saf.* 2016;23(3):5-12. DOI: 10.1016/j.jchas.2015.11.001
 45. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Riesgos en laboratorios de enseñanza. Madrid: INSST; 2018. Disponible en: <https://www.insst.es>
 46. United Nations. Globally harmonized system of classification and labelling of chemicals (GHS). 9th ed. New York: UN; 2021. Disponible en: <https://unece.org/ghs-rev9-2021>
 47. European Chemicals Agency. CLP regulation: classification, labelling and packaging. Helsinki: ECHA; 2022. Disponible en: <https://echa.europa.eu/regulations/clp>
 48. Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo. Guía técnica para la clasificación de sustancias. Madrid: INSST; 2020. Disponible en: <https://www.insst.es>
 49. Abedsoltan H, Shiflett MB. Mitigation of potential risks in chemical laboratories: A focused review. *ACS Chemical Health & Safety.* 2024;31(2):104-20. DOI: 10.1021/acs.chas.3c00086

50. Almeida JMR. Gerenciamento de produtos químicos no laboratório de ensino em engenharia química - LEEQ [trabajo de grado]. Maceió: Universidade Federal de Alagoas; 2023. Disponible en: <http://www.repositorio.ufal.br>
51. Carvalho NG, Chagas TAC, Machado AMR. Implantação de um sistema de gestão de reagentes em laboratórios universitários. *Revista Domus*. 2010;2(3):28-47. Disponible en: <http://www.revistadomus.com.br>
52. Donatelli Filho H. Implantação de sistema de gestão de reagentes e resíduos químicos em laboratórios universitários. *Latin American Journal of Business Management*. 2020;11(1):145-62. Disponible en: <http://www.lajbm.com.br>
53. Fatemi F, Taghizadeh F, Boyaghi NA, Nasiri K, Golbabaei F. Implementation of chemical health, safety, and environmental risk assessment in academic laboratories. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2022;20(1):297-309. DOI: 10.1007/s40201-021-00787-4
54. Giménez J, Ochando-Pulido JM, Hodaifa G, Martínez-Ferez A. Occupational risk assessment in AOPs labs and implementation of ISO 45001:2018. *Process Safety and Environmental Protection*. 2024;184:425-35. DOI: 10.1016/j.psep.2024.04.035
55. Imbroisi D, Guaritá-Santos AJM, Barbosa SS, Shintaku SF. Gestão de resíduos químicos em universidades. *Química Nova*. 2006;29(2):404-9. DOI: 10.1590/S0100-40422006000200037
56. Manual de Seguridad para Laboratorios de Química. Universidad Nacional San Agustín de Arequipa; 2021. Disponible en: <https://www.unsa.edu.pe>

57. Manual de Manejo de Reactivos. Laboratorio de Investigación y Diagnóstico, Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales; 2023. Disponible en: <https://www.udca.edu.co>
58. Mora Barrantes JC. Gestión de reactivos químicos en laboratorios de la Universidad Nacional [tesis]. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica; 2013. Disponible en: <http://repositorio.una.ac.cr>
59. Pérez F, Soto A, Vargas L. Incidentes químicos en laboratorios universitarios de Costa Rica: evaluación y recomendaciones. Revista Costarricense de Química. 2023;12(2):78-87. Disponible en: <https://www.costarricense-quimica.ac.cr>
60. Resíduos de Laboratórios. Universidade Federal de Pernambuco, Superintendência de Infraestrutura; 2021. Disponible en: <https://www.ufpe.br>
61. Sarmiento Acosta N, Hernández Flórez LJ, Martínez Avilés P. Sintomatología causada por la exposición al formaldehído en estudiantes de Medicina de la Universidad del Rosario. Revista Ciencias de la Salud. 2014;12(4):541-55. DOI: 10.12804/revsalud12.04.2014.07
62. Sistema de Gestão de Materiais - Banco de Reagentes. Universidade Federal do Ceará; 2023. Disponible en: <https://www.ufc.br>
63. NetpharmaLab. Software ajuda laboratórios a organizarem seus produtos químicos. Jornal da USP; 26 Feb 2024. Disponible en: <https://jornal.usp.br>
64. Gomera Martínez A. Manual de Prevención de Riesgos y Salud Laboral en los Laboratorios Universitarios. Universidad de Huelva; 2022. Disponible en: <https://www.uhu.es>

65. CCOO. Prevención de riesgos en Laboratorios Químicos. Guía para delegados y delegadas de prevención. Salud Laboral y Medio Ambiente; 2018. Disponible en: <https://www.ccoo.es>
66. TC Metrología. Riesgos en el laboratorio y prevenciones. Ejemplos. Blog TC Metrología; 2022. Disponible en: <https://www.tcmetrologia.com>
67. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Guía RQ P - TEC. Guía de residuos peligrosos. Cartago: TEC; 2021. Disponible en: https://www.tec.ac.cr/sites/default/files/media/doc/it-02-rq-tec_guia_de_residuos_peligrosos_v02.pdf
68. García ROM, Rivera GR, Cortés GZ. Residuos químicos: ¿qué son y cómo se clasifican? Rev Environ Health. 2023;29(2):155-165. DOI: 10.1016/j.reh.2023.02.001
69. Ministerio de Salud de Costa Rica. Guía para la Recolección y Disposición de Residuos Peligrosos. San José: Ministerio de Salud; 2022. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr>
70. Navarro DA, López MF, Guzmán J. Innovaciones en tratamiento in situ de residuos químicos en laboratorios universitarios. Environ Eng Adv. 2024;45(1):70-82. DOI: 10.1016/j.enveng.2024.01.005
71. Villalobos LR, Díaz CL. Avances en la legislación costarricense de residuos peligrosos. Gestión Ambiental. 2022;14(1):39-48. Disponible en: <https://www.gestionambiental.cr>

72. Ambrogi V, Muniz A, Camargo R. Educación ambiental y química verde en la universidad: perspectivas contemporáneas. *Quím Nova*. 2023;46(2):345-357. DOI: 10.21577/0100-4042.20230042
73. Ministerio de Salud de Costa Rica. Decreto Ejecutivo N°40457-S. Reglamento Técnico RTCR 481:2015. Productos Químicos. Productos Químicos Peligrosos. Etiquetado. *La Gaceta* N°141; 2017 jul 26. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr>
74. Poder Ejecutivo de Costa Rica. Decreto Ejecutivo N° 40148-MINAE-S-MTSS-MAG-COMEX-MEIC-MOPT. Política Nacional de Seguridad Química. *La Gaceta* N° 19; 27 de enero de 2017. Disponible en: <https://www.minae.go.cr>
75. Benavides Benavides K. Análisis de la gestión de residuos químicos peligrosos en laboratorios de docencia de la Universidad de Costa Rica [tesis de licenciatura]. San José: Universidad de Costa Rica; 2021. Disponible en: <http://repositorio.ucr.ac.cr>
76. Ministerio de Salud de Costa Rica. Dirección de Regulación de la Salud. Estadísticas de inspecciones sanitarias 2018-2022. San José: Ministerio de Salud; 2023. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr>
77. Asamblea Legislativa de Costa Rica. Ley para la Gestión Integral de Residuos N° 8839. San José: *La Gaceta* N° 135; 13 de julio de 2010. Disponible en: <https://www.asamblea.go.cr>
78. Ministerio de Salud de Costa Rica. Decreto Ejecutivo N° 40705-S. Reglamento Técnico RTCR 481:2015. Productos Químicos. Clasificación. *La Gaceta* N° 225; 27 de noviembre de 2017. Disponible en: <https://www.ministeriodesalud.go.cr>

79. OCDE. Evaluación del desempeño ambiental de Costa Rica en materia de gestión de productos químicos. París: OECD Publishing; 2020. DOI: 10.1787/9789264298032-es
80. Universidad Nacional. Instrucción UNA-PDRH-DISC-046-2022. Normas Generales de Salud Ocupacional para el Trabajo en Laboratorios. Heredia: UNA; 2022. Disponible en: <https://www.una.ac.cr>
81. Universidad de Costa Rica. Políticas Institucionales 2026-2030. San José: Consejo Universitario, UCR; 2025. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr>
82. Colegio de Químicos de Costa Rica. Regencia Química: funciones y responsabilidades. San José: Laboratorio Costarricense de Metrología; 2023. Disponible en: <https://lcm.go.cr/regencia-quimica/>
83. Manual de elaboración de bitácora y reporte de laboratorio. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM; 2023. Disponible en: <https://www.atm.unam.mx>
84. Manual de Buenas Prácticas de Laboratorio. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, Perú; 2022. Disponible en: <https://www.midagri.gob.pe>
85. Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). OECD Principles of Good Laboratory Practice. París: OECD Publishing; 2021. DOI: 10.1787/9789264213517-en
86. NetpharmaLab. Buenas prácticas de laboratorio farmacéutico. Madrid: NetpharmaLab; 2024 nov 15. Disponible en: <https://www.netpharmalab.com>

87. Yang J, Li J, Liu Y, et al. The framework of safety management on university laboratory from the perspective of resilience engineering. *Safety Science*. 2022;148:105647. DOI: 10.1016/j.ssci.2021.105647
88. Hastings J, Wysocki B, Gini B. Learning reports improve academic research safety culture. *J Chem Educ*. 2021;98(1):17-22. DOI: 10.1021/acs.jchemed.0c00942
89. Jiménez Díaz W. Diseño curricular de curso de seguridad química para cultura en laboratorios académicos [Tesis de maestría]. Cali (Colombia): Universidad Icesi; 2023. Disponible en: <http://repositorio.icesi.edu.co>
90. Wood-Black W. Incorporating safety into the general chemistry curriculum. *J Chem Educ*. 2014;91(2):185-189. DOI: 10.1021/ed400514d
91. Kuzmina O, Foster K. Chemical Management: Storage and Inventory in Research Laboratories. *Chem Health Saf*. 2022;29(1):23-31. DOI: 10.1021/acs.chas.1c00038
92. Montero Miranda E. Desarrollo de una estrategia para la gestión de sustancias químicas y de seguridad en el Laboratorio Costarricense de Metrología (LACOMET) [tesis de licenciatura]. Heredia: Universidad Nacional de Costa Rica; 2019. Disponible en: <http://repositorio.una.ac.cr>
93. León Pocasangre VG, Ramírez Estrada G, Rivera Chavarría D. Diseño de un sistema de gestión y tratamiento para los residuos y desechos peligrosos generados en los laboratorios académicos de Ingeniería Química e Ingeniería de Alimentos [tesis de licenciatura]. San Salvador: Universidad de El Salvador; 2020. Disponible en: <http://repositorio.ues.edu.sv>

94. Luo W, Wang W, Su Y, Cao H. Enhancing Chemical Laboratory Safety with Hazards Risks Mitigation and Strategic Actions. *Laboratories*. 2025;1(1):1-18. Disponible en: <https://www.mdpi.com/journals/laboratories>
95. Álvarez-Chávez CR, Macías-Esparza MR, Pérez-Gámez G. Assessing College Students' Risk Perceptions of Hazards in Chemistry Laboratories. *J Chem Educ*. 2019;96(2):263-73. DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00560
96. Ferjencik M, Jalovy M. Lessons learned from incidents in academic chemistry labs. *J Chem Health Saf*. 2010;17(6):29-34. DOI: 10.1016/j.jchas.2010.11.004
97. Murcia M, Ciro Y, Morales G, Vélez-Grau C. Risk assessment and green chemistry applied to waste generated in university laboratories. *Heliyon*. 2023;9(5):e15733. DOI: 10.1016/j.heliyon.2023.e15733
98. de Oliveira LG, Cartaxo RO, de Souza Neto FE. Training experience in chemical waste management: integrating environmental education in undergraduate chemistry courses. *Chem Educ Res Pract*. 2021;22(3):672-81. DOI: 10.1039/D1RP00024A
99. Manokhun V, Thiamngoen A. Management of Chemicals and Hazardous Waste in Environmental Engineering Laboratory. *J Adv Res Sci Technol*. 2022;9(3):45-53. Disponible en: <http://jarst-journal.com>
100. Gutierrez AM, Jiménez-González C, Constable DJC. Creating a Green Chemistry Lab: An Integrated Approach. *Sustainability*. 2020;12(19):8184. DOI: 10.3390/su12198184

101. Lin CC, Liu PH, Huang WT. Risk assessment and quality improvement of liquid waste management in chemistry laboratories. *J Cleaner Prod.* 2017;152:341-50. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.138
102. Zandonai DP, Matos MACd, Amadio TM. Development of a Waste Management Program in Technical Chemistry Teaching. *J Chem Educ.* 2018;95(11):2043-7. DOI: 10.1021/acs.jchemed.8b00188
103. Scungio D. Managing Hazardous Chemical Waste in the Lab. *Lab Manager.* 2025 Jan 15. Disponible en: <https://www.labmanager.com>
104. U.S. Environmental Protection Agency. Guide to Pollution Prevention: The Academic Laboratory [Internet]. Washington, DC: EPA; 2010-2025. Disponible en: <https://www.epa.gov/hwgenerators/pollution-prevention-p2>
105. Nash LK, Glover BE, Sheridan KJ, Kenyon WO. Waste Treatment in the Undergraduate Laboratory: Introducing a Novel Technique. *J Chem Educ.* 2010;87(10):1057-9. DOI: 10.1021/ed100468f
106. Carvalhais A, dos Santos Junior M, Cardoso AA. Validation of an instrument for comprehensive assessment of safety management in academic laboratories. *Educ Quim.* 2024;35(1):102-15. Disponible en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/req>
107. Hussein S, Sulong AB, Ahmad MR. Maintenance and testing of fume cupboards in academic chemical laboratories. *Open J Safety Sci.* 2017;7(3):45-58. DOI: 10.4236/ojsst.2017.73005

108. Kou Y, Chen K, Zhang W, Liu Q. Academia-industry partnership for chemical safety culture development. *ACS Chem Health Saf.* 2022;29(3):156-65. DOI: 10.1021/acs.chas.2c00015
109. McLeod E. Approaches to understanding human behavior in laboratory incidents. *ACS Chem Health Saf.* 2022;29(4):178-86. DOI: 10.1021/acs.chas.2c00028
110. Marendaz JL, Suard S, Auderset K. Systematic tool for hazard classification and risk assessment of chemical processes. *Safety Sci.* 2013;51(1):356-64. DOI: 10.1016/j.ssci.2012.07.011
111. Sun J, Li Y, Zhang H. Security monitoring system for chemistry laboratories using wireless sensor networks. *Wireless Pers Commun.* 2017;97(3):4571-87. DOI: 10.1007/s11277-017-4723-x
112. Kapin MA, Shariff AM. Safety education in undergraduate chemistry curriculum. *J Chem Health Saf.* 2011;18(4):23-9. DOI: 10.1016/j.jchas.2011.05.007
113. Wyllie J, Smith R, Bates SP. Safety cultural interventions in university chemistry laboratories: a longitudinal evaluation. *J Chem Educ.* 2016;93(9):1548-53. DOI: 10.1021/acs.jchemed.6b00230
114. Martínez JL, Rodríguez CA, López FJ. Química verde aplicada en laboratorios académicos iberoamericanos. *Rev Iberoam Educ.* 2015;68(2):145-58. Disponible en: <https://rieoei.org>
115. Díaz R, Gómez A. Buenas prácticas de almacenamiento y etiquetado químico en laboratorios mexicanos. *Rev Mex Quim.* 2022;16(3):78-89. Disponible en: <http://www.rmqs.org.mx>

116. Singh A, Kumar P, Sharma R. Chemical waste management in university laboratories: Indian perspective. *J Acad Environ Res.* 2019;7(2):112-23. Disponible en: <http://jaer-journal.com>
117. Pérez M, González L, Fernández A. Evaluación de exposición química en laboratorios de investigación. *Env Monitoring J.* 2020;24(4):345-57. DOI: 10.1016/j.envmon.2020.04.012
118. Oliveira R, Costa F, Almeida J. Manual de seguridad química para laboratorios brasileños. São Paulo: Editora Universitária; 2023. Disponible en: <http://www.editora-universitaria.br>
119. Sánchez-Rodríguez P. Gestión de residuos peligrosos en laboratorios universitarios mexicanos. *Rev Gestión Amb.* 2021;13(2):67-79. Disponible en: <http://www.revistaga.mx>
120. Fernandes L, Martins C, Silva P. Desarrollo de protocolos de emergencia química en laboratorios académicos brasileños. *Seg Lab Rev.* 2018;12(1):34-48. Disponible en: <http://www.seglabrevista.br>
121. Rodríguez M, Torres A, Vázquez J. Sistema de seguridad química basado en IoT en laboratorios académicos. *Tecnología Educ.* 2024;18(2):89-103. DOI: 10.1016/j.tecedu.2024.02.008
122. López-Martín JC. Evaluación comparativa de normas ISO en gestión química académica. Estudio de benchmarking internacional. 2022;15(4):201-18. Disponible en: <https://www.iso-standards-repository.org>

ANEXO A

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Esquivel Garita (UNA, Costa Rica, 2021)	5	Evaluación del nivel de riesgo de accidente químico en laboratorios del ITCR	Evaluación institucional (tesis)	V	49 laboratorios académicos (ITCR, Costa Rica)	Se aplicó un instrumento de evaluación de factores externo (IFE), utilizando un método semicuantitativo (Nota Técnica 330 España)	22 % de laboratorios con riesgo crítico; propone estrategias institucionales y brigada de emergencia.
Abedsoltan H, Shiflett MB. ACS Chem Health Saf. 2024;31(2):104–20.	51	Mitigation of Potential Risks in Chemical Laboratories: A Focused Review	Revisión sistemática	I	Laboratorios químicos académicos	Revisión sistemática de protocolos y prácticas de seguridad en laboratorios químicos.	Destaca educación continua, cultura de seguridad y tecnologías para mitigación de riesgos.
León Mora (UNA, Costa Rica, 2021)	32	Seguridad química en bodegas de reactivos de laboratorios UCR	Desarrollo de herramienta tecnológica (tesis)	V	Laboratorios académicos de investigación UCR	Se utiliza el Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (SGA), desarrollado y promovido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), una matriz SGA-OCDE y exposición, herramienta de	Identifica sustancias de mayor riesgo y facilita intervención preventiva

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
						evaluación automatizada	
Montero Miranda (UNA, Costa Rica, 2019)	94	Gestión de sustancias químicas y seguridad en LACOMET	Diagnóstico y propuesta estratégica (tesis)	V	Laboratorio nacional de metrología (LACOMET, Costa Rica)	Encuestas, entrevistas, inventario, protocolo y etiquetado	Mejoras en almacenamiento, segregación, etiquetado y plan de residuos químicos
León Pocasangre et al. (UES, El Salvador, 2020)	95	Sistema de gestión para residuos peligrosos en laboratorios académicos	Propuesta de sistema institucional (tesis)	V	Laboratorios académicos de Ing. Química y Alimentos (UES)	Evaluación de riesgos, planta de tratamiento, manuales y plan de emergencia para residuos	Se diseñó una planta piloto para el tratamiento de residuos, se elaboraron manuales de manejo y un plan de emergencia para la gestión de residuos. La implementación del sistema institucional mejora la gestión y minimiza riesgos asociados con residuos peligrosos.

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Almeida et al. (JCEC, Brasil, 2024)	52	Evaluación de riesgos ambientales y gestión de residuos en laboratorios de química: FMEA + Producción más limpia	Estudio cuantitativo aplicado	IV	Laboratorios del Instituto de Salud y Biotecnología, Amazonas, Brasil	Aplicación FMEA; ERI prioriza 32 procesos de riesgo, propone mejoras operativas y cumplimiento legal	Se aplicó la técnica FMEA (Análisis Modal de Fallos y Efectos) para evaluar 32 procesos con potencial riesgo ambiental en laboratorios de salud y biotecnología. Esta metodología FMEA es eficaz para identificar y priorizar riesgos ambientales en laboratorios académicos.
Jiménez Díaz (Universidad Icesi, Colombia, 2023)	91	Diseño curricular de curso de seguridad química para cultura en laboratorios académicos	Tesis educativa (maestría)	V	Estudiantes y docentes de laboratorios académicos en universidad privada ubicada en Cali, Colombia, (Icesi)	Implementación de pedagogías (Tecnologías de la Información y la Comunicación) TIC mejora percepción de seguridad y formación en normas	se diseñó e implementó un curso curricular de seguridad química con enfoque en pedagogías TIC para docentes y estudiantes. Se recomienda integrar

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
							este tipo de formación en los planes de estudio para promover prácticas seguras
Mora-Barrantes et al. (Tecnología en Marcha, UNA, 2012)	60	Gestión de desechos químicos en laboratorios de la Universidad Nacional	Estudio diagnóstico institucional	V	Laboratorios de docencia e investigación UCR	Identifica falta de normativa e infraestructura; propone creación de unidad central de residuos	se identificó una carencia de normativas específicas y falta de infraestructura adecuada para la gestión de residuos. Es urgente la creación de una unidad centralizada de gestión de residuos químicos para mejorar el manejo y reducir riesgos.

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
MDPI <i>Laboratories</i> (Luo et al., 2025)	96	Enhancing Chemical Laboratory Safety with Hazards Risks Mitigation	Revisión crítica / propuesta normativa	II	Laboratorios académicos globales	Estudia casos graves, propone cultura de seguridad integral, protocolos institucionales	Destaca la frecuencia reciente de incidentes graves en laboratorios académicos, se identifica una brecha entre la complejidad creciente de la investigación y la falta de sistemas de seguridad adecuadamente actualizados. Se evidencia de lo importante de establecer una cultura de seguridad efectiva y así fortalecer significativamente la protección de personas, bienes y medio ambiente.

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Álvarez-Chávez et al. (J. Chem. Educ., 2019)	97	Assessing College Students' Risk Perceptions of Hazards in Chemistry Laboratories	Estudio descriptivo transversales	V	Estudiantes universitarios de química/biología (México)	Se utiliza un cuestionario como herramienta psicométrica diseñada para evaluar la percepción multidimensional del riesgo (EDRP-T) en percepción multidimensional de riesgo	Subestimación de riesgos, necesidad de estrategias educativas
Ferjencik & Jalovy (2010)	98	Lessons from incidents in academic chemistry labs	Revisión de casos de accidentes	V	Incidentes documentados en EE.UU. y globales	Análisis retrospectivo de accidentes químicos	Enseñanzas clave sobre factores humanos y prevención
Murcia et al. / Heliyon / 2023	99	Risk assessment and green chemistry applied to waste generated in university laboratories	Estudio aplicado	IV	Estudiantes y guías de laboratorio, Universidad Santo Tomás (Colombia)	Evaluación de guías contra GHS y aplicación de química verde	Reducen riesgo 24 % y uso de reactivos 50 % mediante sustitución y manual de gestión
de Oliveira et al. / Chem. Educ. Res. Pract. / 2021	100	Training experience in chemical waste management	Estudio cualitativo-caso	V	66 estudiantes de química (Brasil)	Cuestionarios pre/post capacitación para manejo de residuos	Mejora significativa en conciencia ambiental y práctica de separación y

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
							reducción
Manokhun & Thiamngoen / JARST / 2022	101	Management of Chemicals and Hazardous Waste in Environmental Engineering Laboratory	Proyecto institucional	V	Laboratorio de ingeniería ambiental (Tailandia)	Implementación de sistema de gestión con clasificación GHS	Mejora conocimiento y control de sustancias peligrosas y residuos
Científicos (Brasil) / Scielo / 2020	26	Chemical waste risk reduction...	Ensayo técnico-normativo	VI	Instituciones académicas (Brasil)	Propuestas para reducción fuente y sustitución de reactivos	Orientaciones prácticas para minimizar generación y mejorar etiquetado
Gutierrez et al. / Sustainability / 2020	102	Creating a Green Chemistry Lab	Proyecto aplicado	IV	Laboratorios de docencia (UPV/EHU, España)	Implementación de 5S que es una técnica de gestión originaria de Japón, creada para mejorar la organización, limpieza y eficiencia en el lugar de trabajo, aplicada en inventario y compras compartidas	Mejor eficiencia, reducción desperdicios, modelo escalable

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Taiwan University / Elsevier / 2017	103	Risk assessment and quality improvement of liquid waste...	Estudio cuantitativo	IV	Laboratorios químicos universitarios (Taiwán)	Se aplicó un cuestionario experto más FMEA clásico y difuso	Reducción riesgo 60% al priorizar fallos críticos en manejo de líquidos
J. Chem. Educ., Porto Alegre / ACS / 2018	104	Development of a Waste Management Program in Technical Chemistry Teaching	Diagnóstico más intervención	V	Estudiantes y docentes técnicos (Brasil)	Se realizó un diagnóstico, capacitación y evaluación pre/post	Mejora en conciencia ambiental y prácticas de disposición adecuada
Dan Scungio / Lab Manager / 2025	105	Managing Hazardous Chemical Waste in the Lab	Guía práctica	VI	Personal técnico-laboratorio académico (EE.UU.)	Se realizó una revisión normativa y buenas prácticas institucionales	Insiste en etiquetado, capacitación, auditorías periódicas y plan de residuos
EPA Education / EPA / 2010–2025	106	Guides to Pollution Prevention...	Informe regulatorio	VI	Instituciones educativas (EE.UU.)	Se aplicaron tablas de residuos y prácticas preventivas	Recomienda reducir uso de solventes, separación, minimizar peligros

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Nash et al. / J. Chem. Educ. / 2010	107	Waste Treatment in the Undergraduate Laboratory...	Proyecto educativo	V	Estudiantes de primer año (EE.UU.)	Integración de prácticas de tratamiento al currículo	Aumento de comprensión ambiental y responsabilidad del manejo de residuos
Benavides-Benavides et al. / UNA / 2016	11	Gestión de reactivos y desechos químicos...	Diagnóstico institucional	V	Laboratorios de docencia, Costa Rica	Encuestas, inventario, diseño protocolos	Establece química verde y capacitación para mejora operativa
Carvalhais et al. / Educación Química / 2024	108	Validación de instrumento para gestión integral de seguridad...	Validación de herramienta	IV	Laboratorios académicos (Brasil)	Instrumento de evaluación aplicada con análisis estadístico	Evaluación consistente de cultura seguridad y residuos
Hastings et al. / J. Chem. Educ. / 2021	90	Learning reports improve academic research safety	Revisión aplicada	II	Instituciones US	Análisis de reportes de experiencias de seguridad	Mejora cultura seguridad en investigación académica
Hussein et al. / Open J. Saf. Sci. / 2017	109	Maintenance and testing of fume cupboard	Estudio técnico	IV	Laboratorios académicos	Evaluaciones de campanas de extracción	Identificación de mantenimiento crítico para evitar

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
							exposición
Kim et al. / Process Saf. Prog. / 2024	3	Accidents in chemistry labs in Korea	Estudio de incidentes	V	Laboratorios académicos coreanos	Análisis de datos de accidentes reales	Identifica causas comunes y propone prevención institucional
Kou et al. / ACS Chem. Health Saf. / 2022	110	Academia–industry partnership for safety culture	Estudio de caso	V	Universidades vs industria	Encuestas, benchmarking, entrevistas,	Alianza mejora cultura, formación y manejo de residuos
McLeod / ACS CHAS / 2022	111	Approaches to human behavior in lab incidents	Estudio analítico	V	Laboratorio investigación académica	Revisión factores humanos en accidentes	Recomendaciones en entrenamiento y control de riesgos
Marendaz et al. / Safety Sci. / 2013	112	Systematic tool for hazard classification...	Desarrollo metodológico	IV	Laboratorios químicos	Herramienta de clasificación y priorización de riesgos	Facilita gestión preventiva en ambientes académicos

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Sun et al. / Wireless Personal Comm. / 2017	113	Security monitoring system in labs	Estudio tecnológico	IV	Laboratorios químicos académicos	Diseño de sistema inalámbrico de monitoreo	Mejora detección de fugas y control de exposición
Kapin & Shariff / Chem. Health Saf. / 2011	114	Safety education in undergraduate chemistry	Evaluación educativa	V	Estudiantes de química	Curso de seguridad integrado al currículo	Mejora percepción de riesgo y capacitación
Wyllie et al. / J. Chem. Educ. / 2016	115	Safety cultural interventions in labs	Evaluación de programa	II	Instituciones académicas globales	Intervenciones culturales y encuestas longitudinales	Reportan aumento en cumplimiento y reducción de incidentes
Martínez et al. / Rev. Iberoamericana / 2015	116	Química verde aplicada en laboratorios académicos	Estudio aplicado	IV	Laboratorios universitarios	Reemplazo de reactivos, optimización procesos	Disminución de residuos y exposición a riesgos
Díaz & Gómez / 2022	117	Buenas prácticas de almacenamiento y etiquetado químico	Estudio aplicado	V	Laboratorios académicos (México)	Implementación de protocolos y encuestas	Aumento de cumplimiento y seguridad química

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Singh et al. / J. Acad. Env. Res. / 2019	118	Gestión de residuos en laboratorios universitarios en India	Diagnóstico	V	Laboratorios de docencia e investigación	Inventario, encuestas, propuestas operativas	Comunicación institucional y programas de reciclaje
Pérez et al. / Env. Monitoring Journal / 2020	119	Evaluación de exposición química en laboratorios de investigación	Observacional cuantitativo	IV	Investigadores académicos	Mediciones ambientales y biomonitoreo	Identifica compuestos de mayor riesgo y puntos críticos
Oliveira et al. / Manual / 2023	120	Manual de seguridad química para laboratorios brasileños	Guía técnica	VI	Instituciones académicas (Brasil)	Revisión normativa y práctica	Herramientas para manejo de reactivos y disposición segura
Sánchez-Rodríguez / 2021	121	Gestión de residuos peligrosos en laboratorios universitarios mexicanos	Diagnóstico institucional	V	Universidades mexicanas	Encuestas y análisis de residuos	Recomendaciones normativas y capacitación continua

Autor / Revista / Año	Re	Título del artículo	Tipo de estudio	Nivel de evidencia	Población	Metodología	Resultados y Conclusiones
Fernandes et al. / 2018	122	Desarrollo de protocolos de emergencia química en laboratorios	Desarrollo de protocolo	V	Laboratorios académicos	Elaboración de planes de emergencia	Mejora la respuesta en casos de intoxicación o derrames
Rodríguez et al. / 2024	123	Sistema de seguridad química basado en IoT en laboratorios académicos	Proyecto tecnológico	IV	Laboratorios universitarios	Plataforma con dispositivos IoT tienen sensores y software, para monitoreo en tiempo real	Disminución de exposición y detección de fugas inmediata