GRUPO BLR

MANUAL DE MANIPULACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SUSTANCIAS EN ACTIVIDADES ACADÉMICAS Y DE INVESTIGACIÓN DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

ISBN: 978-9907-852-26-4

Denis Alexander Mosquera Muñoz

2026

MANUAL DE MANIPULACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SUSTANCIAS EN ACTIVIDADES ACADÉMICAS Y DE INVESTIGACIÓN DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

Denis Alexander Mosquera Muñoz

AUTOR

UTMACH

Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Universidad Técnica de Machala
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupoblr.com
https://grupoblr.com/libros-investigo
REPOSITORIO



Mosquera, D. (2026)Manual de Manipulación y Disposición de Sustancias en Actividades Académicas y de Investigación de las Ciencias Ambientales. Grupo Editorial BLR.

© Denis Alexander Mosquera Muñoz

Manual de Manipulación y Disposición de Sustancias en Actividades Académicas y de Investigación de las Ciencias Ambientales

ISBN: 978-9907-852-26-4

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

Filiación de autores

Denis Alexander Mosquera Muñoz

Universidad Técnica de Machala

Correo Electrónico: dmosquera1@utmachala.edu.ec

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8772-0155

PRÓLOGO

A lo largo de más de diez años de trabajo en proyectos de investigación internacionales —desde las islas Galápagos hasta laboratorios especializados en Austria, pasando por distintos entornos académicos aquí en el Ecuador continental— he podido comprobar de primera mano que aplicar con rigor un protocolo de seguridad no solo protege la vida de las personas: también resguarda, al mismo tiempo, la calidad y la integridad de los resultados científicos que se obtienen.

Este manual nace, en el fondo, de una carencia bastante concreta: no existía una guía práctica que abordara de manera directa los retos que enfrentan a diario estudiantes, docentes e investigadores en el campo de las ciencias ambientales, desde el manejo de muestras biológicas en estudios de ecología y biodiversidad hasta la disposición correcta de los reactivos que se emplean en los análisis de calidad ambiental. La idea de escribir este texto surgió, sobre todo, de la experiencia directa acumulada en campo y en laboratorio, donde he podido notar que los accidentes más comunes rara vez se deben a un desconocimiento de las sustancias más peligrosas; ocurren, más bien, cuando se subestima el riesgo de materiales que parecen "inofensivos" o de procedimientos que, de tanto repetirse, ya se volvieron pura rutina.

En las instituciones de educación superior, buena parte de los accidentes laborales tiene lugar precisamente en los laboratorios, y son justamente los estudiantes quienes suelen llevarse la peor parte de esas cifras — un dato que, por sí solo, ya justifica la necesidad de contar con material formativo especializado y bien pensado. Mi propio paso por proyectos

como la protección de los pinzones de Darwin, junto con distintos estudios de biodiversidad en ecosistemas particularmente sensibles, me convenció de que quienes trabajamos en ciencias ambientales cargamos con una responsabilidad que va mucho más allá de cuidarnos a nosotros mismos: tenemos también el deber de preservar los ecosistemas que estudiamos, y cada protocolo de seguridad que ponemos en práctica dentro del laboratorio debería reflejar ese compromiso con la sostenibilidad ambiental.

Esta primera edición del manual está dirigida principalmente a estudiantes de pregrado y posgrado en ciencias ambientales, así como a docentes e investigadores que buscan mejorar el manejo de sustancias dentro de sus propios entornos de trabajo. También le será de utilidad, igualmente, a técnicos de laboratorio y a otros profesionales que se desempeñan en consultorías ambientales. En cada capítulo procuré, en la medida de lo posible, combinar fundamentos teóricos sólidos con aplicaciones prácticas, incluyendo casos reales y lecciones que provienen directamente de la experiencia acumulada en el campo.

La estructura de este manual está pensada tanto para una lectura secuencial y de corrido como para la consulta puntual de un tema específico, según lo que necesite cada lector. Cada sección incluye protocolos actualizados, referencias a la normativa tanto nacional como internacional, y recomendaciones concretas para diferentes escenarios de trabajo; a esto se suma, además, una mirada de sostenibilidad que conecta las prácticas de seguridad con los principios de la química verde y con la responsabilidad ambiental en general.

Quiero dar las gracias, a las instituciones y colegas que me ayudaron a formarme en las ciencias naturales y en el trabajo de laboratorio. En especial le agradezco a la Universidad de Viena, a la Fundación Charles Darwin, y a varias organizaciones internacionales con las que tuve la suerte de trabajar. Sus reglas tan exigentes y su forma de cuidar la seguridad marcaron mucho la manera en que hoy veo este trabajo, de forma completa e integral.

Espero de verdad que este manual ayude a formar una nueva generación de científicos ambientales. Ojalá sean buenos en su carrera, pero también verdaderos ejemplos de seguridad en el laboratorio y de cuidado por el ambiente. Vivimos en un mundo donde los problemas ambientales necesitan soluciones rápidas y nuevas ideas. Por eso no podemos permitir que un accidente que sí se podía evitar detenga el esfuerzo de todos por entender y proteger el planeta donde vivimos.

“La seguridad y la conciencia ambiental no son obstáculos, son la base que hace posible la innovación científica de manera sostenible y responsable“.

Denis Alexander Mosquera Muñoz

Machala 2026

ÍNDICE

PRÓLOGO ..... **i**

ÍNDICE ..... **iv**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **xi**

INTRODUCCIÓN ..... **xiii**

CAPÍTULO I **14**

1 INTRODUCCIÓN A LA MANIPULACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SUSTANCIAS EN ENTORNOS ACADÉMICOS **14**

CAPÍTULO II **19**

2 MARCO NORMATIVO Y CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS **19**

2.1 Marco Regulatorio para Laboratorios Académicos 19

2.2 Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS) 20

2.3 Marco Regulatorio Internacional – el caso de Europa (REACH-CLP) 21

2.4 Normativas Ecuatorianas 23

2.5 Consideraciones Especiales en Universidades Públicas del Ecuador..... 24

2.6 Clasificación de Sustancias Químicas y Materiales Peligrosos – GHS..... 26

2.6.1 Peligros Físicos..... 29

2.6.2 Peligros para la Salud..... 30

2.6.3 Peligros Ambientales..... 33

2.6.4 Consideraciones Especiales para Entornos Académicos..... 34

2.7 Implementación de Sistemas de Clasificación en Universidades Ecuatorianas..... 35

2.8 Herramientas y Recursos para Clasificación..... 36

2.9 Tendencias Futuras en Clasificación de Sustancias..... 37

2.9.1 Agencias de categorización:..... 62

CAPÍTULO III 64

3 ALMACENAMIENTO, MANIPULACIÓN SEGURA Y BUENAS PRÁCTICAS EN LABORATORIOS 64

3.1 Fundamentos del Almacenamiento Seguro..... 64

3.2 Infraestructura de Almacenamiento..... 66

3.3 Manipulación Segura de Sustancias..... 68

3.4 Sistemas de Ventilación y Campanas Extractoras 70

3.5 Buenas Prácticas de Laboratorio 72

3.6 Organización y Gestión del Espacio de Trabajo 73

3.7 Química Verde y Prácticas Sostenibles..... 74

3.8 Capacitación y Desarrollo del Personal..... 76

3.9 Documentación y Mantenimiento de Registros 78

3.10 Procedimientos de Emergencia 80

3.11 Tecnología y Automatización para Seguridad 82

3.12 Evaluación y Mejora Continua..... 84

3.13 Implementación en Universidades Ecuatorianas..... 85

3.14 Tendencias Futuras e Innovaciones..... 86

CAPÍTULO IV..... 88

4 ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y RESPUESTA A EMERGENCIAS SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES..... 88

4.1 Gestión de Residuos en Instituciones Educativas 88

4.2 Minimización de Residuos y Prevención de la Contaminación 89

4.3 Clasificación y Segregación de Residuos Químicos 91

4.4 Tratamiento y Neutralización de Residuos 93

4.5 Almacenamiento Temporal y Áreas de Acumulación 94

4.6 Gestión de Residuos Especializados 95

4.7 Tecnologías de Tratamiento y Disposición Final..... 96

4.8 Evaluación de Riesgos en Entornos Académicos..... 99

4.9 Recomendaciones de Respuesta a Emergencias 103

4.10 En el contexto universitario de la carrera de Ingeniería Ambiental en la UTMACH 106

CAPÍTULO V 108

5 EXPERIENCIAS HISTÓRICAS EN ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS Y RESIDUOS. 108

5.1 Criterios de selección y marco de análisis de las experiencias 111

5.2 Experiencia 1. Estados Unidos: cultura de seguridad liderada por estudiantes, investigadores y la transformación institucional 114

5.2.1 Descripción del método implementado 115

5.2.2 Análisis en tres niveles 117

5.2.3 Resultados y evidencia 119

5.2.4 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas 119

5.3 Experiencia 2. España (País Vasco): diseño de un laboratorio de química verde con compra responsable y gestión sostenible de recursos 121

5.3.1 Descripción del método implementado 121

5.3.2 Resultados y evidencia 125

5.3.3 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas 126

5.3.4 Experiencia 3. Singapur: minimización de residuos en laboratorios de docencia mediante microescala, sustitución y recuperación 127

5.3.5 Descripción del método implementado 128

5.3.6 Análisis en tres niveles 129

5.3.7 Resultados y evidencia 131

5.3.8 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas 133

5.4 Experiencia 4. Colombia: evaluación de riesgos y química verde aplicadas a los residuos de laboratorios universitarios 134

5.4.1 Descripción del método implementado 135

5.4.2 Análisis en tres niveles 137

5.4.3 Resultados y evidencia 138

5.4.4 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas 139

5.5 Experiencia 5. Irán: implementación sistemática de evaluación de riesgos de salud, seguridad y ambiente (HSE) como serie de casos 140

5.5.1 Descripción del método implementado 141

5.5.2 Análisis en tres niveles 143

5.5.3 Resultados y evidencia 144

5.5.4 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas 145

5.5.5 Síntesis Comparativa y Lecciones Transversales de las Experiencias Históricas Analizadas 146

5.5.6 Hoja de ruta para las universidades públicas ecuatorianas.. 150

CAPÍTULO VI..... 156

6 CASOS DE ESTUDIO Y PROGRAMAS DE SEGURIDAD 156

6.1 Caso 1. Incidente por almacenamiento inadecuado de peróxidos orgánicos 156

6.1.2 Caso 2. Exposición a vapores de mercurio en un laboratorio de análisis 158

6.1.3 Caso 3. Reacción exotérmica no controlada en síntesis orgánica 160

6.2 Sistemas de Monitoreo Inteligente 161

6.3 Realidad Virtual y Aumentada 162

6.4 Evaluación de programas de seguridad 163

6.5 Recomendaciones para la implementación de programas de manejo de sustancias 165

6.6 Preguntas para la reflexionar y pasar de la lectura a la práctica 170

BIBLIOGRAFÍA 172

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.Clasificación de sustancias comúnmente utilizadas en entornos académicos y científicos en las ciencias ambientales 41

Tabla 2.Métodos de Tratamiento y Gestión de Residuos Químicos 104

Tabla 3. Marco Metodológico de Identificación de Riesgos - RAMP 107

Tabla 4. Metodología de Tres Fases 109

Tabla 5.Escalas de Evaluación de Riesgo 102

Tabla 6. Experiencias Investigadas 122

Tabla 7.Componentes del modelo estadounidense 128

Tabla 8.Líneas de acción de la compra responsable y la química verde, y su efecto sobre la seguridad del almacenamiento 124

Tabla 9. Estrategias de minimización de residuos en laboratorios de docencia y su impacto 130

Tabla 10. Articulación entre evaluación de riesgos y química verde en la gestión de residuos 138

Tabla 11. Fases de la implementación sistemática de la evaluación de riesgos HSE 144

Tabla 12. Síntesis comparativa de las cinco experiencias y sus lecciones transferibles..... 149

Tabla 13. Modelo de implementación de estrategias basado en fases 150

INTRODUCCIÓN

Objetivo General

Este manual busca ofrecer una guía práctica y accesible para manipular y disponer de forma segura las sustancias que se usan en actividades académicas y de investigación en ciencias ambientales, cumpliendo la normativa internacional, pero sin perder de vista las particularidades de las universidades públicas del Ecuador, con miras a un entorno seguro y sostenible.

Estructura del Manual

El manual está estructurado en seis capítulos, que abordan desde la normativa aplicable y la clasificación de sustancias hasta el almacenamiento seguro, la gestión de residuos, la evaluación de riesgos y un conjunto de casos de estudio. Además, incluye una lista detallada de las sustancias más frecuentes en entornos académicos, con recomendaciones específicas para la manipulación de cada una de ellas.

CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN A LA MANIPULACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SUSTANCIAS EN ENTORNOS ACADÉMICOS

Usar sustancias y materiales en actividades académicas y de investigación es, dentro de las ciencias ambientales, parte central del proceso de aprendizaje: es justamente lo que le permite a estudiantes e investigadores entender procesos complejos, realizar análisis precisos y proponer soluciones innovadoras frente a los desafíos ambientales contemporáneos (National Research Council, 2014). Los laboratorios académicos, de hecho, suelen considerarse entornos más peligrosos que los de la industria, precisamente porque la gestión de la seguridad química ahí tiende a ser menos estricta (Peplow & Marris, 2006) — de modo que el manejo de sustancias químicas en la universidad va mucho más allá de una simple aplicación académica y no debería tratarse como un asunto menor. Las cifras, además, lo confirman con claridad: cerca del 18% de los accidentes ocupacionales registrados en instituciones de educación superior está relacionado con entornos de laboratorio, y en aproximadamente un tercio de esos accidentes, los estudiantes terminan siendo las principales víctimas (Simmons et al., 2017; Van Noorden, 2013).

Las instituciones académicas cargan con una responsabilidad ética y legal que resulta ineludible: garantizar que tanto el personal docente como el estudiantil cuenten con la formación adecuada en materia de seguridad. Esa cultura de seguridad, dentro de las instituciones

educativas, depende tanto del peso de la normativa interna como de lo que cada persona decide hacer en su práctica diaria, y varios estudios realizados en regiones que han enfrentado problemas de manipulación de sustancias en entornos académicos apuntan a una misma conclusión: falta liderazgo institucional para establecer un ambiente verdaderamente seguro (R. H. Hill, 2007; Wu et al., 2007). Esa iniciativa interna de gobernanza institucional es, precisamente, lo que le permitiría a una institución asegurar que su personal docente y estudiantil cuente con formación adecuada, que los espacios de trabajo cumplan con los estándares de seguridad exigidos, que los procedimientos estén alineados con la normativa nacional e internacional, y que existan protocolos claros para la gestión de emergencias (Wang et al., 2019). Formar en manipulación segura de sustancias no solo protege a la comunidad académica inmediata: también forma profesionales que aplicarán esos principios a lo largo de su vida laboral, multiplicando así el impacto positivo en el resto de la sociedad.

Identificar y comprender bien los riesgos asociados al manejo de sustancias químicas resulta clave para desarrollar cualquier estrategia efectiva de prevención y control. La literatura disponible sobre seguridad y salud de laboratorios en instituciones de educación superior documenta un número considerable de incidentes de laboratorio que han derivado en muertes y lesiones causadas por incendios, explosiones y equipos defectuosos, algunos con secuelas debilitantes de por vida (Fatemi et al., 2022). El aula de clase, que es el escenario más común dentro de los entornos académicos, ha sido analizada en repetidas ocasiones en investigaciones sobre seguridad académica (Abbas et al.,

2016; Karapantsios et al., 2008; Liu et al., 2023), y cuando se evalúa la seguridad de laboratorio a partir de la propia comprensión de los estudiantes, las deficiencias en su preparación resultan bastante notorias y preocupantes (Karapantsios et al., 2008). En ese tipo de sesiones se manejan cantidades pequeñas de sustancias para demostraciones didácticas, casi siempre con la participación de un número considerable de estudiantes con niveles de experiencia muy variables y con un tiempo límite bastante ajustado. Entre las sustancias que se usan típicamente están los indicadores ácido-base como la fenolftaleína y el azul de bromotimol, soluciones diluidas de ácidos y bases, materiales para análisis de agua —incluyendo kits de pH y oxígeno disuelto— y diversos reactivos que se emplean en demostraciones de reacciones químicas. Una revisión bibliométrica de la seguridad en laboratorios universitarios confirma que los accidentes han aumentado en frecuencia, y que hace falta un enfoque bastante más sistemático para la gestión de riesgos (Yang et al., 2019). Elevar la seguridad en estos entornos exige, en consecuencia, aplicar estrategias integrales que incluyan mayor énfasis en medidas de seguridad colectiva, la producción de protocolos simplificados pero efectivos, el mantenimiento de una supervisión constante y la gestión de residuos desde las cantidades más pequeñas (Liu et al., 2023). Y un programa de seguridad de laboratorio no puede quedarse simplemente en cumplir el reglamento: tiene que fomentar, además, que todos los actores involucrados —no solo quien firma el protocolo— sostengan una cultura de seguridad sólida y positiva en todos los entornos académicos y de investigación donde se utilizan sustancias (National Research Council, 2014), reconociendo siempre

que cada espacio tiene características específicas que determinan qué protocolo de seguridad le corresponde en cada caso (Foster, 2004).

Una exposición accidental a ciertas sustancias no distingue entre especies: implica riesgos para todo organismo vivo, incluyendo por supuesto a los seres humanos, y algunas de esas sustancias presentan además un alto potencial para generar impactos ambientales significativos. Entre los riesgos más importantes a tener en cuenta está la contaminación del aire, que puede deberse a la emisión de vapores tóxicos en espacios cerrados, a la liberación de compuestos orgánicos volátiles, a la generación de aerosoles durante la manipulación, y al deterioro general de la calidad del aire dentro de un laboratorio o de un aula de clase. También puede producirse contaminación del agua, ya sea por derrames que alcanzan los sistemas de drenaje, por la disposición inadecuada de residuos líquidos, por infiltración hacia aguas subterráneas o por la afectación directa de cuerpos de agua superficiales. La contaminación del suelo, por su parte, puede ocurrir por derrames en áreas sin la protección adecuada, por el enterramiento inadecuado de residuos sólidos, por la acumulación de contaminantes persistentes y por su paso posterior a la cadena trófica terrestre. Y aparte de todo esto existen otros riesgos operativos igual de importantes, como la generación de incendios por ignición de vapores de solventes inflamables, las reacciones exotérmicas que se salen de control, el sobrecalentamiento de equipos, y el almacenamiento inadecuado de materiales combustibles.

Hay herramientas sistemáticas que permiten evaluar y clasificar los peligros de un laboratorio de forma estructurada, identificando los

riesgos propios de cada entorno de trabajo (Marendaz et al., 2013). Y como la percepción de la seguridad química cambia bastante entre un tipo de institución y otro, cada contexto académico necesita, en realidad, su propio enfoque (Al-Zyoud et al., 2019). No es casualidad, entonces, que la seguridad de laboratorio se haya consolidado como disciplina formal a raíz de incidentes concretos y del reconocimiento de que hacía falta un protocolo más riguroso (R. H. Hill, 2007).

Desde que se establecieron los primeros estándares de laboratorio en el siglo XIX, la conciencia sobre seguridad en entornos académicos ha avanzado mucho, y hoy el manejo seguro de sustancias químicas responde a un marco normativo que va de los acuerdos internacionales hasta la regulación local más específica. Establecer normas que realmente se ajusten a cada entorno académico y científico sigue siendo, sin embargo, el factor decisivo para reducir la probabilidad de que ocurra una exposición accidental. En los laboratorios de ciencias ambientales de la Universidad Técnica de Machala, donde a diario se usa un espectro muy amplio de equipos y materiales, esto se traduce en algo muy concreto: necesitamos herramientas y materiales de referencia propios para socializar y formar a estudiantes y personal sobre los riesgos químicos, físicos y biológicos, y sobre el nivel de protección que cada sustancia exige.

CAPÍTULO II

2 MARCO NORMATIVO Y CLASIFICACIÓN DE SUSTANCIAS QUÍMICAS

2.1 Marco Regulatorio para Laboratorios Académicos

Un laboratorio universitario no es como una fábrica. Por eso necesita sus propias reglas. Una fábrica usa pocas sustancias, casi siempre las mismas y en cantidades parecidas (National Research Council, 2014). En cambio, en la universidad hay muchas sustancias distintas, en cantidades más pequeñas. Y siempre están mezclados estudiantes de pregrado, estudiantes de posgrado, investigadores, técnicos y profesores, cada uno con su propia experiencia (Settimo et al., 2020). Por eso hace falta enseñar y vigilar de forma distinta según el caso. Muchas normas se copian de otros sectores. Pero las reglas de un laboratorio universitario deberían pensarse primero como un lugar para aprender (Northwestern University, 2024).

En un laboratorio universitario se mezclan todos los días sustancias comunes con materiales muy especiales, algunos hechos solo para una investigación puntual. Por eso las reglas deben ser amplias, para no frenar la enseñanza ni la investigación, pero sin bajar la guardia en seguridad. Las normas han cambiado mucho desde las primeras reglas de seguridad. Cuando se entendió que un laboratorio no es igual a una fábrica, empezaron a aparecer normas hechas a su medida. Un paso muy importante fue el estándar de laboratorio de la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA, 29 CFR 1910.1450), del año 1990, que después se copió en otros países. Ese estándar dejó claro que

la industria química y el laboratorio de investigación necesitan reglas distintas (Ennis, 2019; OSHA, 2015). El personal de laboratorio enfrenta riesgos químicos, biológicos, físicos, de radiación y hasta de dolor muscular. Todo eso está cubierto por muchas normas locales, estatales y federales (National Research Council, 2014).

Las reglas de los laboratorios académicos se apoyan en dos ideas. La primera es que toda persona tiene derecho a trabajar en un lugar seguro. La segunda es que la investigación necesita libertad para hacer ciencia. La universidad tiene el deber legal y ético de dar espacios seguros a toda su comunidad. Eso incluye a los estudiantes, que aunque no son empleados merecen la misma protección que el personal contratado (Tang, 2025). Y hay algo importante que quiero resaltar. Un fallo de seguridad en el laboratorio no es solo un descuido. Es una falta grave, porque pone en riesgo a las personas y también la validez de los resultados de la investigación (Tang, 2025).

2.2 Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos (GHS)

El Sistema Globalmente Armonizado nació de una decisión tomada en el Capítulo 19 de la Agenda 21, acordado en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo en 1992 (United Nations, 1992). Pero no se adoptó de forma oficial hasta el 2002, después de muchos años de negociación entre países. El GHS pone orden en algo que antes era un caos. Clasifica todo peligro químico en tres grupos grandes, riesgos físicos, riesgos para la salud y riesgos para el ambiente (United Nations, 2017). Dentro de cada grupo hay clases de

peligro, y esas clases se dividen según qué tan grave es el riesgo. Ese es, probablemente, el aporte más grande de este sistema para poner de acuerdo a todo el mundo sobre cómo clasificar las sustancias químicas.

El GHS se apoya en tres partes. La primera es un sistema de clasificación que usa números y descripciones para cada tipo de peligro. La segunda son herramientas para comunicar el peligro, como pictogramas, palabras de advertencia, frases de peligro y consejos de seguridad. Cualquier persona, en cualquier país, puede entenderlas de un vistazo. La tercera son las fichas de datos de seguridad, las FDS, donde está toda la información técnica en un formato fijo de 16 secciones que ya se usa en todo el mundo.

En los países de América Latina, el GHS se ha ido adoptando poco a poco, con ajustes propios para cada país. Esto es al mismo tiempo una oportunidad y un reto grande para las universidades de la región. Una de las ventajas más claras es que ya existe mucha información escrita sobre cómo otros países aplicaron estos estándares. Eso lo convierte en una herramienta muy útil para usarla en los laboratorios ambientales de la Universidad Técnica de Machala.

2.3 Marco Regulatorio Internacional – el caso de Europa (REACH-CLP)

El Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias y Mezclas Químicas (REACH) y el Reglamento CLP de Clasificación, Etiquetado y Envasado son normas de la Unión Europea. Entre los dos forman un esquema bastante amplio para manejar productos químicos. Y sí, ese esquema también alcanza a los laboratorios universitarios que

trabajan en proyectos internacionales. Algo sorprendente de REACH es que no importa cuánta cantidad se use. Cubre cualquier sustancia química, sin importar el volumen anual. Así que hasta una cantidad pequeña usada solo para investigación puede quedar sujeta a esta norma. Una universidad que importe sustancias o produzca más de una tonelada al año podría tener que registrarse en este sistema.

El Reglamento CLP es la norma europea (CE) N.º 1272/2008 sobre clasificación, etiquetado y envasado de sustancias y mezclas químicas. Empezó a regir el 20 de enero de 2009 en toda la Unión Europea (Health and Safety Executive, 2025). En el fondo, es el GHS puesto en práctica en Europa. Tiene reglas claras sobre cómo clasificar, etiquetar y envasar un producto, y los fabricantes, importadores y quienes lo usan deben cumplirlas antes de vender un químico peligroso. También pide avisar con información sobre las sustancias y las mezclas. Para un laboratorio universitario esto quiere decir clasificar todas sus sustancias según el GHS, poner la etiqueta correcta en cada envase, tener siempre al día las fichas de datos de seguridad, y avisar las clasificaciones al inventario de cada país. Si la universidad participa en proyectos internacionales o intercambia materiales con instituciones europeas, debe cumplir con REACH y con el CLP al mismo tiempo. A veces esto implica nombrar un representante único en la Unión Europea para las sustancias importadas, o hacer los registros necesarios (Vinceti et al., 2021).

Mover sustancias y materiales de investigación dentro de la Unión Europea no es un tema para tomar a la ligera. Se considera de alto riesgo, y por eso las normas piden recomendaciones especiales y el aval de oficinas especializadas antes de hacerlo. Mover cosas peligrosas entre

universidades sigue reglas internacionales, y hay que tener mucho cuidado. Por ejemplo, las normas de mercancías peligrosas de la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) piden clasificar bien el material, usar un empaque especial, llevar los papeles correctos, y respetar cuánto se puede llevar como máximo. El Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG) pide lo mismo, pero para cuando el transporte es por barco, y esto incluye muestras de investigación y reactivos especiales. Al final, cumplir con todo esto es responsabilidad de la propia universidad.

2.4 Normativas Ecuatorianas

En Ecuador, el marco legal se forma con varias normas que se complementan. La Constitución reconoce el derecho de toda persona a vivir en un ambiente sano, dice que el Estado debe prevenir daños ambientales, y aplica el principio de precaución para cualquier actividad que pueda causar daño. Desde abril de 2018, el Código Orgánico del Ambiente (COA) es la norma más importante del país en materia ambiental. Su Artículo 1 dice que este Código busca garantizar el derecho de las personas a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, y proteger los derechos de la naturaleza para el buen vivir o *sumak kawsay* (República del Ecuador, 2017). Sus artículos 211 a 223 regulan la gestión de sustancias químicas, y dicen que la Autoridad Ambiental Nacional dirige esta gestión a través de políticas y lineamientos (República del Ecuador, 2017). Además, el Acuerdo Ministerial 142 sobre el registro de generadores de desechos peligrosos exige que las instituciones que pasan ciertos límites se registren, usen

manifiestos únicos para dar seguimiento a sus residuos, y presenten reportes periódicos sobre cuánto desecho generan.

El etiquetado de sustancias en Ecuador sigue las normas del Instituto Ecuatoriano de Normalización, creado en agosto de 1970 y encargado de la regulación técnica y la metrología del país (Gobierno de la República del Ecuador, 2021). Sus normas también incluyen los estándares del GHS, con reglas concretas para etiquetas, símbolos y colores. Y algo que parece obvio pero vale la pena decirlo, toda la información debe estar en español.

2.5 Consideraciones Especiales en Universidades Públicas del Ecuador

Las universidades públicas del país enfrentan sus propios retos y oportunidades para manejar de forma segura las sustancias químicas. Esto viene sobre todo de su contexto económico, institucional y cultural. Entre los retos están una infraestructura muy despareja, laboratorios con distintos niveles de modernización, sistemas de ventilación insuficientes en las instalaciones más antiguas, poco espacio para guardar sustancias con seguridad, y a veces la falta de equipos de emergencia adecuados. Y esto no es solo una idea mía, varios estudios sobre la percepción de seguridad en estudiantes de contextos parecidos muestran que la cultura de seguridad necesita más atención en las universidades que aún están creciendo institucionalmente (Gong, 2019).

Enseñar sobre seguridad química no funciona con recetas copiadas de otro lugar. Hace falta un enfoque pensado para el contexto local y las necesidades de cada institución (Sonawane et al., 2022). En Ecuador

esto significa presupuestos ajustados para comprar equipos de seguridad, dificultad para mantener al día los inventarios de sustancias, límites para contratar servicios especializados de disposición de residuos, y la necesidad de aprovechar bien los recursos que hay. A esto se suma que el personal tiene distintos niveles de formación en seguridad química, y hay mucha rotación de personal técnico y asistentes. Por eso hace falta capacitación continua, y no solo un curso una vez.

Del lado de las fortalezas del país hay bastante que rescatar. Primero, el compromiso de las instituciones con la educación, que incluye formación en responsabilidad social, apertura para usar nuevas formas de enseñar, capacidad de investigar problemas locales, y vínculos con las comunidades para compartir conocimiento fuera del aula. Las normas también ayudan, porque hay una legislación ambiental progresista, apoyo constante del gobierno a la educación superior, programas para fortalecer capacidades científicas, e incentivos para promover una investigación responsable.

Entre las estrategias que mejor funcionan en este contexto están hacer los cambios poco a poco, según el riesgo y los recursos disponibles, avanzar por fases evaluando todo el camino, aprovechar experiencias que ya funcionaron en otra facultad, y crear protocolos hechos a la medida de cada lugar. De hecho, este mismo manual nace de esa idea de adaptar las cosas al contexto. Y no hay que olvidar el papel de los estudiantes, los enfoques de seguridad impulsados por ellos mismos han funcionado bien cuando se hacen con orden y con apoyo de la institución (Wang et al., 2019).

La colaboración entre instituciones ecuatorianas ha dado frutos concretos con el tiempo, como redes universitarias para compartir recursos y conocimiento entre facultades, alianzas con empresas privadas para gestionar residuos, cooperación con organismos internacionales, y participación en programas regionales de capacitación. Todo esto se ve en el día a día, la seguridad química ya aparece en los planes de estudio, se crean casos prácticos con problemas propios del país, se usan tecnologías de monitoreo que tienen sentido para nuestro contexto, y hay más impulso a la investigación aplicada en este tema.

En lo cultural, Ecuador le aporta algo importante a la academia, un entorno social que valora la educación como motor de progreso, una tradición fuerte de trabajo comunitario para resolver problemas, un respeto genuino por el conocimiento ancestral sobre el manejo de sustancias naturales, ese saber que casi nunca aparece en los manuales técnicos, y una enseñanza que cada vez incluye más perspectivas interculturales. La responsabilidad ambiental también se nota, hay más conciencia en la población sobre los problemas del entorno. Y en mi opinión, el vínculo entre la academia y los movimientos locales de conservación es una oportunidad real, todavía poco aprovechada, para formar líderes ambientales.

2.6 Clasificación de Sustancias Químicas y Materiales Peligrosos – GHS

Clasificar bien una sustancia química es, en el fondo, el primer paso de todo lo demás. De ahí depende la evaluación, la comunicación y el manejo del riesgo, tanto en el aula como en el laboratorio de

investigación. Es un proceso ordenado que agrupa las sustancias según lo que pueden hacer, y eso es justo lo que permite decidir con fundamento cómo manejar cada una.

La clasificación se apoya en criterios científicos que miran propiedades físicas, químicas, toxicológicas y ambientales. Hay algo que siempre recalco en clase, no todos los cancerígenos funcionan igual. Los mecanismos no genotóxicos, esos que no dañan el ADN de forma directa, han ganado mucha importancia en los últimos años. Permiten crear formas de clasificar más específicas, según cómo actúa de verdad la sustancia, y no solo por el efecto final que produce (Benigni et al., 2013). Con el tiempo, esas ideas pasaron de tener sistemas distintos en cada país a un solo marco compartido a nivel internacional, y hoy el GHS es el más usado de todos (United Nations, 2017; van der Kolk, 2023). Entender bien estos métodos es muy importante para poder aplicarlos, porque las herramientas que se crean a partir de ellos, para comunicar el peligro, responden a distintas formas de pensar qué se debe avisar y cómo se debe avisar.

El GHS clasifica según lo que la sustancia puede hacer, por sus propiedades propias, y no según cómo se la esté usando en un momento dado. Ese enfoque basado en el peligro, y no en la exposición real, es justo lo que permite crear categorías universales que sirven en distintos países (Doe et al., 2019). Detrás de cada categoría hay una evaluación cuidadosa de datos experimentales y toxicológicos, estudios de toxicidad de corto y largo plazo, pruebas de mutagenicidad y carcinogenicidad, y la medición de propiedades físicas y químicas importantes para la seguridad de quien la manipula (European

Chemicals Agency (ECHA), 2023; OECD, 2018). Como todos estos criterios se apoyan en ciencia que se puede repetir, terminan dando coherencia y confianza al momento de clasificar los riesgos de cualquier producto químico (National Research Council, 2014).

Algo que me parece interesante es que los modelos de computadora basados en aprendizaje automático y en el análisis de estructuras moleculares han cambiado por completo cómo se predice si un compuesto químico puede causar cáncer o dañar el ADN. Ciertos rasgos se relacionan de forma bastante clara con ese potencial dañino de una molécula, lo que permite anticipar riesgos sin usar siempre los ensayos tradicionales en animales (Cheng et al., 2012; Tice et al., 2013). Todo esto forma parte de un giro más grande hacia métodos modernos de evaluación toxicológica, como la estrategia Tox21, que promueve el uso de técnicas alternativas y más rápidas para clasificar los peligros químicos (Thomas et al., 2018; Tice et al., 2013).

En la universidad, clasificar bien las sustancias químicas es aún más importante, porque hay muchos compuestos distintos y los usuarios tienen niveles de experiencia muy diferentes. La exposición a compuestos químicos ocurre en muchos lugares de trabajo, pero los laboratorios de investigación y de salud son, curiosamente, de los menos estudiados. Y eso que ahí hay mucha variedad de compuestos y mucha rotación de investigadores (Papadopoli et al., 2020). Algo que llama la atención, los datos publicados sobre clasificación bajo la regulación REACH muestran que hay más sustancias con riesgo para la reproducción que sustancias cancerígenas o mutagénicas juntas (Karamertzanis et al., 2019).

Un sistema de clasificación que funcione bien en la universidad tiene que tomar en cuenta sus propias características, muchos proyectos de investigación duran poco tiempo, casi siempre se usan cantidades pequeñas de sustancias, y hay que mantener el equilibrio entre el objetivo de enseñar y la necesidad real de seguridad.

2.6.1 Peligros Físicos

¿ ¿Por qué una sustancia es peligrosa por sí sola, incluso antes de que alguien la use mal? Porque sus propias propiedades pueden causar daño a través de reacciones físicas o químicas, sobre todo si puede tener reacciones exotérmicas violentas con gases que se forman muy rápido. Las sustancias explosivas son de las que más preocupan en los entornos académicos, porque su potencial destructivo es grande y es difícil predecir qué condición exacta va a causar una explosión. Basta un roce, calor, un golpe u otra causa externa para que la sustancia se convierta en gas y libere calor, presión o radiación muy rápido (United Nations, 2017). El GHS tiene seis divisiones para los explosivos, desde el riesgo de explosión en masa hasta las sustancias muy poco sensibles (United Nations, 2017; van der Kolk, 2023). Esto no es tan raro como parece, ahí está la nitrocelulosa que se usa en análisis forense, los compuestos nitroaromáticos usados en síntesis orgánica, y los peróxidos que se cristalizan sin avisar después de estar mucho tiempo guardados en el estante.

Un gas inflamable es peligroso porque puede mezclarse con el aire y explotar, y esto pasa en un rango amplio de cantidades. Además, se riega muy rápido en espacios cerrados. La regla técnica dice que un gas se

clasifica como inflamable cuando puede encenderse en el aire a 20°C y presión normal, con solo un 13% de gas en el aire o menos, o cuando tiene un rango de inflamabilidad de por lo menos 12 puntos porcentuales, sin importar a qué temperatura empieza a arder.

Los líquidos inflamables son el riesgo físico más común en un laboratorio académico, desde los solventes más comunes hasta los reactivos más especializados. Se clasifican según su punto de inflamación, que es la temperatura mínima a la que un líquido libera suficiente vapor para formar una mezcla inflamable con el aire, y eso da distintas categorías según el rango de temperatura. A esto se suman otros factores importantes, la presión de vapor y qué tan volátil es, la densidad de los vapores, la temperatura de autoignición y los límites de explosividad. Ninguno de estos datos es un detalle menor a la hora de decidir en qué gabinete guardar cada frasco.

2.6.2 Peligros para la Salud

Dentro del GHS, los peligros para la salud humana son el grupo más complejo de manejar, porque reúne efectos que van desde un simple enrojecimiento de piel hasta la carcinogenicidad y la toxicidad más grave. Y no basta con saber de qué sustancia se trata, hay que evaluar con cuidado la vía de exposición, cuánto tiempo duró esa exposición, y si la persona expuesta pertenece a un grupo especialmente sensible.

La toxicidad aguda son los efectos dañinos que aparecen después de una exposición puntual, o de varias exposiciones seguidas en poco tiempo, casi siempre menos de 24 horas. Entender bien esto es clave para evaluar el peligro real si ocurre un accidente en el laboratorio. Para medirla, lo

más común es usar la Dosis Letal 50 (DL50) o la Concentración Letal 50 (CL50), que es la cantidad necesaria para que se muera la mitad de los animales de prueba. El GHS separa esto en tres formas de exposición, por la boca, por la piel y por respirar, y cada una tiene cinco categorías propias. Antes, estos datos venían casi siempre de estudios con animales de laboratorio, pero cada vez se usan más otros métodos, como modelos hechos en tubos de ensayo y programas de computadora que hacen cálculos parecidos. En los últimos años, incluso hay modelos de lenguaje que combinan varias tareas a la vez, y que junto con la importancia ecológica de las sustancias evaluadas, permiten predicciones más completas sobre la toxicidad de una sustancia para la salud humana (Tanaka et al., 2006).

¿Cómo distingo, en la práctica, la corrosión de la irritación cutánea? El efecto sobre la piel muestra si una sustancia causa daño irreversible (corrosión) o daño reversible (irritación) al contacto directo, y esa diferencia es clave para saber qué protección usar. La corrosión cutánea no perdona, causa una lesión irreversible en el tejido, con muerte celular que va desde la epidermis hasta la dermis, y no hay vuelta atrás. La irritación cutánea, en cambio, es un daño reversible, se ve como inflamación después del contacto y se resuelve con el tiempo. Los ojos son de los órganos más sensibles al daño químico, con riesgo real de lesiones que no se curan y que pueden causar pérdida de visión, algo muy importante en laboratorios donde se manejan vapores, aerosoles o polvos. Un daño ocular grave es una lesión de los tejidos sin posibilidad de recuperarse, mientras que la irritación ocular, aunque incómoda, causa cambios reversibles que se resuelven por completo.

La sensibilización química funciona por una respuesta del sistema inmune. El primer contacto cambia el sistema de defensa sin síntomas graves, pero causa reacciones alérgicas fuertes si vuelve a haber contacto, incluso con cantidades muy pequeñas del producto. Si entra por las vías respiratorias, causa problemas como asma ocupacional, rinitis crónica o alveolitis alérgica. Si entra por la piel, causa una dermatitis alérgica fuerte con erupciones y lesiones en la piel. Detectar estos agentes es técnicamente difícil, sobre todo en los pulmones, donde todavía hay pocas pruebas de laboratorio estandarizadas y validadas a nivel internacional.

Estudiar la mutagenicidad en células reproductivas es una de las prioridades más estrictas de la bioseguridad, por el riesgo de pasar alteraciones cromosómicas a las siguientes generaciones. Tanto los tumores como los cambios en el material genético vienen de procesos complejos dentro de las células. La mutagenicidad es la capacidad de un agente para causar mutaciones permanentes y hereditarias en el ADN. Para clasificar este riesgo, el GHS evalúa qué tan sólida es la evidencia disponible, desde observaciones en personas hasta ensayos controlados en animales de laboratorio.

Clasificar el potencial cancerígeno es uno de los temas más debatidos y exigentes de la normativa toxicológica internacional. Los retos principales incluyen definir bien el problema, identificar cómo actúa biológicamente el agente, modelar las curvas de dosis y respuesta, e incorporar métodos de prueba más modernos. El cáncer causado por químicos viene de varios factores y mecanismos celulares distintos, un tema bien estudiado en la literatura médica (Boobis, 2010; Boobis et al.,

2006, 2008; Cohen & Ellwein, 1991; Doe et al., 2019). Los criterios para fijar los límites máximos de exposición en el trabajo también han cambiado en los últimos años, incorporando varias variables de riesgo a la vez (Högberg & Järnberg, 2023).

2.6.3 Peligros Ambientales

La categoría de peligros ambientales del GHS evalúa el daño que puede causar la liberación de un producto sobre plantas, animales y microorganismos en el agua o en la tierra. Al principio no se aplicó de la misma forma en todos los países, ni fue siempre obligatoria. Pero con el tiempo se ha vuelto más importante, porque hay cada vez más evidencia de que la salud del ambiente afecta directamente la salud pública y el bienestar de las personas.

Evaluar la toxicidad en el agua es la parte mejor desarrollada de los peligros ambientales, porque ríos, lagos y océanos reciben al final muchos residuos industriales y académicos. Cuando hablamos de toxicidad acuática aguda, vemos qué pasa a corto plazo con los organismos que usamos como indicadores, básicamente si mueren o si su desarrollo se detiene después de una exposición breve. La toxicidad crónica es distinta, ahí miramos efectos a largo plazo y, algo más delicado, si el compuesto se va acumulando y pasando de un organismo a otro en la cadena alimenticia. Eso es lo que preocupa a cualquier ecotoxicólogo frente a sustancias que no se degradan fácil. El GHS también tiene una categoría que a veces se pasa por alto pero es clave, el riesgo para la capa de ozono. Ahí entran los halocarbonos y ciertos reactivos volátiles que, al liberarse, dañan el filtro que nos protege de la

radiación ultravioleta. Es un impacto de alcance mundial que no podemos ignorar al evaluar el peligro de una sustancia.

2.6.4 Consideraciones Especiales para Entornos Académicos

Uno de los problemas más comunes en los laboratorios universitarios es encontrarse con compuestos nuevos o moléculas sintéticas de las que casi no hay información toxicológica. Y sin datos, no se puede llenar una ficha de seguridad como corresponde. Entonces, ¿qué se hace? Se usa lo que se tiene, comparar con compuestos parecidos, usar modelos QSAR que relacionan la estructura química con su efecto, o clasificar con cuidado según los grupos que tenga la molécula. Al final, gana el principio de precaución, si no se sabe qué puede pasar, se asume lo peor y se actúa con cuidado. Esta idea dice que la falta de certeza científica no es razón para esperar antes de proteger a las personas de daños graves o que no se pueden revertir, siempre eligiendo la opción más segura (United Nations, 1992).

En la docencia y la investigación es común preparar mezclas complejas cuyos efectos no siempre son la simple suma de sus partes, así que hay que evaluar cómo interactúan entre sí. Para clasificar estas mezclas, se suelen combinar varios métodos, pruebas directas cuando se puede, principios de extrapolación (si un componente se comporta de cierta forma, la mezcla probablemente también), cálculos de suma de efectos, o mirar el porcentaje que aporta cada ingrediente. El problema es que en el laboratorio se trabaja con miligramos o fracciones de litro, y las normas están pensadas para la industria, con volúmenes mucho más grandes. Eso obliga a adaptar todo, evaluar los riesgos según la escala

real, priorizar las vías de exposición que sí importan en ese contexto, agrupar los reactivos por familias químicas para simplificar, y diseñar procedimientos prácticos que no bajen la protección del personal.

2.7 Implementación de Sistemas de Clasificación en Universidades Ecuatorianas

El GHS se está aplicando en Ecuador poco a poco, según las particularidades del país. Las universidades tienen que ajustar sus procedimientos para cumplir con lo que piden los organismos de control locales, pero sin dejar de lado las reglas internacionales que se necesitan al participar en proyectos con otras instituciones. A nivel nacional, la estrategia ha sido por partes, aplicándose con normas técnicas por sector, conectándose poco a poco con la plataforma estatal de control de sustancias, reconociendo las limitaciones de infraestructura que tenemos, y buscando acuerdos con otros países de la región.

Las universidades ecuatorianas enfrentan barreras complejas y necesitan estrategias propias para lograr un modelo de clasificación que funcione de verdad. En lo técnico hay varios problemas, acceder a bases de datos toxicológicas internacionales suele ser caro, las hojas de seguridad traducidas al español no siempre son confiables, hay pocos equipos para analizar reactivos localmente, y siempre hace falta capacitar al personal técnico. En lo administrativo tampoco es fácil, hay presupuestos limitados para modernizar laboratorios, poca comunicación entre facultades de la misma universidad, resistencia a sumar estos esquemas a los sistemas de gestión que ya existen, y el reto de que las normas encajen con el trabajo diario del laboratorio.

Para que estos esquemas de bioseguridad funcionen, lo más razonable es hacer un plan por fases. Se empieza priorizando los reactivos más usados y los más peligrosos. Una buena opción es lanzar proyectos piloto en las áreas de mayor riesgo, ver cómo funcionan, corregir lo que salga mal, y desde ahí extender el sistema al resto de la universidad de forma ordenada. Para esto ayuda mucho fortalecer la cooperación entre instituciones, ya sea con consorcios universitarios para compartir recursos y capacitación, alianzas con entidades del gobierno que regulan el tema, o acuerdos con empresas privadas para mantenerse actualizados.

2.8 Herramientas y Recursos para Clasificación

Hoy en día, para manejar un laboratorio hay programas de inventario químico que clasifican solos, programas que ayudan a evaluar riesgos, entornos virtuales para aprender, y aplicaciones en el celular para revisar fichas técnicas al instante. A nivel internacional, hay bases de datos muy usadas, como la de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA), la plataforma eChemPortal de la OCDE, y los registros del Programa Nacional de Toxicología del NIEHS. A nivel regional, a esto se suman sistemas propios de información toxicológica de la región, bases de datos de universidades latinoamericanas, y redes para compartir datos del Mercosur. En cuanto a programas, hay herramientas QSAR gratis muy útiles, como la Caja de Herramientas QSAR de la OCDE o el paquete EPI Suite de la EPA, además de plataformas de pago y opciones gratuitas de código abierto. Hay bastante para elegir, según lo que cada quien necesite y cuánto pueda gastar.

2.9 Tendencias Futuras en Clasificación de Sustancias

La caracterización de riesgos químicos experimenta una reestructuración profunda, motivada por los descubrimientos en toxicología de sistemas, el desarrollo de ensayos alternativos a la experimentación animal y una caracterización más precisa de las rutas de daño a nivel molecular. Entre los marcos metodológicos más consolidados de esta transición destacan las vías de resultado adverso (AOP), las estrategias integradas de ensayo y evaluación (IATA), las metodologías de nueva generación orientadas al análisis de riesgo (NGRA) y los modelos optimizados de lectura cruzada o *read-across*.

La inteligencia artificial y el aprendizaje profundo cambiaron mucho la forma de predecir riesgos en toxicología. Identificar de forma automática patrones que causan toxicidad, y predecir el potencial mutagénico con sistemas como PMCSFG, es un salto grande para detectar sustancias peligrosas a tiempo (Schietgat et al., 2023). Al mismo tiempo, las redes neuronales que usan notaciones SMILES muestran alta precisión para señalar alertas de mutagenicidad según la estructura molecular y cómo interactúa (Chen et al., 2024).

Las tecnologías ómicas, genómica, proteómica y metabolómica, están dando información nueva sobre cómo responden los organismos frente a sustancias tóxicas. Esto permite crear esquemas de clasificación con bases mucho más sólidas. Al mismo tiempo, la demanda por sostenibilidad y por los principios de la química verde está cambiando estos estándares, impulsando modelos que van más allá de la toxicidad

inmediata y que incluyen el impacto ambiental a largo plazo y la economía circular.

En definitiva, caracterizar bien los reactivos es la base para garantizar la seguridad y la salud en los laboratorios, tanto de enseñanza como de investigación. El GHS ofrece un estándar mundial muy riguroso para identificar y comunicar peligros, pero aplicarlo en las universidades ecuatorianas requiere ajustarlo con cuidado a la realidad de cada institución, porque el tipo y la cantidad de sustancias cambia mucho entre carreras (Tabla 1).

Los métodos de prueba siguen mejorando, sobre todo con herramientas de computadora y modelos que explican el mecanismo real de daño. Esto abre un panorama prometedor para clasificar sustancias químicas con más precisión y más rápido. Pero ese cambio hacia métodos más modernos hay que hacerlo con cuidado, para que las nuevas tecnologías no bajen el nivel de protección que ya existe.

Para la educación superior en Ecuador, tener un buen sistema de gestión química va a necesitar formación continua del personal, mejor infraestructura de laboratorio, y alianzas entre instituciones. Avanzar por fases, priorizando los compuestos más tóxicos y más usados, parece el camino más realista para subir los niveles de bioseguridad y construir una cultura de prevención sólida en la universidad.

Tabla 1. Clasificación de sustancias comúnmente utilizadas en entornos académicos y científicos en las ciencias ambientales

N°	Sustancia	Nivel de riesgo	Usos más frecuentes	Manejo adecuado en aula/laboratorio	Síntomas y efectos en salud	Ejemplos de estudios científicos aplicados	Disposición	GHS ONU (base internacional de categorías)
1	Agua destilada	Bajo (OMS, EPA)	Solvente, diluyente	Uso sin restricciones / Almacenar en envase limpio	No presenta efectos adversos conocidos sobre la salud en condiciones normales de uso	Purificación de agua en laboratorios	Sin requisitos especiales de disposición (residuo no peligroso o manejo estándar)	No clasificado como peligroso según GHS ONU (sin evidencia de riesgos físicos, tóxicos o ambientales)

2	Etanol	Medio (NFPA, OSHA)	Desinfectante, reactivo químico	Manejo con guantes / Ventilación adecuada	Irritación ocular, somnolencia o mareo por inhalación, efectos sobre el sistema nervioso central en altas concentraciones	Fermentación y producción de biocombustibles	Residuos inflamables; recolectar para reciclaje o incineración controlada	Líquido inflamable (Cat. 2), Irritación ocular (Cat. 2A)
3	Ácido clorhídrico	Alto (NFPA, OSHA, NIOSH)	Reactivo en química analítica	Uso bajo campana extractora / Almacenamiento en envase seguro	Irritación severa en piel y ojos, daño en mucosas	Reacciones ácido-base en química analítica	Neutralización controlada antes de eliminación	Corrosivo (Cat. 1A)
4	Hidróxido de sodio	Alto (NFPA, OSHA)	Neutralización de ácidos	Uso con guantes y gafas de seguridad / Almacenar en contenedor	Quemaduras en piel, daño ocular	Síntesis de compuestos químicos y control de pH	Neutralización con ácidos antes de eliminación	Corrosivo (Cat. 1A)

				hermético				
5	Amoniaco	Medio (NIOSH, UNECE)	Reactivo en síntesis química	Evitar inhalación / Usar en lugar ventilado	Irritación en vías respiratorias, náuseas	Uso en procesos industriales y estudios ambientales	Recolectar como residuo líquido peligroso; neutralizar las soluciones diluidas con ácido diluido bajo campana extractora y entregar a gestor autorizado.	Irritante/Tóxico (Cat. 2)
6	Nitrato de plata	Medio (NFPA, OSHA)	Tinción, reactivo en química analítica	Manejo con guantes y gafas de seguridad / Evitar contacto con piel	Irritación ocular y dérmica	Detección de haluros en química analítica	Disposición en contenedores especiales para residuos peligrosos	Tóxico (Cat. 2)

7	Cloroformo	Alto (OSHA, NIOSH)	Solvente, anestésico antiguo	Evitar inhalación / Almacenamiento en lugar oscuro y fresco	Peligro de depresión del sistema nervioso	Estudios de disolventes y anestesia en medicina	Precipitar como hidróxido/carbonato de cobre, filtrar y entregar el sólido a gestor autorizado de residuos peligrosos (metal pesado); verificar que el efluente cumpla los límites de vertido antes de descargarlo.	Toxicidad aguda oral (Cat. 4), Toxicidad aguda inhalación (Cat. 3), Irritación cutánea (Cat. 2), Irritación ocular (Cat. 2A), Cancerígeno (Cat. 2), STOT RE (Cat. 2)
8	Sulfato de cobre	Medio (NFPA, OSHA)	Reactivo en experiment	Usar guantes y gafas de seguridad /	Irritación dérmica y ocular	Estudios de efectos de metales	Diluir con exceso de agua antes de verter, válido solo para	Tóxico para organismos acuáticos

			os químicos	Evitar derrames		pesados en organismos	soluciones diluidas (≤10%). Las concentraciones mayores deben tratarse como oxidante peligroso y enviarse a gestor autorizado.	(Cat. 1)
9	Peróxido de hidrógeno	Alto (OSHA, NFPA)	Oxidante, desinfectante	Uso con guantes y ventilación / No mezclar con materiales inflamables	Quemaduras en piel y ojos	Cinética de descomposición de peróxidos	Dilución con agua controlada antes de eliminación	Oxidante (Cat. 1)
10	Fenol	Alto (NIOSH, OSHA)	Antiséptico, reactivo en bioquímica	Evitar contacto con piel / Uso con guantes y gafas	Neurotóxico, irritación severa	Propiedades antimicrobianas en microbiología	Disposición en incineradores especiales	Tóxico (Cat. 2)

11	Ácido sulfúrico	Alto (NFPA, OSHA)	Reactivo en síntesis química	Uso en campana extractora / Almacenar en lugar ventilado	Quemaduras graves en piel y ojos	Reacciones de sulfonación y síntesis química	Neutralización con base débil antes de eliminación	Corrosivo (Cat. 1A)
12	Bicarbonato de sodio	Bajo (EPA, FDA)	Neutralización de ácidos, horneado	Uso sin restricciones / Almacenamiento en lugar seco	No presenta riesgos importantes; irritación ocular o digestiva si se inhala o ingiere en exceso	Efecto del bicarbonato en regulación de pH	Sin requisitos especiales de disposición (residuo no peligroso o manejo estándar)	No clasificado como peligroso según GHS ONU (bajo riesgo demostrado, uso alimentario)

13	Acetona	Medio (NIOSH, OSHA)	Solvente, limpieza de vidrio	Usar en área ventilada / Evitar contacto prolongado con piel	Irritación ocular y dérmica	Extracción de compuestos orgánicos	Residuos peligrosos líquidos inflamables; gestión según normativas locales	Líquido inflamable (Cat. 2), Irritación ocular (Cat. 2A), STOT SE (Cat. 3)
14	Formaldehído	Alto (IARC, OSHA)	Fijador biológicoy conservante	Uso con guantes / Mascarilla. Evitar exposición prolongada	Cancerígeno e irritante ocular	Impacto ambiental de aldehídos en atmósfera	Residuos altamente peligrosos; requiere recolección por gestores autorizados. Nunca debe llegar a cuencas o plantas de	Líquido inflamable (Cat. 4), Tóxico agudo (Cat. 3), Corrosivo (Cat. 1), Cancerígeno (Cat. 1A), STOT (Cat. 1)

							tratamiento de aguas: el formaldehído es biocida.	
15	Cloruro de calcio	Bajo (EPA, FDA)	Desecante, reactivo químico	Almacenar en envase seco / Evitar contacto con agua	Irritación ocular y de piel, posible incomodidad gastrointestinal si se ingiere	Propiedades higroscópicas en procesos químicos	Sin requisitos especiales de disposición (residuo no peligroso o manejo estándar). Evitar vertidos grandes o repetidos a cuerpos de agua o suelo, ya que el aporte de cloruros afecta la calidad de	Irritación ocular (Cat. 2A), daño por exposición dérmica prolongada (según SDS)

							agua y ecosistemas acuáticos/suelos.	
16	Hidróxido de potasio	Alto (NIOSH, OSHA)	Neutralización de ácidos	Manipular con guantes / Uso en campana extractora	Irritación ocular y dérmica	Neutralización de ácidos en análisis químico	Neutralización con ácidos débiles antes de eliminación	Corrosivo (Cat. 1A)
17	Óxido de calcio	Medio (NFPA, OSHA)	Material de construcción, reactivo químico	Evitar contacto con agua / Uso con guantes	Irritación severa en piel y ojos	Reacciones exotérmicas con agua	Hidratar lentamente y en pequeñas cantidades con exceso de agua (reacción exotérmica) para convertir	Corrosivo para la piel (Cat. 1B), Irritación ocular grave (Cat. 1), STOT SE (Cat. 3)

							en Ca(OH)2, neutralizar el exceso de alcalinidad y disponer como residuo corrosivo; en cantidades mayores, entregar a gestor autorizado.	
18	Mercurio	Alto (OSHA, UNECE)	Instrumentos antiguos, reactivo en química	Uso bajo supervisión / Evitar exposición	Neurotóxico, daño renal	Toxicidad del mercurio en organismos vivos	Recogida en envases adecuados para gestión especializada. Nunca incinerarlo sin	Tóxico/Neurotóxico (Cat. 1A)

							captura de mercurio ni disponerlo en relleno sanitario común.	
19	Tolueno	Alto (NIOSH, OSHA)	Solvente en síntesis química	Evitar inhalación prolongada / Uso en campana extractora	Irritación respiratoria y dérmica	Disolventes en síntesis orgánica	Incineración en condiciones controladas con captación de emisiones.	Inflamable/Tóxico (Cat. 2)
20	Ácido nítrico	Alto (NFPA, OSHA)	Reactivo en química analítica, fabricación de fertilizantes	Manipular con guantes y gafas / Uso bajo supervisión	Quemaduras químicas en piel y ojos	Producción de fertilizantes y reacciones ácido-base	Diluir y neutralizar bajo supervisión, confirmando el pH final (6–9) antes de verter;	Corrosivo/Oxidante (Cat. 1A, 3)

							considerar además que el nitrato remanente está regulado por su potencial de eutrofización incluso tras la neutralización ácido-base.	
21	Metanol	Medio (OSHA, UNECE)	Solvente, reactivo en síntesis química	Ventilación adecuada / Uso de guantes	Ceguera en caso de ingestión, irritación ocular	Toxicidad del metanol en bioquímica	Residuos peligrosos; requiere tratamiento especializado y recolección segura	Líquido inflamable (Cat. 2), Tóxico agudo (Cat. 3), STOT RE (Cat. 1)

22	Cloruro de sodio	Bajo (EPA, FDA)	Sal común, conservación de alimentos	Uso sin restricciones / Almacenar en envase seco	Puede causar irritación ocular o gástrica si se ingiere o entra en contacto con ojos en altas concentraciones	Conductividad eléctrica de sales en agua	Disposición normal sin restricciones	No peligroso en condiciones normales
23	Azufre	Bajo (EPA, UNECE)	Material en experimentos químicos	Manejo seguro con guantes / Almacenamiento en lugar fresco	Irritación respiratoria por inhalación de polvo; contacto prolongado con la piel dermatitis	Comportamiento del azufre en combustión	Residuos sólidos inflamables; evitar derrames al agua	Sólido inflamable (Cat. 1), Irritación cutánea (Cat. 2)
24	Yodo	Medio (NIOSH	Antiséptico, reactivo en	Evitar contacto con piel / Almacenamient	Irritación dérmica y ocular	Síntesis y aplicaciones de compuestos de	Residuo tóxico: el yodo elemental es	Tóxico agudo (Cat. 3), Irritación cutánea (Cat. 2),

		, NFPA)	química	o en lugar seco		yodo	sólido (si se usa en solución, tratar como líquido). Recolectar en envase para residuos peligrosos y contactar a gestor autorizado.	Irritación ocular (Cat. 2A), Peligroso para el medio acuático (Cat. 1)	
25	Carbonato de sodio	Bajo (EPA, FDA)	Regulador de pH, reactivo en química	Manejo con guantes / Almacenar en envase hermético	Irritación ocular y de piel; inhalación del polvo irritación en vías respiratorias	Efecto del carbonato en dureza del agua	Residuos no peligrosos; vertido permitido localmente. Verificar que el vertido no	Irritación ocular (Cat. 2A)	

							cambie el pH del cuerpo receptor fuera de los rangos permitidos.	
26	Fosfato de sodio	Bajo (EPA, UNECE)	Fertilizantes, reactivo químico	Uso sin restricciones / Almacenamiento en lugar seco	Irritación ocular, cutánea y respiratoria; molestias gastrointestinales si se ingiere	Reacciones de fosfatos en suelos agrícolas	Residuo de bajo riesgo, evitar el vertido directo a cuerpos de agua por riesgo de eutrofización, verificar los límites locales de fósforo antes de verter.	Irritación cutánea (Cat. 2), Irritación ocular (Cat. 2A), STOT-SE (Cat. 3)
27	Nitrógeno	Alto	Criogenia,	Manipular con	Asfixia por	Propiedades	Descarga en	Gas a presión: gas

	líquido	(OSHA, NFPA)	conservación biológica	guantes / Uso bajo supervisión	desplazamiento de oxígeno	criogénicas y almacenamiento de células	lugar ventilado; residuo gas inofensivo	refrigerado (GHS04, H281)
28	Sulfato de amonio	Bajo (EPA, FDA)	Fertilizante, reactivo en química	Uso sin restricciones / Evitar exposición prolongada	Irritación dérmica y ocular	Estudios sobre el uso del amonio en fertilizantes	Residuos no peligrosos; suelo o planta autorizada	No clasificado como peligroso según GHS ONU (sin criterios de riesgo)
29	Bromuro de potasio	Medio (NIOSH, NFPA)	Reactivo en síntesis química	Usar guantes y gafas / Almacenamiento en lugar seco	Irritación dérmica	Uso de bromuros en química analítica	Residuos no peligrosos; reciclable o dominio local	No clasificado como peligroso según GHS ONU (sin estudios que sugieran riesgo comprobado)

30	Óxido de zinc	Bajo (EPA, FDA)	Pigmento, reactivo químico	Almacenar en envase hermético / Uso con guantes	Posible irritación ocular	Efectos del óxido de zinc en cosmética y salud	Residuos no peligrosos. Es tóxico para organismos acuáticos incluso en bajas concentraciones y está regulado en muchos límites de descarga; no verter en “agua tratada” sin confirmar que cumple esos límites, preferir la recolección por gestores	No clasificado como peligroso según GHS ONU (no identificado como irritante, tóxico o inflamable)

							autorizados.	
31	Ácido acético	Medio (NIOSH, UNECE)	Conservante, reactivo en síntesis química	Uso con ventilación / Evitar contacto prolongado	Irritación dérmica y ocular	Efecto del ácido acético en fermentación	Dilución y neutralización en soluciones reguladas	Irritante (Cat. 2)
32	Sodio metálico	Alto (OSHA, NFPA)	Reacción química controlada	Manejo con pinzas / Uso con gafas y guantes	Reacciones violentas con agua, quemaduras	Reactividad del sodio con agua	Nunca disponer en contacto con agua. Inactivar los remanentes pequeños con un alcohol anhidro (p. ej. isopropanol)	Reacciona violentamente con agua (Cat. 1), Corrosivo (Cat. 1B)

							bajo atmósfera controlada y entregar a gestor autorizado de residuos peligrosos reactivos.	
33	Ácido bórico	Bajo (EPA, FDA)	Antiséptico, insecticida	Uso sin restricciones / Almacenamiento en envase seco	Irritación dérmica y ocular	Propiedades del ácido bórico en pesticidas	Residuos peligrosos por toxicidad reproductiva; contactar a gestor autorizado	Toxicidad reproductiva (Cat. 2), Irritación ocular (Cat. 2A)
34	Hexano	Medio (NIOSH	Solvente en química	Usar en campana	Mareo, efectos narcóticos	Extracción de compuestos	Recolectar como residuo	Inflamable (Cat. 2)

		, NFPA)	orgánica	extractora / Evitar contacto con piel		apolares	líquido inflamable en envase cerrado y entregar a gestor autorizado para reciclaje o incineración controlada. No se recomienda la evaporación deliberada.		
35	Acetato de etilo	Medio (NIOSH, OSHA)	Solvente, extracción química	Manipular con guantes y gafas / Almacenamiento en lugar ventilado	Irritación dérmica	Estudios de solventes en procesos industriales	Residuos inflamables; reciclaje o incineración controlada	Líquido inflamable (Cat. 2), Irritación ocular (Cat. 2A), STOT SE (Cat. 3)	

36	Glucosa	Bajo (EPA, FDA)	Reactivo en bioquímica	Uso sin restricciones / Evitar exposición prolongada	No presenta efectos adversos conocidos; sustancia alimentaria generalmente reconocida como segura (gras)	Metabolismo de carbohidratos en biología	Residuos no peligrosos; uso agrícola o local. Evitar la descarga de grandes volúmenes a cuerpos de agua.	No clasificado como peligroso según GHS ONU (sustancia alimentaria común)
37	Ácido cítrico	Bajo (EPA, FDA)	Regulador de acidez en alimentos	Manipular con guantes / Uso en campana extractora	Irritación ocular y dérmica	Efecto del ácido cítrico en alimentos	Residuos no peligrosos; vertido permitido	No clasificado como peligroso según GHS ONU (uso alimentario, sin riesgo)
38	Ácido oxálico	Medio (NFPA,	Reactivo en síntesis	Uso bajo supervisión /	Irritación	Uso del ácido oxálico en	Residuos peligrosos;	Tóxico agudo (Cat. 4), Corrosivo (Cat.

		OSHA)	química	Evitar contacto prolongado	dérmica y ocular	limpieza de metales	contactar a gestor autorizado	1)
39	Cloruro férrico	Medio (NFPA, OSHA)	Reactivo en química analítica	Uso con ventilación / Uso de guantes y gafas	Irritación severa en piel y ojos	Reacciones de cloruros metálicos en química analítica	Residuos peligrosos; contactar a gestor autorizado	Tóxico agudo (Cat. 4), Corrosivo (Cat. 1)
40	Sulfuro de hidrógeno	Alto (OSHA, UNECE)	Gas tóxico en experimentos químicos	Manipular con guantes y mascarilla / Evitar inhalación	Neurotóxico, peligroso por inhalación	Propiedades tóxicas del sulfuro de hidrógeno	No ventear directamente al ambiente. Capturar y neutralizar en una trampa o depurador (scrubber)	Gas inflamable (Cat. 2), Tóxico agudo por inhalación (Cat. 2)

			alcalino (p. ej. NaOH) antes de cualquier liberación, y contactar a gestor autorizado.

Fuente: Elaboración propia

2.9.1 Agencias de categorización:

La Organización Mundial de la Salud (OMS) es una agencia especial de las Naciones Unidas. Se encarga de crear reglas para todo el mundo sobre estar expuesto a sustancias químicas y sobre la salud pública internacional. La EPA (Agencia de Protección Ambiental) es una agencia del gobierno de Estados Unidos. Su trabajo es cuidar la salud de las personas y el medio ambiente, poniendo reglas sobre pesticidas, sustancias tóxicas y residuos peligrosos. NFPA (Asociación Nacional de Protección contra Incendios), organización sin fines de lucro que desarrolla códigos y estándares de seguridad contra incendios, incluyendo el reconocido sistema de identificación de riesgos químicos conocido como "Diamante de Seguridad NFPA 704". OSHA (Administración de Seguridad y Salud Ocupacional), dependencia del Departamento de Trabajo de Estados Unidos que establece y hace cumplir estándares de seguridad en lugares de trabajo. NIOSH (Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional), instituto de investigación perteneciente a los Centros para el Control y Prevención de Enfermedades que realiza estudios científicos y emite recomendaciones para prevenir lesiones y enfermedades laborales. UNECE (Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa), organismo responsable del desarrollo y mantenimiento del Sistema Globalmente Armonizado (GHS) para la clasificación y etiquetado de productos químicos a nivel internacional.

Abreviaturas: Cat (Categoría de cada tipo de exposición). GSH ONU (Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de

Productos Químicos de las Naciones Unidas - Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals - United Nations).

Fuente: OMS, EPA, NFPA, UNECE, OSHA, GHS

CAPÍTULO III

3 ALMACENAMIENTO, MANIPULACIÓN SEGURA Y BUENAS PRÁCTICAS EN LABORATORIOS

3.1 Fundamentos del Almacenamiento Seguro

Guardar reactivos de forma segura no es solo poner cada frasco en un estante y ya. Detrás de un buen almacenamiento hay una lógica técnica para reducir riesgos al mínimo, evitar que un compuesto se descomponga, que dos sustancias incompatibles se toquen por accidente, o que un derrame se convierta en un problema grande. Para hacerlo bien hay que conocer las propiedades físicas y químicas de cada material, saber usar las tablas de incompatibilidad, saber qué no puede estar cerca de qué, y sobre todo entender cómo se degradan con el tiempo, porque a veces lo que se forma después es más tóxico que el compuesto original. Las auditorías de riesgo hechas en universidades muestran que las amenazas a la salud laboral clasificadas como de muy alto riesgo son más frecuentes que los problemas de seguridad física o de impacto ecológico, con un 13,6% de riesgo químico en salud, 12,4% en seguridad y 18,5% en el componente ambiental (Lestari et al., 2016).

La base de un buen almacenamiento químico es separar físicamente las sustancias según si son compatibles entre sí. Este orden evita que una fuga, un envase roto o un fallo de ventilación termine en una reacción descontrolada. Para que funcione, hay familias de sustancias que deben mantenerse siempre separadas. Los solventes y líquidos inflamables van en armarios certificados, lejos de oxidantes y de cualquier fuente de calor. Los comburentes, que alimentan el fuego, deben estar lejos de

reductores y de materiales combustibles. Los ácidos, ya sean orgánicos o inorgánicos, tienen que estar lejos de las bases. Las bases, a su vez, lejos de ácidos y de metales que reaccionen con ellas. Los reactivos pirofóricos o sensibles a la humedad necesitan ambientes secos y protegidos. Y los tóxicos necesitan medidas de seguridad física y acceso restringido.

Para saber qué reactivos son incompatibles entre sí, hay que revisar con cuidado las Fichas de Datos de Seguridad (FDS) y usar matrices de reactividad ya validadas. Como muchas sustancias tienen varias clasificaciones de peligro a la vez, hay que analizar caso por caso y priorizar la amenaza más grande, por ejemplo, si algo es pirofórico eso manda sobre una inflamabilidad normal a la hora de decidir cómo guardarlo (Abbas et al., 2016). Hay mezclas que son como una bomba de tiempo. El ácido nítrico concentrado, por ejemplo, puede prender fuego solo con tocar algo orgánico, sin necesitar ni una chispa. Los peróxidos, si tocan restos de metales, pueden formar sales que explotan con mucha facilidad. Si se neutralizan bases fuertes con ácidos concentrados sin cuidado, se libera calor de golpe y de forma violenta. Y hay compuestos que, solo con la humedad del aire, ya empiezan a soltarvapores tóxicos o inflamables.

Por esta razón, normas internacionales como la NFPA 45 y la OSHA insisten en que en las áreas de trabajo solo debe haber la cantidad justa de reactivos para lo que se está haciendo en ese momento. El stock del día a día debe ser mínimo, los envases grandes, de más de un galón, se guardan en bodegas o depósitos externos especiales. Como referencia técnica, los líquidos inflamables en el área de trabajo no deberían pasar

de 20 galones por cada 100 pies cuadrados. Los corrosivos siempre van en recipientes con una segunda capa de contención. Los compuestos muy tóxicos necesitan un análisis de riesgo antes de siquiera entrar al laboratorio. Y los que pueden formar peróxidos inestables deben tener inventarios mínimos y una fecha de vencimiento bien marcada. Estos datos vienen de los estándares usados en centros de investigación internacionales (University of Nottingham, 2012).

3.2 Infraestructura de Almacenamiento

Varias universidades exigen que los armarios para líquidos inflamables cumplan reglas estrictas de construcción y ventilación, para resistir el calor, no dejar salir derrames y controlar los gases que se puedan formar. Las reglas de construcción son bastante específicas, chapa de acero calibre 18 con aislamiento térmico, cierres automáticos de tres puntos, bandejas inferiores que puedan contener al menos 2 pulgadas de líquido, salidas de ventilación que se puedan regular, y un rótulo que diga claramente INFLAMABLE, MANTENER FUEGO ALEJADO. Para los gabinetes de corrosivos la regla es un poco más flexible, pero igual deben aguantar el ataque químico. Los de polietileno macizo son los que mejor resisten, mientras que los metálicos necesitan un recubrimiento especial para no dañarse con el tiempo. Entre sus partes importantes están el recubrimiento que resiste la corrosión, ductos de ventilación para vapores fuertes, bandejas de contención adicionales, y divisiones internas para separar familias de corrosivos que no son compatibles entre sí.

El almacenamiento de reactivos debe ajustarse estrictamente a las especificaciones de humedad y temperatura provistas por el fabricante, manteniendo los productos alejados de radiadores, conductos térmicos, estufas de secado y de la radiación solar directa (Indiana University, 2024; University of Wisconsin, 2024). Hay varios factores ambientales que no se pueden descuidar: mantener la temperatura dentro de los rangos que marca el fabricante, proteger los reactivos sensibles a la humedad de ambientes húmedos, resguardar los fotosensibles de la luz ultravioleta y asegurar una buena renovación del aire para que no se acumulen vapores. Y un punto que siempre hay que remarcar: los solventes inflamables nunca, bajo ninguna circunstancia, van en refrigeradores domésticos. En los laboratorios académicos solo se usan equipos con certificación anti-explosión o diseñados específicamente para almacenar inflamables. Además, los envases tienen que estar bien sellados para evitar que los vapores saturen el interior del equipo y terminen generando olores o, peor aún, condiciones de riesgo.

Todos los frascos y recipientes del laboratorio deben tener su etiqueta, con el nombre químico exacto y los peligros que tiene. Las inspecciones periódicas son necesarias para cambiar de inmediato cualquier etiqueta que esté gastada, decolorada o despegándose (Cornell University, 2024). Una etiqueta completa debe tener el nombre del producto, los pictogramas del GHS, la palabra de advertencia, las frases de peligro (frases H), los consejos de seguridad (frases P), y las fechas de recepción, apertura y vencimiento según la sustancia. Al final, la seguridad en el almacenamiento empieza con un inventario permanente y actualizado,

cada sustancia debe tener un lugar fijo y claro, al que debe volver siempre después de usarla (University of Wisconsin, 2024).

3.3 Manipulación Segura de Sustancias

Elegir bien el Equipo de Protección Personal (EPP) es una de las principales barreras contra la exposición a productos químicos peligrosos. Para elegir el equipo correcto para cada tarea hay que mirar varias cosas juntas, qué tipo de reactivo es, su concentración y el volumen que se va a usar, sus peligros propios, cómo podría entrar al cuerpo, de qué está hecho el equipo de protección, y qué tan rápido se degrada o deja pasar el químico con el tiempo (Cornell University, 2024).

Las campanas de extracción y los sistemas de ventilación son la principal protección contra contaminantes en el aire, por eso usar respiradores individuales solo es para personal que esté en un programa institucional de protección respiratoria, con revisión médica, pruebas de ajuste y capacitación previa. En cualquier laboratorio académico o de investigación, las gafas de seguridad son obligatorias y deben cumplir la norma ANSI Z87.1-2020. Cuando se trabaja con líquidos reactivos o corrosivos, hacen falta gafas panorámicas que sellen bien contra salpicaduras, y si el volumen pasa de un litro, esto ya no es opcional (Dartmouth College, 2024). El tipo de protección visual depende de la situación, para partículas que salen disparadas, unas gafas de impacto normales bastan, para agentes químicos hace falta un modelo envolvente, en tareas de alto riesgo se usa una pantalla facial completa, y para trabajos con láser o radiación ultravioleta se usan visores con filtro especial.

Elegir el guante correcto no es tan simple como tomar el primero que se ve. Hay que evaluar tres formas en que puede fallar, la degradación, cuando el reactivo empieza a dañar el material del guante, la permeación, cuando la sustancia atraviesa el material a nivel molecular, y la penetración, cuando el líquido pasa por microporos o defectos del guante (Princeton University, 2024). Hay mucho para elegir y cada tipo sirve para algo distinto, los de nitrilo delgado sirven para salpicaduras ocasionales, las barreras tipo Silver Shield se usan con compuestos muy tóxicos o de los que no se sabe mucho, los guantes aislantes térmicos son para trabajar con frío extremo o calor alto, y en tareas de alto riesgo se usa doble guante como protección extra.

Usar bata con tratamiento contra el fuego es obligatorio siempre en los laboratorios de investigación. Está totalmente prohibido entrar con calzado abierto, sandalias o zapatos de tela delgada. No se recomienda usar pantalones cortos, faldas o vestidos, pero se puede tolerar si la persona lleva la bata abotonada y la prenda le llega más abajo de la rodilla (Dartmouth College, 2024).

Trasvasar líquidos necesita protocolos estrictos para evitar vapores, salpicaduras y derrames. Sacar líquidos inflamables de tambores o recipientes metálicos de cinco galones o más debe hacerse fuera del laboratorio (Indiana University, 2024). Las reglas de seguridad piden usar embudos que sirvan según qué tan espeso es el líquido, pasar los líquidos dentro de campanas de extracción, tener siempre listas bandejas para contener derrames, nunca pipetear con la boca, y usar bombas automáticas cuando se manejan cantidades grandes.

Los sólidos tienen sus propios riesgos, como soltar polvo fino, acumular electricidad estática, y contaminar otras sustancias con solo tocarlas. Por eso hay que trabajar con ellos en zonas donde el aire circule bien, para que el polvo no se riegue por todos lados. Con los gases comprimidos hace falta un control estricto, porque son peligrosos por su alta presión, su toxicidad y sus propiedades reactivas. Las instalaciones deben tener espacios especiales para guardar los cilindros, con cadenas o abrazaderas que los sujeten firme (Princeton University, 2024).

Cada área de trabajo experimental necesita sus propios Procedimientos Operativos Estándar, hechos a la medida de lo que se hace ahí. Estos documentos deben tener evaluaciones de riesgo actualizadas, los controles de ingeniería que se van a usar, y planes para cuando algo salga mal. Con más detalle, deben decir cuál es el peligro de cada sustancia, qué equipo de protección personal hace falta, los pasos exactos de cómo manipularla, qué hacer si hay un derrame, y cómo limpiar las superficies al terminar el día. Y antes de empezar cualquier ensayo, hay que hacer un análisis previo que compare las propiedades de los reactivos, los volúmenes que se van a usar, los pasos del método y si de verdad hay las barreras de contención necesarias en ese momento.

3.4 Sistemas de Ventilación y Campanas Extractoras

Las campanas de extracción son el recurso principal para proteger al personal de vapores tóxicos o inflamables, y OSHA exige que estén siempre en buenas condiciones (Kansas State University, 2024). En los laboratorios se usan sobre todo tres tipos de campanas. Los sistemas de volumen constante, conocidos como Bypass, mantienen el mismo flujo

de extracción todo el tiempo, sin importar qué tan abierta esté la ventana de enfrente. Los sistemas de volumen variable, o VAV, ajustan la extracción para que la velocidad en la mesa de trabajo se mantenga siempre igual. Y están los modelos de alto rendimiento energético, hechos para gastar menos electricidad sin dejar de capturar bien los vapores.

Las campanas usadas para digestión con ácido perclórico necesitan ductos propios y un sistema de lavado interno (washdown) para que no se acumulen sales percloradas que pueden explotar. Por otro lado, las vitrinas de recirculación sin ductos pasan el aire por filtros de carbón activado o filtros HEPA antes de devolverlo al ambiente, así que solo sirven para trabajos de baja toxicidad. Estos equipos deben tener una velocidad de 80 a 120 pies por minuto con la guillotina a 18 pulgadas, y el flujo no debe variar más de 20%, según la norma ANSI/AIHA-Z9.5 (University of Pennsylvania, 2024). Los departamentos de bioseguridad deben revisar cada año, con un anemómetro y pruebas de humo, que estos equipos sigan captando bien el aire, y pegar una etiqueta con la fecha de esa revisión junto al marco de enfrente (Kansas State University, 2024).

Para que la campana de extracción proteja de verdad, se recomienda marcar con cinta una línea a 6 pulgadas del borde de enfrente, y mientras se trabaja, mantener los instrumentos y reactivos siempre detrás de esa línea. Esto evita que los vapores se escapen cuando algo afuera, como una persona caminando cerca de la campana, altera el flujo de aire que debería proteger a quien trabaja ahí (Princeton University, 2024). Hay reglas que sí o sí hay que cumplir para que la campana funcione bien,

trabajar siempre a un mínimo de 6 pulgadas del fondo de la cabina, mantener puertas y ventanas del laboratorio cerradas para que no haya corrientes de aire cruzadas, levantar los equipos entre 2 y 3 pulgadas con soportes para no tapar las ranuras de extracción de abajo, y algo que se ve mucho pero está mal, no usar la campana como si fuera un armario para guardar reactivos todo el tiempo.

3.5 Buenas Prácticas de Laboratorio

Las buenas prácticas de trabajo son la base de un trabajo científico riguroso, preventivo y sostenible en las universidades y centros de investigación. No son consejos sueltos, son un conjunto de principios técnicos, con base en evidencia, que se conectan con las normas de protección laboral, con cuidar el ambiente y con usar bien los recursos que hay. Todo esto forma un marco que busca una gestión excelente de los reactivos químicos y de los insumos peligrosos, para que cada paso en el laboratorio tenga sentido y se pueda repetir de la misma forma.

Consolidar bien estas prácticas no es solo cumplir el reglamento por cumplir. Hay que ir más allá y crear un ambiente donde cuidar la integridad física y el ambiente sea una meta prioritaria de la investigación (National Research Council, 2011). La evidencia muestra que manejar sustancias químicas de forma segura no depende de una sola cosa, sino de la mezcla de conductas responsables, buenas habilidades prácticas y respeto estricto por los protocolos del laboratorio (Karapantsios et al., 2008).

Estas reglas de prevención parten de algo claro, saber sobre el riesgo no viene de serie en el personal, hace falta enseñarlo de forma continua y a propósito (National Research Council, 2011). Los ejes de la bioseguridad incluyen identificar peligros, analizar vulnerabilidades, tener protocolos para emergencias, gestionar residuos, y reportar e investigar incidentes. Todo esto debe estar metido en el currículo académico para reducir los accidentes. Hacer los procedimientos con cuidado exige buen criterio para sopesar los riesgos y elegir las técnicas que protejan mejor, cuidando así a la comunidad universitaria, a la población y al ambiente.

3.6 Organización y Gestión del Espacio de Trabajo

Ordenar bien el espacio físico es clave para mejorar la seguridad y el rendimiento en las unidades de docencia e investigación. Usar métodos ordenados como la metodología de las 5S (clasificación, orden, limpieza, estandarización y autodisciplina) ha demostrado que funciona muy bien para reducir condiciones inseguras y mejorar la productividad en los espacios académicos (Gutierrez et al., 2020).

Aplicar el modelo 5S reduce los accidentes, además de ahorrar tiempo, bajar costos y mejorar cómo se usa el espacio disponible para reactivos e instrumentos. Pero para que el sistema funcione a largo plazo, la comunidad del laboratorio tiene que verlo no como un ordenamiento que se hace una sola vez, sino como una forma de trabajar todos los días, que necesita compromiso constante de la institución (Gutierrez et al., 2020).

La clasificación, separa lo que sirve de lo que no sirve, sacando los reactivos vencidos o los equipos que ya nadie usa. El orden, le da a cada material un lugar fijo y bien marcado. La limpieza, mantiene el área en buen estado, para darse cuenta a tiempo si hay una fuga, un derrame o algo que está fallando. La estandarización, deja escritos los pasos a seguir, para que todo lo anterior se mantenga con el tiempo. Y la disciplina, busca que estos hábitos de trabajo duren para siempre.

3.7 Química Verde y Prácticas Sostenibles

Meter los principios de la química verde en los métodos de trabajo y en la cultura de la institución mejora mucho la bioseguridad de los laboratorios. Para lograrlo hace falta trabajo en equipo entre investigadores, docentes, especialistas en Seguridad, Salud Ocupacional y Medio Ambiente (EHS) y quienes manejan la sostenibilidad, todos con el mismo objetivo, proteger a estudiantes, académicos y personal de apoyo (Gutierrez et al., 2020).

Lo que hace falta es un enfoque que conecte la sostenibilidad ambiental con la seguridad del día a día en el laboratorio, reconociendo que la química juega un papel clave para resolver problemas globales a nivel molecular. Pasar a modelos más sostenibles requiere formar a los nuevos profesionales en habilidades técnicas y de investigación que garanticen un trabajo seguro, tanto en la industria como en la academia, con efecto directo en la sociedad. Los principios de Anastas y Warner (1998) son una buena base para diseñar procesos que usen o generen la menor cantidad posible de sustancias dañinas, y aplican muy bien en laboratorios universitarios, prevenir residuos usando rutas que eviten

generarlos desde el inicio, hacer síntesis de baja peligrosidad usando y obteniendo compuestos con poca o ninguna toxicidad, usar solventes y auxiliares seguros en menor cantidad y de tipos inofensivos, buscar eficiencia energética con reacciones a temperatura y presión ambiente, y monitorear en tiempo real con sensores que permitan controlar los procesos de forma continua (Anastas & Warner, 1998).

Las iniciativas de Laboratorios Verdes han funcionado muy bien para unir el manejo de riesgos con el cuidado del ambiente en los centros de investigación. Buscan bajar el impacto ambiental de las instalaciones, ahorrando agua y electricidad, y generando menos residuos desde el principio. Entre los beneficios que se han visto están facturas más bajas de agua y luz, menos residuos sólidos y peligrosos, más conciencia ambiental en el personal, formas de trabajar más seguras, y menos gastos para la institución.

Las unidades experimentales que implementan esta visión registran caídas sustanciales en la demanda de insumos básicos y en las tasas de generación de subproductos peligrosos. Aunque estas estrategias suelen originarse con el propósito de mitigar la huella ecológica, en la práctica presentan una sinergia directa con la prevención de riesgos laborales. La administración sustentable en el ámbito universitario demanda restringir las cantidades circulantes de materia prima, recircular materiales cuando la compatibilidad técnica lo autorice y maximizar el rendimiento sintético. Un referente en esta área es la guía redactada por el Equipo de Laboratorios Verdes de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Groningen, la cual compila intervenciones de fácil adopción orientadas a la contención del gasto financiero, la reducción

de desechos y la disminución de emisiones de CO_2 equivalente (O'Neil et al., 2021).

Las estrategias de sostenibilidad incluyen unificar las compras para no acumular insumos de más, crear depósitos comunes con inventario compartido para los reactivos que más se usan, juntar los pedidos para gastar menos en empaques y envíos, y crear redes entre departamentos para redistribuir materiales sobrantes. En lo administrativo, las universidades usan papel con certificación de manejo forestal sostenible, y compensan la huella de carbono del transporte financiando proyectos ambientales certificados (Stahl & König, 2024).

3.8 Capacitación y Desarrollo del Personal

La inducción inicial es la base sobre la que se construye la prevención de riesgos en la comunidad universitaria. Suele organizarse con módulos institucionales que aplican el Plan de Higiene Química o el Manual de Bioseguridad de la institución (Bruch et al., 2021). Los contenidos principales incluyen revisar los reglamentos internos, identificar los peligros de cada puesto de trabajo, aprender a elegir y mantener el equipo de protección personal, conocer las estaciones de emergencia, y saber cómo disponer correctamente de los residuos tóxicos. Se exige aprobar el curso de Fundamentos de Seguridad en Laboratorio antes de manejar reactivos, y los Investigadores Principales deben tomar la Orientación Institucional de Seguridad Ocupacional al entrar a la institución (UCLA, 2024).

El aprendizaje continuo en bioseguridad no debería ser solo firmar un papel una vez al año, tiene que formar parte natural de las actividades

académicas normales. Las facultades pueden dar un minuto de seguridad al inicio de los seminarios o reuniones de departamento, para que siempre haya un espacio de reflexión sobre prevención (Bruch et al., 2021). Entre las estrategias que más funcionan están analizar la causa raíz de accidentes ya documentados, hacer simulaciones prácticas, dar talleres interactivos de prevención, y revisar con ojo crítico los procedimientos de trabajo. Estas actividades cortas funcionan mejor cuando usan métodos participativos que generan debate entre colegas, permitiendo aprender juntos como equipo científico (Bruch et al., 2021).

Formar Equipos de Seguridad en Laboratorios (LST, por sus siglas en inglés) es una buena forma de fortalecer la cultura de prevención en la universidad a través del liderazgo de los estudiantes. Estos grupos, manejados por ellos mismos, ayudan a coordinar la comunicación entre investigadores de distintos niveles, impulsan el crecimiento profesional de estudiantes de pregrado y posgrado, ayudan a cumplir las normas de la institución, dan un espacio para hablar de fallas operativas, y forman habilidades de gestión en bioseguridad. Esta forma de organizarse demuestra el potencial de mejorar la comunicación entre científicos de todo nivel, enriquecer la formación del personal en formación, y consolidar los estándares de seguridad en la educación superior.

Un plan de capacitación funciona bien cuando se evalúa todo el tiempo y se actualiza según los accidentes registrados y lo que opinan los usuarios. Diseñar estos programas no se puede hacer desde un escritorio sin preguntar a quienes trabajan de verdad en el laboratorio. Hay que incluir a directores de departamento, oficiales de bioseguridad, encargados de higiene química, investigadores principales y técnicos de

laboratorio, para que la capacitación responda a lo que realmente se hace en cada área, y no a un temario genérico que quizá no aplique ahí (National Research Council, 2011). Para medir si el programa funciona se usan varios indicadores, comparar lo que sabía el personal antes y después de la capacitación, inspeccionar el puesto de trabajo para ver si se aplica lo aprendido, analizar los casi-accidentes para encontrar fallas, encuestar a los participantes sobre los módulos, y actualizar los temas cada vez que cambie una norma o se agregue un nuevo reactivo.

3.9 Documentación y Mantenimiento de Registros

Mantener bien organizados los documentos no es un simple trámite, es algo necesario para manejar la seguridad en las universidades. Los archivos de la institución deben estar completos, fáciles de consultar, y actualizados siempre que haya un cambio, se compre un equipo nuevo o cambie una norma. Los documentos que no pueden faltar son, el Plan de Higiene Química, exigido por OSHA para proteger a los trabajadores de los riesgos de manejar sustancias peligrosas en un lugar determinado (National Research Council, 2011, 2014), los Procedimientos Operativos Estándar (POE) con instrucciones paso a paso, las Matrices de Riesgo documentadas, los Certificados de Capacitación guardados, y los Informes de Incidentes, donde se anotan las causas y las medidas que se tomaron después de un accidente o casi-accidente.

Todo el personal docente, técnico e investigador debe conocer bien el Plan de Higiene Química (PHQ) de la institución y poder consultarlo cuando lo necesite. En muchas unidades, el PHQ ya incluye los procedimientos para manejar familias químicas críticas, y es el

documento técnico principal para evaluar riesgos y planear los protocolos de los experimentos (National Research Council, 2014).

Las Fichas de Datos de Seguridad son una fuente importante de consulta, pero tienen límites cuando se usan en un laboratorio universitario. Se diseñaron pensando en emergencias médicas, en personal de rescate y en quienes manejan la salud ocupacional. Por eso están escritas para el manejo industrial de grandes cantidades, no para las cantidades pequeñas que se usan en un laboratorio universitario. Además usan un lenguaje muy técnico, y dan indicaciones de primeros auxilios que no siempre encajan con el tipo de exposición que pasa en investigación. Para llenar ese vacío, comités especializados crearon los Resúmenes de Seguridad Química en Laboratorios (LCSS), unos documentos cortos hechos para personal técnico capacitado, que resumen los peligros de cada reactivo, sin querer reemplazar toda la información técnica que ya existe sobre el tema (National Research Council, 2014).

Llevar un registro y análisis de los accidentes es clave para mejorar el sistema de gestión de riesgos todo el tiempo. De hecho, cuando se investigan a fondo los accidentes graves en la ciencia, casi siempre aparecen fallas que venían de antes, exceso de confianza acumulado, y una supervisión que no funcionaba bien. Un buen protocolo para reportar accidentes debe tener formularios estándar, formas de investigar la causa raíz, revisiones que permitan corregir fallas estructurales, canales para compartir lo aprendido entre departamentos, y control estricto de las medidas correctivas que se apliquen. Ante cualquier derrame o escape de sustancias químicas, sin importar qué tan pequeño parezca, hay que avisar de inmediato al personal presente y al

responsable del laboratorio, y pedir apoyo técnico antes de contener y neutralizar la sustancia.

3.10 Procedimientos de Emergencia

Según los casos estudiados en varias universidades (Princeton University, Kent State University, Hampshire College, University of California, San Francisco (UCSF), University of Arkansas, Florida State University, Cornell University), todo procedimiento de emergencia debe tener unos lineamientos mínimos para que funcione bien. Se explican a continuación.

Las fugas y derrames de reactivos sin controlar son el problema que más se repite en los laboratorios universitarios. La mayoría de las veces son liberaciones pequeñas y accidentales, que los propios investigadores del área pueden limpiar siguiendo protocolos ya establecidos, con muy poca exposición al riesgo. Para saber qué tan grave es un derrame hay que mirar varias cosas al mismo tiempo. Se considera un derrame pequeño cuando es de menos de un litro de una sustancia que no es muy tóxica, que no puede causar fuego o daño ambiental, y que no pasa en un pasillo o zona de paso público. Este tipo de derrame lo puede manejar el personal técnico ya capacitado. En cambio, un derrame grande, de más de un litro, o de sustancias muy volátiles, muy inflamables o muy tóxicas, requiere activar de inmediato el plan de evacuación y llamar solo a las brigadas de emergencia y al personal especializado.

Un kit básico para contener derrames debe tener materiales absorbentes que sirvan para varios tipos de sustancia, productos que neutralicen derrames ácidos o alcalinos, herramientas de recolección hechas de

plástico para evitar chispas, bolsas resistentes de polietileno para empacar residuos peligrosos, y equipo de protección personal desechable. Todo laboratorio que use reactivos químicos debe tener acceso inmediato a un kit de contención en buen estado. Que estos kits funcionen bien depende tanto de lo que tienen adentro como de dónde están ubicados. Los gabinetes de contención deben estar en lugares clave del área de trabajo, en un sitio fijo, bien señalizado y sin obstáculos, para poder usarlos rápido en una emergencia.

Ante cualquier contacto o exposición a agentes químicos, hay que aplicar de inmediato los protocolos médicos, sin importar qué tan leve parezca el caso. Siempre hay que avisar de inmediato al responsable técnico del área, al supervisor o al Investigador Principal del proyecto. Si la exposición fue en la piel, hay que lavar la zona con agua corriente durante al menos 15 minutos sin parar, salvo en casos especiales con ácido fluorhídrico, sólidos que se encienden solos, o fenoles concentrados por encima del 10%, que necesitan otros agentes específicos (Princeton University, 2024). Si fue en los ojos, hay que enjuagar sin parar con lavaojos durante los mismos 15 minutos, sacar los lentes de contacto de inmediato, y llevar a la persona al médico con urgencia. Si fue por inhalación y hay síntomas como problemas para respirar, dolor de cabeza, irritación, mareo o somnolencia, hay que llevar a la persona a la unidad de salud de la universidad o pedir ayuda a los servicios de emergencia.

Tener estaciones con duchas de seguridad y lavaojos no es opcional, es obligatorio en todos los laboratorios donde se manejen reactivos que puedan quemar o salpicar al personal. Y si se manejan recipientes de

más de un galón, las duchas de inundación son obligatorias. Las reglas de diseño son estrictas, estos equipos deben estar en caminos libres de obstáculos, a una distancia que se pueda recorrer en menos de 10 segundos, deben activarse con un solo toque, sin vueltas ni complicaciones, deben dar agua sin parar durante al menos 15 minutos a una temperatura tibia, entre 15,5°C y 37,7°C, y deben revisarse y mantenerse de forma periódica para asegurar que funcionen cuando hagan falta.

3.11 Tecnología y Automatización para Seguridad

La tecnología ha cambiado la forma de manejar la bioseguridad con redes de monitoreo automático y datos en tiempo real. Estos equipos pueden detectar cambios de temperatura o del aire antes de que pase algo malo, y avisan a tiempo para poder actuar o contener el problema. Entre los equipos que se usan cada vez más en los laboratorios están los detectores electroquímicos que vigilan el aire tóxico o inflamable, los registros continuos de humedad y temperatura, los sensores de humo adaptados para ambientes corrosivos, las celdas de carga y sensores de presión para reactores en condiciones críticas, y los anemómetros que miden todo el tiempo el flujo de aire en las campanas de extracción.

Tener datos en tiempo real sobre la reacción y el ambiente es clave para mantener la estabilidad y la seguridad de los procesos químicos. No basta con recoger la información, hay que tenerla disponible al momento para poder actuar rápido si algo se sale de lo esperado. La formación tradicional enseña sobre todo pruebas de laboratorio que se hacen aparte, pero la industria necesita evaluaciones dentro del proceso mismo

(inline), sobre la línea (online) o al lado del proceso (at-line), y todo esto forma parte de lo que se llama Química Analítica de Procesos (PAT) (UCLA, 2024).

Los sistemas digitales de inventario cambiaron por completo cómo se controlan los reactivos en las universidades. Estas plataformas no trabajan solas, están conectadas a bases de datos toxicológicas y pueden avisar de forma automática sobre incompatibilidades en el almacenamiento, fechas de vencimiento o cuidados especiales que necesita cada sustancia. Hacen muchas cosas, ayudan a encontrar rápido dónde está cada sustancia, avisan si un material se puede estar dañando, revisan automáticamente las tablas de reactividad, generan documentos al instante para las inspecciones, y se conectan directamente con compras para no pedir de más algo que ya se tiene.

Por otro lado, los entornos virtuales de aprendizaje han cambiado por completo la forma en que se imparte la instrucción en seguridad ocupacional dentro del ámbito académico, porque permiten itinerarios formativos adaptativos con seguimiento automatizado del avance pedagógico y evaluaciones cualitativas inmediatas. Una plataforma instruccional de alto rendimiento debería incorporar simulaciones tridimensionales e interactivas de escenarios de riesgo, trazabilidad algorítmica de calificaciones, diseño de contenidos diferenciados según el perfil del usuario —estudiante, técnico o Investigador Principal—, compatibilidad con dispositivos móviles institucionales y sincronización bidireccional con las bases de datos del departamento de gestión del talento humano.

3.12 Evaluación y Mejora Continua

Contar con indicadores clave de desempeño (KPI) cuantificables es lo que le permite a las instituciones de educación superior evaluar si sus sistemas de gestión de bioseguridad realmente están funcionando y dónde están fallando. Estos parámetros tienen que estructurarse siguiendo los criterios SMART: específicos, medibles, alcanzables, relevantes y con un horizonte temporal definido. Se pueden clasificar en cuatro dimensiones: los indicadores reactivos o de resultado, que se centran en el registro de accidentes, lesiones y cuasi-accidentes; los indicadores proactivos o concurrentes, que miden el porcentaje de personal acreditado en cursos, los coeficientes de inspección y el tiempo que se tarda en corregir los hallazgos; los indicadores de cultura preventiva, que capturan la notificación voluntaria de factores de riesgo y la participación en comités; y los indicadores de conformidad normativa, orientados a verificar la adherencia a los Procedimientos Operativos Estándar y el uso correcto de los Equipos de Protección Personal.

Hacer auditorías e inspecciones técnicas de forma constante da una visión clara de cómo están las cosas y permite mejorar el espacio de trabajo todo el tiempo. Un buen sistema de control combina revisiones internas y externas, revisiones periódicas para ver si todo está en orden y se cumplen las normas, auditorías generales del programa de seguridad, evaluaciones enfocadas en un riesgo específico o hechas después de un accidente, y una autoevaluación guiada para que cada grupo de investigación revise su propio desempeño. Es muy importante compartir los resultados de estas inspecciones con el personal, porque la evidencia

muestra que cuando el Investigador Principal se involucra de verdad en la supervisión, los accidentes bajan (National Research Council, 2014).

Comparar prácticas entre universidades (benchmarking) y adoptar estándares internacionales ayuda a mejorar todo el tiempo la protección académica. Las universidades ganan mucho cuando comparten con otras lo que han aprendido, y esto se puede hacer de varias formas, uniéndose a redes de bioseguridad universitaria, compartiendo de forma abierta los datos de accidentes, adoptando normas internacionales, y participando en investigaciones conjuntas sobre prevención de riesgos en laboratorios. No es solo compartir documentos, es construir un aprendizaje entre todos, donde cada institución se beneficia de la experiencia de las demás.

3.13 Implementación en Universidades Ecuatorianas

Aplicar estos estándares en las universidades de Ecuador necesita un diagnóstico completo que tome en cuenta las limitaciones de presupuesto, las normas legales vigentes y la cultura propia del país. Hay varios factores que afectan esto, el presupuesto limitado para comprar infraestructura de contención avanzada, la necesidad urgente de crear materiales de enseñanza en español que se ajusten a la realidad local, la obligación de seguir las normas de los ministerios de trabajo y ambiente, y el reto de adaptar el almacenamiento a los cambios de temperatura y humedad de cada región del Ecuador.

Por las limitaciones de presupuesto del sistema universitario ecuatoriano, lo mejor no es intentar hacer todo al mismo tiempo, sino avanzar poco a poco por etapas. Se propone un plan de cuatro fases, una Fase Inicial para diseñar las políticas de bioseguridad y dar formación básica al

personal, una Fase Intermedia para ordenar los documentos y crear los Procedimientos Operativos Estándar, una Fase Avanzada para comprar poco a poco tecnología de monitoreo automático, y una Fase de Consolidación para auditar los procesos y mejorarlos según los resultados que se hayan visto.

Hacer alianzas entre universidades ecuatorianas permite aprovechar mejor los recursos técnicos necesarios para cumplir las normas de bioseguridad. Esto se puede hacer de varias formas, creando juntos módulos de enseñanza digital, armando repositorios compartidos con lo aprendido, comprando en conjunto el equipo de protección para conseguir mejores precios, y creando programas de intercambio y pasantías para que el personal técnico de laboratorio mejore sus habilidades.

3.14 Tendencias Futuras e Innovaciones

Usar Inteligencia Artificial y aprendizaje automático está cambiando por completo cómo se previenen los riesgos en los laboratorios analíticos, porque permite predecir fallas, detectar anomalías a tiempo y mejorar los procesos. Estas tecnologías permiten modelar peligros según accidentes pasados, recomendar el mejor Equipo de Protección Personal según el reactivo que se va a usar, controlar de forma automática la temperatura en los depósitos de almacenamiento, y vigilar con cámaras cuándo alguien hace algo inseguro. Al mismo tiempo, la Realidad Virtual y Aumentada permiten practicar protocolos de emergencia y enfrentar situaciones críticas sin ningún riesgo real para la persona. Y la nanotecnología y los materiales avanzados obligan a revisar todo el

tiempo los criterios de contención, porque se comportan distinto en cuanto a toxicidad y cómo entran al cuerpo.

Las buenas prácticas de laboratorio juntan el rigor del método científico, la evidencia acumulada y la responsabilidad de cuidar la vida y el ambiente en los espacios de docencia e investigación. Para que esto funcione de verdad, hace falta una estrategia que junte la tecnología, la organización y la cultura de prevención. Los datos muestran que la bioseguridad en las universidades funciona mejor cuando pasan varias cosas al mismo tiempo, hay líderes comprometidos, formación técnica constante, protocolos que sí se cumplen y están bien respaldados, y una cultura en la institución que ve el prevenir riesgos como algo que no se negocia, y no como un simple trámite.

Para las muniversidades ecuatorianas, aplicar estas ideas significa ajustarlas a la realidad económica del país, sin dejar de mirar los estándares internacionales de calidad y protección laboral. Un plan que avance poco a poco, con ayuda entre instituciones, permite aprovechar mejor los recursos y hace que los espacios de experimentación mejoren más rápido. Como los peligros y los métodos químicos cambian todo el tiempo, las normas también tienen que ser flexibles. Esto pide un compromiso constante, revisar los procesos seguido, pagar por la capacitación técnica, y compartir lo que se aprende con redes científicas de todo el mundo. Si se hace bien, esto no solo protege al personal universitario ahora, también forma mejor a los futuros profesionales, que llevarán esa cultura de responsabilidad a su trabajo.

CAPÍTULO IV

4 ANÁLISIS Y RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, EVALUACIÓN DE RIESGOS Y RESPUESTA A EMERGENCIAS SEGÚN NORMAS INTERNACIONALES.

4.1 Gestión de Residuos en Instituciones Educativas

La administración técnicamente eficiente de los efluentes y residuos químicos constituye un pilar estratégico de elevada sensibilidad dentro del sistema de gestión ambiental universitaria, demandando la estructuración de un marco operativo sistemático orientado a armonizar las actividades sustantivas de docencia e investigación con los marcos normativos vigentes y los compromisos de sostenibilidad ecológica. La inherente complejidad de esta tarea radica en la heterogeneidad de los reactivos manipulados en las distintas unidades experimentales y en la naturaleza dinámicamente variable de los proyectos de investigación académica, lo cual induce una alta variabilidad temporal y cualitativa en los patrones de generación de desechos.

Las universidades tienen retos propios para clasificar y manejar sus residuos químicos, porque usan una gran variedad de sustancias distintas. Vistas desde la gestión ambiental, las universidades generan, por cada tonelada de residuo, una variedad de sustancias peligrosas más grande que muchos sectores industriales. Esto crea perfiles de riesgo muy variados, exige más cuidado al manipular las sustancias, y trae distintos posibles impactos en el ambiente. Por eso hay que diseñar planes de manejo flexibles, coherentes y bien respaldados por la ley.

Las normas para manejar residuos peligrosos se apoyan en un principio simple, primero prevenir la contaminación y reducir los residuos desde el origen. Este esquema tiene cuatro niveles, primero minimizar lo que se genera desde la fuente, segundo reutilizar o pasar a otros laboratorios los sobrantes que aún sirven, tercero recuperar y tratar técnicamente los solventes o disolventes, y como última opción, guardar o destruir con seguridad, quemando de forma controlada o con tratamiento químico (National Research Council, 2011). Antes de empezar cualquier experimento, hay que tener ya definido y aprobado un camino claro para disponer de los subproductos peligrosos y no peligrosos, así se cumple con la ley y se evitan problemas ambientales sorpresa (National Research Council, 2011).

4.2 Minimización de Residuos y Prevención de la Contaminación

La minimización en el origen constituye el mejor abordaje de relación costo-efectivo y técnicamente sostenible dentro del ciclo de vida de los residuos químicos universitarios, estando su desarrollo respaldado por exigencias del marco regulatorio nacional e internacional. Además de los beneficios ambientales directos, generar menos residuos ahorra bastante dinero a la institución, porque se gasta menos en contratar gestores externos y en la disposición final de desechos peligrosos. Entre las estrategias más usadas para lograrlo están cambiar los protocolos de análisis para no usar insumos tóxicos, optimizar las operaciones para reducir el volumen total de desechos, y reciclar o redistribuir, es decir, purificar los subproductos y volver a usarlos en el mismo experimento o en otro compatible.

La administración rigurosa y digitalizada de las existencias representa una de las medidas preventivas con mayor retorno operativo en la reducción de desechos, dado que la fiscalización continua del consumo evita la sobreadquisición y la consecuente caducidad de insumos (Goh et al., 2020). En el ámbito docente, la transición hacia la química a microescala demuestra ser un vehículo de alta eficacia para la drástica reducción volumétrica de los residuos, optimizando el uso de presupuesto y disminuyendo la carga térmica y reactiva en las estaciones de trabajo. La experiencia de la Universidad de Princeton demuestra que limitar el uso de envases de gran tamaño, como los garrafones de solventes de 20 litros, y optar por fraccionamientos más reducidos contribuye a evitar la acumulación de reactivos que terminan caducando sin ser utilizados (Princeton University, 2024). Por su parte, los principios de la Química Verde ofrecen un marco conceptual para rediseñar procesos sintéticos, fomentando la economía de átomos, la prevención primaria de subproductos y la sustitución de intermediarios corrosivos o tóxicos por alternativas de menor impacto biológico.

La aplicación de la Química Verde en guías prácticas universitarias ya ha arrojado métricas cuantificables de reducción de riesgo. Por ejemplo, investigaciones en la Universidad Santo Tomás mostraron que reformular las guías docentes bajo estos criterios permitió reducir en un 24 % la peligrosidad global de los reactivos y en un 50 % la masa de reactantes consumidos (Murcia et al., 2023). El nicho de intervención más importante ha sido la sustitución estratégica de solventes orgánicos tradicionales, y no es casualidad: los registros históricos indican que los laboratorios académicos de Estados Unidos generaron un promedio de

4.300 toneladas métricas anuales de residuos peligrosos entre 2011 y 2021, y aproximadamente la mitad de esa cifra correspondía a fases solventes volátiles. En este sentido, la investigación contemporánea prioriza la adopción de medios de reacción sustentables, como soluciones acuosas, fluidos en estado supercrítico, líquidos iónicos y matrices poliméricas de nula eco-toxicidad.

Para ayudar a cambiar las fases de extracción y separación que son dañinas por otras más seguras, el Instituto de Química Verde de la American Chemical Society (ACS-GCI) creó unas plataformas de computadora para elegir solventes. Estas guías dejan que los investigadores metan los datos de su reacción y encuentren opciones menos dañinas, mirando cosas como el momento dipolar, qué tan rápido se evapora el solvente, y qué tan tóxico es para el ambiente.

4.3 Clasificación y Segregación de Residuos Químicos

Saber bien qué tipo de residuo se tiene es el paso necesario para separarlo y guardarlo de acuerdo a la ley, y esa responsabilidad es del personal técnico o científico que generó el desecho, nadie más puede asumirla. Legalmente, un residuo químico es peligroso cuando sus propiedades ponen en riesgo la salud humana o los ecosistemas. La norma los agrupa en dos grupos, los residuos listados, que aparecen escritos en los catálogos de sustancias peligrosas, y los residuos característicos, que se clasifican así porque son reactivos, corrosivos, inflamables o tóxicos. Clasificar bien un residuo no es un simple trámite, de eso dependen luego el almacenamiento correcto, el etiquetado y los requisitos de contención que pide la ley ambiental.

Separar los residuos desde el origen es la principal protección contra reacciones no controladas, y de paso ahorra dinero en tratamiento externo. Las normas de la Environmental Protection Agency (EPA) piden revisar las características CRETIB (Corrosividad, Reactividad, Explosividad, Toxicidad, Inflamabilidad y Biológico-Infeccioso), comparando cada corriente con los inventarios de sustancias reguladas (Princeton University, 2024). Mezclar por accidente o a propósito sustancias incompatibles genera calor violento, presión dentro de los envases, gases tóxicos, incendios o explosiones, por eso es obligatorio guardarlas en contenedores separados para evitar fugas, derrames o fallas de los recipientes (University of South California, 2024). Estos contactos peligrosos casi siempre ocurren por derrames, contenedores con fugas o envases mal cerrados. Separar los residuos según su compatibilidad no solo mejora la seguridad al guardarlos, también facilita el tratamiento después. Por eso es obligatorio separar las sustancias orgánicas con cloro de las que no tienen cloro, para facilitar quemarlas o recuperar energía de ellas, mantener lejos los ácidos de las soluciones alcalinas para evitar neutralizaciones violentas, y mantener bien separados los oxidantes fuertes de materiales orgánicos, reductores, sustancias pirofóricas y reactivos que reaccionan con el agua (National Research Council, 2011).

Además, tener sistemas de contención secundaria funciona como una segunda barrera de protección, pensada para atrapar posibles derrames o grietas en los envases originales, y evitar que las sustancias dañinas se dispersen en el ambiente o entren en contacto con otras que sean incompatibles. La literatura técnica dice que usar bandejas de polietileno

de alta densidad (HDPE) o polipropileno sin tapa es un método muy efectivo para contener la mayoría de los líquidos químicos peligrosos que se manejan en la universidad.

4.4 Tratamiento y Neutralización de Residuos

Neutralizar en el propio laboratorio es un procedimiento válido para estabilizar ciertos residuos y reducir el volumen de desechos peligrosos que hay que gestionar después. En muchas normas, la corrosividad es la única característica de peligro que el mismo personal generador puede tratar químicamente sin necesitar un permiso especial para plantas de tratamiento. Este proceso consiste en ajustar el pH de la solución ácida o básica hasta llegar a un rango neutro, entre 5,5 y 9,5, antes de desecharla (Cornell University, 2024). A continuación se explican los procedimientos más comunes.

Neutralizar ácidos hay que hacerlo con mucho cuidado, porque estas reacciones liberan bastante calor. Las reglas de seguridad piden hacer esto dentro de una campana de extracción con pantalla de policarbonato, usando gafas, careta, guantes largos de nitrilo o neopreno, y un mandil que resista la corrosión. La mezcla debe estar en un baño de hielo para bajar el calor, y el ácido siempre se agrega sobre una solución diluida de base (como carbonato de sodio o hidróxido de sodio) en proporción 1:10, nunca al revés. Cuando el pH se mantiene estable entre 5,5 y 9,0, la solución ya se puede tirar al desagüe, dejando correr agua al menos 20 veces la cantidad del líquido tratado (Cornell University, 2024).

De forma parecida, para neutralizar residuos alcalinos primero se diluye el concentrado en agua en proporción 1:10, y luego se agrega poco a poco una solución de ácido clorhídrico aproximadamente 1 M, revolviendo todo el tiempo y midiendo el pH con un medidor. Cuando el pH se estabiliza entre 5,5 y 9,0, el líquido se puede verter a la red de aguas, enjuagando después con al menos 20 volúmenes de agua por cada volumen de residuo (Cornell University, 2024).

Hay que dejar claro que neutralizar en el laboratorio tiene límites y no sirve para todos los casos. Hay ácidos muy oxidantes, como el crómico, el perclórico y el nítrico concentrado, que están totalmente prohibidos para este proceso, por su alta reactividad, el riesgo de explosión y su toxicidad. El ácido crómico es un caso especial, nunca, bajo ninguna circunstancia, se debe intentar neutralizarlo en el laboratorio. Lo único que se puede hacer es guardarlo por completo y entregarlo a un gestor ambiental autorizado.

4.5 Almacenamiento Temporal y Áreas de Acumulación

Las Áreas de Acumulación Satelital (AAS) son espacios físicos dentro del laboratorio, cerca de donde se genera el residuo, y a cargo directo del personal técnico. Como regla de seguridad, la cantidad total de líquidos inflamables no debe pasar de 15 galones por cada espacio. La norma ambiental también pone límites de cuánto se puede acumular temporalmente ahí, para residuos muy tóxicos el límite es de 1 cuarto de galón (0,95 litros), y para el resto de residuos peligrosos combinados el límite es de 55 galones (208 litros).

Los envases para guardar residuos deben cumplir reglas estrictas, no deben reaccionar con el contenido, deben estar bien cerrados, y deben tener un espacio libre del 10% del volumen para el vapor que se pueda formar. Se pueden reutilizar los envases originales de los reactivos si el vidrio o plástico es compatible con el residuo. Por norma, la etiqueta debe decir claramente RESIDUOS PELIGROSOS, junto con la lista completa de los componentes químicos y su porcentaje aproximado, usando siempre el nombre químico completo o la nomenclatura IUPAC, nunca fórmulas abreviadas, dibujos o marcas comerciales (Princeton University, 2024).

Los depósitos y armarios de seguridad destinados al almacenamiento temporal requieren un programa contiguo de supervisión y mantenimiento preventivo con el objeto de detectar signos incipientes de degradación estructural en los recipientes o la pérdida de legibilidad en la rotulación. La masa total de sustancias químicas almacenadas debe mantenerse reducida al mínimo operacional. Se establece la obligatoriedad de ejecutar inspecciones auditadas con periodicidad semanal en todas las Áreas de Acumulación Satelital para garantizar el estricto cumplimiento normativo y la integridad del recinto.

4.6 Gestión de Residuos Especializados

En las unidades de investigación clínica, forense, ambiental y biomédica es común encontrar residuos que mezclan varios peligros a la vez, porque son corrosivos, tienen agentes patógenos, son tóxicos o hasta radioactivos. Manejar este tipo de residuos no es fácil, se necesitan protocolos de contención muy estrictos, que protejan al personal de

laboratorio y que también eviten que las sustancias dañinas lleguen al ambiente o afecten la salud pública.

Las muestras de tejidos, los animales de laboratorio y los restos de pruebas toxicológicas son un tipo de residuo mixto muy delicado, porque mezclan lo biológico con lo químico. Aquí entran muestras conservadas en formaldehído o especímenes contaminados con metales pesados o bifenilos policlorados (PCBs) (National Research Council, 2011). Para guardar este material de forma temporal, mientras se descompone, es obligatorio usar cámaras de congelación o refrigeración exclusivas, para evitar malos olores y que se propaguen agentes infecciosos (National Research Council, 2011).

Los residuos con metales pesados necesitan guardarse aparte, porque el cuerpo y el ambiente los acumulan y no se degradan, así que está prohibido diluirlos con otros residuos orgánicos comunes. En el caso del mercurio, ya sea puro o en sales, hay que aislarlo por completo (American Chemical Society, 2017). Por otro lado, los solventes que forman peróxidos, como el éter etílico, el tetrahidrofurano o el dioxano, pueden explotar por un golpe o roce cuando se cristalizan. Por eso es obligatorio anotar en la etiqueta la fecha en que se abrió el envase, y neutralizarlo o desecharlo antes de que pasen 12 meses desde que se abrió (University of South California, 2024).

4.7 Tecnologías de Tratamiento y Disposición Final

Quemar los residuos en hornos industriales es la forma más común de disponer de los efluentes orgánicos y solventes generados en la investigación universitaria, tengan cloro o no. Los datos de la Ley de

Conservación y Recuperación de Recursos (RCRA) muestran que la mayoría de estos residuos termina en hornos de alta temperatura, aunque todavía hay huecos en cómo el gobierno de Estados Unidos controla y registra las emisiones (US EPA, 2020). Quemar los residuos también elimina bien los agentes infecciosos y destruye las células en residuos orgánicos, muestras de tejidos y animales de laboratorio. Además de quemarlos fuera del lugar, hoy en día también se neutralizan, precipitan o estabilizan los residuos directamente donde se generan, para bajar antes su peligro (US EPA, 2020).

Tabla 2. Métodos de Tratamiento y Gestión de Residuos Químicos

Método de Gestión	**Descripción**	**Tipos de Residuos**	**Ubicación del sitio de gestión**	**Requisitos/Regulaciones**
Neutralización	Tratamiento químico para hacer residuos no peligrosos	• Ácidos • Bases	• In-situ • Ex-situ	• Debe alcanzar pH neutro • Verificación de no peligrosidad
Estabilización	Proceso para inmovilizar compuestos tóxicos antes de disposición	• Metales pesados • Compuestos tóxicos	• In-situ • Ex-situ	• Requerido antes de disposición en rellenos sanitarios • Pruebas de lixiviación
Destilación de Solventes	Tecnología establecida para recuperación	• Solventes de laboratorio	• Ex-situ • Plantas especializadas	• Tecnología establecida • Proceso de purificación validado

	y reutilización	• Solventes contaminados		
Reciclaje de Materiales Peligrosos	Recuperación y procesamiento de materiales para reutilización	• Residuos de plomo • Solventes para redestilación • Otros materiales reciclables	• Ex-situ • Instalaciones autorizadas	• 75% o más debe reciclarse o disponerse cada año (EEUU) • Documentación obligatoria
Programas de Intercambio Químico	Reutilización directa de materiales excedentes entre laboratorios	• Químicos sin abrir • Reactivos excedentes • Materiales no vencidos	• In-situ • Entre instituciones	• Preferiblemente químicos sin abrir • Verificación de calidad • Documentación de transferencia

Fuente: US EPA 2020

En Estados Unidos, la norma principal para manejar desechos peligrosos es la Resource Conservation and Recovery Act (RCRA), y las universidades deben cumplirla al pie de la letra ante la EPA y los organismos estatales. El control se hace con revisiones a las instalaciones, viendo los documentos de envío, y con sanciones cuando algo no cumple la norma. Dentro de esta ley, la Subparte K tiene reglas especiales pensadas para las universidades. Esta parte dice que solo personal profesional certificado puede clasificar los residuos, y no los estudiantes que todavía están aprendiendo. También pone un límite de 12 meses para tener residuos guardados en el laboratorio, y da más

libertad sobre dónde hacer esa clasificación, pero a cambio pide tener un Plan de Gestión de Residuos en Laboratorios.

Llevar un buen registro de los vertidos es la prueba que se necesita frente a auditorías ambientales. Toda descarga al alcantarillado de soluciones ácidas o básicas ya neutralizadas debe anotarse en la bitácora del laboratorio, y esa bitácora debe guardarse al menos tres años. El registro debe incluir qué tipo de sustancia se trató, el volumen exacto que se vertió, qué reactivos se usaron para neutralizar y en qué cantidad, las mediciones de pH antes y después, la fecha y hora exacta, la firma de quien lo hizo, y cualquier problema o calor inesperado que haya ocurrido durante el proceso.

4.8 Evaluación de Riesgos en Entornos Académicos

La evaluación cualitativa y cuantitativa de riesgos se erige en la herramienta metodológica fundamental para el diseño preventivo de las prácticas de docencia e investigación que involucran el uso de sustancias reactivas o procesos fisicoquímicos críticos. La identificación a priori de las propiedades reactivas, toxicológicas y físicas de los reactantes y subproductos se tipifica como una etapa indispensable dentro del protocolo de planificación experimental. Esta aproximación sistemática faculta a las instituciones académicas para anticipar, jerarquizar e implementar controles de ingeniería o administrativos antes de la materialización de incidentes, exposición ocupacional o pérdidas materiales, empleando para ello matrices de análisis específicas para cada tipología de ensayo (Tabla 3).

Tabla 3. Marco Metodológico de Identificación de Riesgos - RAMP

Fase	Componente	Descripción	Actividades Específicas
R	Reconocer (Recognize)	Identificación comprehensiva de todos los peligros	• Análisis de materiales químicos • Evaluación de equipos • Revisión de procesos • Búsqueda bibliográfica
A	Evaluar (Assess)	Determinación de probabilidad y severidad	• Cálculo de fórmula: Riesgo = Probabilidad × Severidad • Aplicación de matrices de riesgo • Análisis cuantitativo y cualitativo
M	Minimizar (Minimize)	Implementación de medidas de control	• Controles de ingeniería • Controles administrativos • Equipos de protección personal
P	Preparar (Prepare)	Desarrollo de protocolos de emergencia	• Planes de contingencia • Protocolos de respuesta • Entrenamiento del personal

Fuente: National Research Council

Para manejar bien los riesgos hay que distinguir claramente entre peligro y riesgo. El peligro es algo propio de un agente, un equipo o un lugar, que puede hacer daño, como lo tóxico que es un reactivo, una corriente eléctrica alta, el calor, o un piso resbaloso. El riesgo, en cambio, mide qué tan probable es que ese daño pase, según en qué condiciones esté expuesta la persona. Los estudios organizan esta evaluación en tres pasos, primero describir el peligro, segundo calcular qué tan grande es el riesgo, y tercero decidir qué se corrige primero (Tabla 4).

Tabla 4. Metodología de Tres Fases

Fase	Objetivo	Métodos	Herramientas
Fase 1	Identificación de Peligros	• Listas de verificación estructuradas • Observación directa • Entrevistas con personal • Revisión de incidentes históricos • Análisis cuantitativo y cualitativo	• Listas de chequeo estandarizados • Formularios de observación • Base de datos de incidentes • Software
Fase 3	Evaluación de Riesgos	• Matrices de riesgo multidimensionales • Factores ambientales y operacionales	• Matrices 5×5 • Escalas estandarizadas de 1-5 puntos
Fase 3	Clasificación y Priorización	• Asignación de niveles de riesgo • Priorización por criterios múltiples • Estrategias de mitigación específicas	• Escalas de 1-5 puntos • Matrices de priorización • Planes de acción

Fuente et al. (2022)

La cuantificación del nivel de riesgo derivado de la manipulación de sustancias peligrosas se determina matemáticamente mediante el producto de dos variables discretas: la probabilidad de exposición al factor de riesgo y la severidad potencial del daño. La formulación validada por Fatemi et al. (2022) y aplicada en la auditoría de entornos analíticos universitarios establece la siguiente ecuación de valoración:

$$Nivel\ de\ Riesgo = Probabilidad\ de\ exposición\ a\ un\ peligro \times Severidad\ del\ peligro.$$

En este modelo, cada variable se mide en una escala de 1 a 5, y el resultado final va de 1 (riesgo insignificante) a 25 (riesgo crítico o inaceptable) (Fatemi et al., 2022). La probabilidad de exposición mira qué tan seguido se usa la sustancia, qué tan volátil es, qué tan buenas son las barreras de contención, si se cumplen los Procedimientos Operativos Estándar, y qué tan capacitado está el personal. La gravedad del peligro se calcula revisando la literatura toxicológica y las normas, como los valores límite de la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), los límites de Concentración Inmediatamente Peligrosa para la Vida o la Salud (IDLH) y los índices del diamante NFPA 704. Esta parte mide el daño que puede sufrir la persona a corto o largo plazo, el riesgo de explosión, el daño a la infraestructura, los efectos en el ambiente que duran mucho tiempo, y el efecto sobre el trabajo de la institución (Tabla 5).

Tabla 5. Escalas de Evaluación de Riesgo.

Nivel	***Probabilidad***	***Severidad***	***Puntuación de Riesgo***	***Acción Requerida***
Muy Bajo (1)	*Muy improbable*	*Sin daño significativo*	*1-2*	*Monitoreo rutinario*
Bajo (2)	*Improbable*	*Daño menor*	*3-4*	*Revisar periódicamente*
Moderado (3)	*Posible*	*Daño moderado*	*5-12*	*Implementar controles*

Alto (4)	*Probable*	*Daño significativo*	*13-20*	*Acción inmediata*
Muy Alto (5)	*Muy probable*	*Daño catastrófico*	*21-25*	*Suspender actividad*

Fuente: Fatemi et al. (2022)

Desde la ingeniería de seguridad, el peligro propio de un agente químico no se puede reducir, solo se puede eliminar quitando el reactivo por completo. En cambio, el riesgo sí se puede bajar con controles técnicos y administrativos. No se puede eliminar el riesgo del todo sin quitar la fuente de peligro, pero se puede llevar a un nivel aceptable con una buena gestión (ALARP, tan bajo como sea razonablemente posible). Aplicar protocolos de evaluación de riesgos no es solo cumplir con un trámite, es una forma de proteger al personal y de asegurar que los programas académicos sigan funcionando bien. Como la mayoría de los accidentes vienen de una mala planificación o de un descuido, prevenir es mucho más barato que reaccionar después. Esto es aún más importante en las universidades, porque los estudiantes cambian todo el tiempo, las investigaciones no duran para siempre, hay muy distintos niveles de experiencia entre los usuarios, y siempre hay que equilibrar la libertad de enseñar con el control estricto del riesgo (American Chemical Society, 2017; Cadwallader & Pawelko, 2019; Erickson, 1999; Fatemi et al., 2022; Murcia et al., 2023).

4.9 Recomendaciones de Respuesta a Emergencias

Para diseñar buenos procedimientos de emergencia hay que entender bien qué tipos de emergencia pueden pasar y qué recursos hay para

atenderlas. Lo primero, siempre, es proteger la vida y la salud de las personas, ese principio debe guiar toda decisión durante una crisis. Un paso básico para cualquier emergencia es avisar a la gente cercana y mantenerla a una distancia segura del incidente. En los laboratorios académicos, las emergencias químicas son, por mucho, el tipo de incidente más común. Y dentro de esas, los derrames químicos son la emergencia más frecuente. En la mayoría de los casos son derrames pequeños que el propio personal del laboratorio puede limpiar con poco riesgo.

Para saber qué tan grave es un derrame químico hay que mirar varias cosas a la vez. Se considera un derrame pequeño cuando es de menos de un litro, de una sustancia que no es muy tóxica, sin riesgo de incendio o daño ambiental, y que no pasa en un pasillo o zona de paso público. Este tipo lo puede manejar el personal del laboratorio si está bien capacitado. Un derrame grande, en cambio, es de más de un litro o de compuestos muy tóxicos, volátiles o inflamables. En estos casos hay que evacuar el área de inmediato, avisar a los servicios de emergencia, esperar a que llegue personal especializado, y revisar la zona antes de dejar entrar a nadie de nuevo.

Las emergencias médicas en un laboratorio pueden venir de una exposición química, una lesión física, o hasta un problema de salud que no tiene que ver con el trabajo. Ante una exposición química importante, lo primero es retirar o aislar el químico si se puede hacer con seguridad, si fue en la piel o los ojos hay que quitarse la ropa contaminada y enjuagar con la ducha de emergencia o el lavaojos durante al menos 15 minutos. Los incendios de laboratorio pueden ser muy graves por la

cantidad de materiales inflamables y reactivos, así que ante un incendio lo primero es la seguridad de las personas, activar las alarmas, evacuar el área y avisar de inmediato a los servicios de emergencia. Tener protocolos claros de aviso es clave para responder bien. En general, las normas internacionales piden avisar a la policía tan pronto se sepa del incidente, aunque el orden exacto de los avisos puede cambiar según qué tan grave sea la emergencia.

El aviso, en general, sigue este orden, primero, garantizar la seguridad inmediata de las personas que están en el área, segundo, llamar a los servicios de emergencia si hay riesgo de vida, tercero, avisar al supervisor directo, ya sea el instructor, el investigador principal o el responsable del laboratorio, cuarto, avisar a seguridad institucional, que a su vez llama a la oficina de seguridad ambiental y salud ocupacional, y quinto, informar a las autoridades administrativas según los protocolos de la institución.

Cuando el personal del laboratorio puede manejar el derrame por su cuenta, hay que seguir un orden claro, a) despejar la zona y garantizar la seguridad, sacando de ahí a quien no tenga un rol necesario en la respuesta, b) ver si hace falta atención médica, y llamar al 911 si es necesario, c) ayudar a quien haya estado expuesto, usando la ducha de emergencia o el lavaojos, enjuagando la piel o los ojos por al menos 15 minutos, d) delimitar el área afectada, si se puede hacer sin más riesgo, e) ponerse el equipo de protección adecuado, como gafas, guantes y bata, y f) limpiar acompañado de otra persona, nunca hacerlo solo.

Sin importar qué tan leve parezca, toda exposición química debe reportarse al supervisor de laboratorio, al supervisor general o al investigador principal. Entre las recomendaciones más importantes están, enjuagar de inmediato con agua durante al menos 15 minutos si fue en la piel (salvo con ácido fluorhídrico, sólidos inflamables o fenol por encima del 10%), enjuagar con agua durante al menos 15 minutos, quitarse los lentes de contacto de inmediato, y buscar atención médica sin demora si fue en los ojos, y si fue por inhalación, ir al médico si hay síntomas como dolor de cabeza, irritación en nariz o garganta, mareo o somnolencia (Princeton University, 2024).

Ante un incendio hay que actuar rápido y con decisión, activar las alarmas, evacuar a todo el personal del área, cerrar las fuentes de combustible y de fuego si se puede hacer con seguridad, intentar apagar un incendio pequeño solo si se tiene el entrenamiento adecuado, buscar una salida segura, y avisar tanto a los servicios de emergencia como a seguridad de la institución.

4.10 En el contexto universitario de la carrera de Ingeniería Ambiental en la UTMACH

En Ecuador es muy importante aplicar métodos rigurosos de evaluación de riesgos y sistemas de gestión bien integrados, sobre todo porque en las áreas experimentales conviven usuarios muy distintos todos los días. En un mismo laboratorio están juntos estudiantes de pregrado, tesistas de posgrado, docentes-investigadores, analistas técnicos y colaboradores externos, cada uno con su propia experiencia y su propio nivel de formación en bioseguridad.

Identificar y describir bien las amenazas del trabajo de campo y de laboratorio, desde la exposición a sustancias reactivas o agentes biológicos hasta el manejo de equipos analíticos, es la base para construir una buena política de salud ocupacional, seguridad y protección ambiental. Hacerlo bien no solo reduce las enfermedades y accidentes en las facultades e institutos de investigación, también hace que los espacios científicos sean más seguros y predecibles.

Y para que cualquier programa de gestión del riesgo funcione de verdad, hace falta trabajar en red con otras instituciones, para compartir experiencias, infraestructura y protocolos. Este esfuerzo necesita también formar poco a poco al personal y mejorar los recursos técnicos, junto con una cultura organizacional que de verdad busque mejorar todo el tiempo y hacer las cosas bien.

Es prioritario que la institución mantenga y mejore sus estándares de seguridad, protección ambiental y sostenibilidad, para seguir siendo un referente de excelencia académica y científica.

CAPÍTULO V

5 EXPERIENCIAS HISTÓRICAS EN ALMACENAMIENTO Y MANIPULACIÓN DE SUSTANCIAS Y RESIDUOS.

Buena parte de lo que se ha escrito hasta ahora analiza los accidentes después de que pasaron, un enfoque útil pero que no basta, porque explica bien qué falló pero no da modelos que se puedan copiar sobre qué sí funciona. Una revisión sobre la investigación en seguridad de laboratorios académicos encontró que este campo todavía está poco desarrollado, faltan datos claros sobre cómo cambian las actitudes y comportamientos de seguridad, y sigue siendo difícil, dentro de las mismas instituciones, investigar y compartir lo que sí funciona (Ménard & Trant, 2020).

En la misma línea, un análisis bibliométrico sobre seguridad de laboratorio en universidades mostró que, aunque hay cada vez más estudios sobre el tema, casi todos vienen de pocas instituciones y regiones, y muchos lugares del mundo académico se quedan sin referentes propios adaptados a su realidad (Yang et al., 2019). Por eso, las universidades con menos recursos suelen terminar copiando recomendaciones genéricas que no siempre encajan con su presupuesto, su infraestructura o su cultura. Así que documentar experiencias que funcionaron sirve tanto para enseñar como para planear. Y hay algo que los programas de seguridad química más efectivos tienen en común, no se conforman con cumplir lo mínimo de la ley, sino que construyen una cultura de seguridad activa, con liderazgo, buena capacitación,

procedimientos claros y mejora constante (Abbas et al., 2016; National Research Council, 2011).

¿Qué es la cultura de seguridad? Es el conjunto de valores, percepciones y comportamientos que una comunidad comparte frente al riesgo, y se construye con acciones concretas que se repiten con el tiempo y que muestran el compromiso de la institución (Glendon & Stanton, 2000). La evidencia de universidades y colegios muestra que el primer paso de esa cultura es el clima de seguridad, es decir, qué tan en serio creen los estudiantes y trabajadores que la organización toma la seguridad. Ese clima predice bastante bien los comportamientos seguros y, por eso, también la cantidad de accidentes (Wu et al., 2007). Estudios más recientes muestran que ese clima cambia la conducta de los estudiantes de dos formas, la capacidad y la motivación, así que las mejores intervenciones trabajan a la vez el conocimiento técnico y los incentivos que sostienen la buena práctica (Liu et al., 2023).

Hay un segundo hilo que conecta todas las experiencias de este capítulo, pasar de una gestión reactiva a una que se adelanta al riesgo. Los mejores sistemas para medir el desempeño en seguridad combinan indicadores rezagados, que miden resultados finales como accidentes o exposiciones, con indicadores líderes, que miden actividades y condiciones que anticipan el desempeño futuro y permiten actuar antes de que ocurra el daño (Hinze et al., 2013).

El tercer eje es la química verde, como principio que ordena la seguridad. Reducir la cantidad y la peligrosidad de las sustancias que se guardan y se manipulan baja al mismo tiempo el riesgo laboral, el impacto

ambiental y el costo de manejar los residuos (Anastas & Warner, 1998). Varias experiencias muestran que prevenir desde la fuente, comprando menos y mejor, cambiando los solventes tóxicos, o usando cantidades más pequeñas en los experimentos, suele ser la medida de seguridad más efectiva y también la más barata. Por eso vale tanto cuando hay pocos recursos. Esta relación entre seguridad y sostenibilidad se conecta con compromisos internacionales de hace décadas, que dicen que manejar bien las sustancias químicas es parte esencial del desarrollo sostenible (United Nations, 1992).

Estos tres ejes son aún más importantes en las ciencias ambientales, porque quien investiga en este campo tiene una doble responsabilidad que no siempre existe en otras carreras, cuidar su propia salud y la de sus colegas, y al mismo tiempo cuidar los ecosistemas que estudia. Un derrame mal manejado, un residuo mal desechado o un inventario muy grande no solo ponen en riesgo la seguridad del laboratorio, también contradicen el sentido mismo de la disciplina. Por eso las experiencias de este capítulo importan no solo porque evitan daños a las personas, sino porque son coherentes con una ética ambiental completa. Hay que distinguir entre cumplir la ley y tener cultura, tener fichas de seguridad, gabinetes homologados o protocolos escritos es necesario, pero no basta. Los programas que de verdad funcionan van más allá de lo mínimo y logran que la seguridad se practique incluso sin que nadie esté mirando, porque ya se volvió un valor de la persona (Hill, 2007; National Research Council, 2011). Las cinco experiencias que siguen muestran, cada una a su manera, ese paso de cumplir la norma a vivir la cultura.

Este enfoque de experiencias positivas no reemplaza el análisis de accidentes que se vio en la primera parte del capítulo, lo completa. Estudiar accidentes, la explosión por peróxidos mal guardados, la exposición a vapores de mercurio, la reacción exotérmica sin control, enseña qué evitar y muestra la cadena de errores que llevan al daño. Estudiar experiencias exitosas, en cambio, enseña qué hacer y da modelos que se pueden copiar para prevenir. Los dos enfoques hacen falta y se refuerzan entre sí, uno muestra el problema con la fuerza de sus consecuencias, y el otro trae soluciones ya probadas. Al unir el aprendizaje del error con el del acierto, este capítulo busca dar una visión completa, que no solo advierta sobre los peligros, sino que ayude a construir, de forma activa, laboratorios seguros y sostenibles.

5.1 Criterios de selección y marco de análisis de las experiencias

Para elegir estas experiencias se usaron cuatro criterios, pensados para que el capítulo sea riguroso y útil al mismo tiempo. El primero fue la verificabilidad, solo se incluyeron experiencias con fuentes originales que se puedan rastrear. El segundo fue buscar intervenciones proactivas, pensadas para mejorar el almacenamiento, la manipulación segura o las buenas prácticas, no simples relatos de accidentes. El tercero fue la diversidad geográfica e institucional, buscando universidades con presupuestos altos y también con recursos más limitados. Y el cuarto fue qué tan fácil sería aplicarlas en Ecuador, viendo qué tan escalables son, cuánto cuestan, y si encajan con las normas del país, que reconocen manejar bien las sustancias y residuos como una obligación ambiental (República del Ecuador, 2017) y que usan el sistema ecuatoriano de

normalización para adoptar estándares técnicos (Gobierno de la República del Ecuador, 2021).

Cada experiencia se mira desde tres ángulos. El nivel técnico revisa los equipos, las sustancias, la infraestructura y las condiciones físicas que hicieron posible la mejora, como gabinetes de almacenamiento según qué se puede guardar junto, sistemas de inventario, herramientas para evaluar riesgos, o formas de trabajar con cantidades más pequeñas. El nivel procedimental revisa los protocolos, la capacitación, los pasos de trabajo, y las formas de comprobar que todo se cumpla, es decir, lo que hace que una buena intención se vuelva una práctica que se repite siempre. Y el nivel organizacional mira la estructura, los recursos, el liderazgo y la cultura que mantuvieron el cambio con el tiempo, porque las personas y la organización pesan tanto como los controles técnicos a la hora de prevenir (National Research Council, 2014). A esto se suma, en cada caso, una mirada a los resultados y una reflexión sobre qué haría falta para copiar la experiencia en las universidades ecuatorianas.

Vale la pena aclarar algo importante, estas experiencias no son recetas universales ni pruebas de que una cosa siempre causa otra, son ejemplos documentados que muestran principios de diseño que se pueden adaptar a otros lugares. Los mismos estudios dicen que es difícil probar con seguridad que una cosa causa otra en seguridad de laboratorio, porque hay muchas variables en juego y pocos estudios bien controlados (Ménard & Trant, 2020). Lo importante de estas experiencias es cómo se aplicaron, qué problema encontraron, qué solución usaron, cómo comprobaron que funcionó, y qué condiciones hicieron posible el resultado. Juntas, las cinco experiencias forman un grupo de estrategias

que ya se probaron y que, si se combinan y se ajustan a la realidad local, pueden ayudar a fortalecer la seguridad química en las ciencias ambientales del Ecuador (Tabla 6).

Tabla 6. Experiencias Investigadas

Experiencia	***Región / contexto***	***Método adecuado documentado***	***Fuente primaria***
Experiencia 1	*Estados Unidos (universidades de investigación)*	*Cultura de seguridad liderada por estudiantes e investigadores y transformación institucional tras un evento crítico*	*Gibson et al. (2014), Wang et al. (2019), Zinn et al. (2020)*
Experiencia 2	*España (País Vasco)*	*Diseño de un laboratorio de química verde con compra responsable y gestión sostenible de recursos*	*Gutierrez et al. (2020)*
Experiencia 3	*Singapur*	*Minimización de residuos en laboratorios de docencia mediante microescala, sustitución y recuperación*	*Goh et al. (2020)*
Experiencia 4	*Colombia (Latinoamérica)*	*Evaluación de riesgos y química verde aplicadas a los residuos de laboratorios universitarios*	*Murcia et al. (2023)*
Experiencia 5	*Irán (Oriente Medio)*	*Implementación sistemática de evaluación de riesgos de salud, seguridad y ambiente (HSE) como serie de casos*	*Fatemi et al. (2022)*

Fuente: Elaboración propia.

5.2 Experiencia 1. Estados Unidos: cultura de seguridad liderada por estudiantes, investigadores y la transformación institucional

Esta experiencia nace de un caso muy conocido en la química, en diciembre de 2008, una investigadora de la Universidad de California en Los Ángeles sufrió quemaduras mortales mientras manipulaba un reactivo pirofórico en un laboratorio de investigación. El caso dejó ver una brecha grande, una universidad de primer nivel, muy avanzada en ciencia, pero con prácticas de seguridad bastante frágiles en el día a día. Esto llevó a revisar a fondo cómo se manejaba la seguridad en el mundo académico (Ménard & Trant, 2020). Lo que importa de esta experiencia para este manual no es el accidente en sí, sino lo que vino después, un cambio basado en evidencia, bien documentado y evaluado, que convirtió a UCLA, y a todo el sistema de la Universidad de California, en un referente de buenas prácticas.

El diagnóstico que llevó a la reforma coincidió con algo preocupante, los investigadores en la universidad evalúan los riesgos de sus procedimientos mucho menos que sus colegas de la industria o de laboratorios del gobierno, aunque digan que la seguridad les importa (Schröder et al., 2016). Esa diferencia entre lo que se dice y lo que se hace también apareció en encuestas internacionales, que mostraron que muchos investigadores habían visto o sufrido accidentes que se podían evitar (Van Noorden, 2013). Todo esto mostraba que el problema no era de conocimiento, sino de cultura, incentivos y estructura. Por eso la

respuesta no podía ser solo poner más reglas, había que cambiar cómo se organizaba, se enseñaba y se vivía la seguridad en los laboratorios.

5.2.1 Descripción del método implementado

El cambio avanzó en dos frentes que resumen la idea central de esta experiencia, uno desde arriba, con un rediseño institucional, y otro desde abajo, con liderazgo compartido entre estudiantes e investigadores. Desde arriba, la oficina de medio ambiente, salud y seguridad de UCLA reorganizó su trabajo e hizo obligatoria la capacitación en seguridad de laboratorio para investigadores principales y sus equipos, con más inspecciones y una herramienta de computadora para evaluar y dar seguimiento a los peligros de cada laboratorio, identificar riesgos, registrar personal y espacios, y revisar el uso del equipo de protección personal (Gibson et al., 2014). La universidad se puso una meta clara, llegar a la excelencia en seguridad de laboratorio académico, y creó junto con el resto del sistema universitario un centro dedicado a este tema, pensado para investigar, formar y compartir buenas prácticas. Esto muestra algo importante, la seguridad se sostiene cuando hay una estructura con autoridad, recursos y continuidad, no cuando depende de esfuerzos aislados de una sola persona.

Desde abajo, distintas universidades de Estados Unidos crearon modelos de seguridad liderados por los propios estudiantes e investigadores, muy valiosos porque cuestan poco y duran en el tiempo. Un modelo pionero, contado en una investigación de química, habla de un comité de seguridad formado por estudiantes de posgrado y personal investigador, con libertad para revisarse entre ellos, avisar de riesgos, organizar

capacitaciones y hablar con la administración. La clave de que funcionara fue armar una estructura que siguiera funcionando aunque los estudiantes se fueran graduando, con roles claros, pasos escritos, y una forma de pasar la posta al siguiente grupo (Wang et al., 2019). Otra universidad hizo algo parecido, creando una organización de seguridad dirigida por investigadores, y ahí lo importante fue que la administración le diera respaldo oficial, que formara líderes, y que metiera la seguridad en el día a día de los grupos de investigación (Zinn et al., 2020). En las carreras de pregrado, un programa puso equipos de seguridad formados por estudiantes dentro de un curso anual de química orgánica, con práctica, presentaciones hechas por los mismos estudiantes, vigilancia del laboratorio, e inspecciones después de cada clase. Su mayor ventaja, además de mejorar actitudes y prácticas, fue que se podía copiar en casi cualquier curso de laboratorio de ciencias (Alaimo et al., 2010).

Lo que le da valor a esta experiencia es justo la combinación de los dos frentes, el rediseño institucional aporta estructura, autoridad y recursos, y el liderazgo compartido aporta compromiso diario, vigilancia entre compañeros y cultura que dura. Un enfoque solo desde arriba se puede sentir como un control impuesto desde afuera, algo que la literatura ha criticado como volver a una figura policial de la seguridad. Un enfoque solo desde abajo, en cambio, puede fallar en continuidad y recursos. Al juntar los dos, la seguridad se vuelve una responsabilidad de todos, parte de la formación y de la identidad profesional del científico, algo que encaja con la idea de que la seguridad debería enseñarse como parte de la ética de la investigación, y no como un simple trámite (Tang, 2025).

5.2.2 Análisis en tres niveles

En lo técnico, esta experiencia usó herramientas concretas para manejar el riesgo, la plataforma para evaluar y dar seguimiento a los peligros de cada laboratorio, los inventarios de espacios y personal, y el control del uso del equipo de protección personal (Gibson et al., 2014). Estas herramientas muestran algo que se repite en seguridad de experimentos, identificar los peligros a tiempo y planear cada procedimiento antes de hacerlo es la primera barrera de protección (Cadwallader & Pawelko, 2019). En lo procedimental, el cambio se afirmó con la capacitación obligatoria, las inspecciones periódicas, tanto las formales de la oficina de seguridad como las que hacían los propios estudiantes entre ellos, y las charlas de seguridad dentro de las reuniones de grupo, cosas que convierten la seguridad en un hábito que se puede comprobar, y no solo en palabras (Bruch et al., 2021). En lo organizacional, lo que decidió todo fue el compromiso claro del liderazgo, visto en metas públicas, en recursos asignados y en crear una estructura permanente para la seguridad, y eso cambió el clima de seguridad de la institución, es decir, qué tanto cree la gente que la seguridad es de verdad una prioridad (Wu et al., 2007; Liu et al., 2023) (Tabla 7).

Tabla 7.Componentes del modelo estadounidense

Componente	***Nivel***	***Función preventiva principal***
Capacitación obligatoria para investigadores principales y grupos	*Procedimental*	*Homogeneiza el conocimiento base y establece la seguridad como condición de acceso al laboratorio*
Herramienta de evaluación y seguimiento de peligros por laboratorio	*Técnico*	*Identifica y registra peligros, espacios y personal; orienta el uso de equipos de protección*
Inspecciones formales y entre pares	*Procedimental*	*Detecta desviaciones de forma temprana y normaliza la vigilancia mutua sin connotación punitiva*
Comité de seguridad estudiantil sostenible	*Organizacional*	*Distribuye la responsabilidad, asegura relevo generacional y acerca la seguridad a la práctica diaria*
Centro dedicado a la seguridad de laboratorio	*Organizacional*	*Provee autoridad, recursos e investigación aplicada con continuidad institucional*
Discusiones de seguridad en reuniones de grupo	*Procedimental*	*Convierte la seguridad en hábito comunicativo y en aprendizaje continuo*
Meta pública de excelencia y compromiso del liderazgo	*Organizacional*	*Modifica el clima de seguridad y legitima la inversión sostenida*

Fuente: Elaboración propia.

5.2.3 Resultados y evidencia

La evidencia sobre esta experiencia es en parte de números y en parte de estructura. En números, la institución notó que subió mucho la asistencia a clases y actividades de seguridad después de que la capacitación se hizo obligatoria, algo que muestra que el programa sí llegó a los investigadores (Gibson et al., 2014). En estructura, lo más duradero fue que la seguridad quedó instalada para siempre, se creó una plataforma de evaluación de peligros muy usada, se armó un centro especializado, y se compartieron modelos de liderazgo estudiantil que otras universidades ya copiaron. Los modelos liderados por estudiantes e investigadores muestran mejoras en actitudes y prácticas de seguridad, y más responsabilidad compartida, sobre todo porque logran meter la seguridad en la cultura diaria del grupo de investigación (Wang et al., 2019; Alaimo et al., 2010; Zinn et al., 2020). Eso sí, hay que ver estos resultados con cuidado, no son estudios controlados, son descripciones bien hechas de intervenciones cuyo valor está en que la solución encajó bien con el problema que se identificó (Ménard & Trant, 2020).

5.2.4 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas

Para las universidades públicas del Ecuador, esta experiencia deja dos tipos de lecciones, una ambiciosa y otra más fácil de aplicar. La parte ambiciosa, crear centros especializados y plataformas informáticas complejas, probablemente cueste más de lo que muchas instituciones pueden pagar, al menos por ahora. Pero la parte accesible sí se puede hacer ya y sin gastar mucho, armar comités de seguridad con estudiantes

de posgrado y docentes, con roles claros, inspecciones entre ellos mismos y un relevo bien documentado. Esto no necesita mucho dinero, y mejora la cultura de seguridad casi de inmediato, siempre que las autoridades de la facultad lo apoyen de verdad. En un programa como Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Machala, un comité así podría revisar los inventarios, comprobar que el almacenamiento respete qué se puede guardar junto, hacer charlas cortas de seguridad antes de las prácticas, y crear una herramienta sencilla para evaluar peligros por laboratorio, aunque sea en una hoja de cálculo, copiando la misma idea de las plataformas caras pero sin necesitar su tecnología.

Para copiar este modelo con éxito hacen falta tres cosas que la propia experiencia de Estados Unidos deja claras. La primera es un liderazgo institucional visible, sin un compromiso claro de las autoridades, con tiempo asignado, reconocimiento y apoyo formal, los comités de estudiantes pierden fuerza y desaparecen con el tiempo. La segunda es meter la seguridad en la formación misma, para que evaluar riesgos y seguir buenas prácticas se enseñe y se evalúe como parte del currículo y de la ética de la investigación, no como un simple trámite (Tang, 2025). Y la tercera es pensar en la continuidad, es decir, diseñar desde el principio cómo se va a dar el relevo y cómo se va a documentar todo, para que la iniciativa no dependa de un solo grupo de estudiantes entusiastas. Con estas tres cosas juntas, una institución con pocos recursos puede lograr, con organización y cultura, resultados parecidos a los que otras logran con tecnología y dinero.

5.3 Experiencia 2. España (País Vasco): diseño de un laboratorio de química verde con compra responsable y gestión sostenible de recursos

Esta experiencia europea se enfoca en el diseño del laboratorio y en cómo se compran los materiales. Un equipo de investigadores de la Universidad del País Vasco documentó cómo crearon un laboratorio de química verde para manejar los recursos de forma sostenible y comprar de forma responsable, buscando bajar al mismo tiempo el impacto ambiental, el riesgo laboral y el costo de operación (Gutierrez et al., 2020). Esta experiencia se apoya en una idea ya conocida, los doce principios de la química verde, que dicen que hay que prevenir la generación de residuos, aprovechar al máximo los átomos de cada reacción, usar sustancias auxiliares y solventes menos peligrosos, y diseñar productos y procesos que sean más seguros desde el inicio (Anastas & Warner, 1998).

5.3.1 Descripción del método implementado

El método combinó tres líneas de acción que trabajan juntas (Tabla 8). La primera fue ordenar las compras, centralizando quién compra, revisando y limpiando los inventarios, y comprando solo lo que hace falta en vez de acumular por conveniencia o por descuentos de volumen (Gutierrez et al., 2020). Esto reduce el dinero atrapado en reactivos, baja la cantidad de sustancias que caducan sin usarse, y sobre todo reduce el volumen y el peligro de lo que hay que guardar con separación por compatibilidad.

La segunda línea fue elegir sustancias y solventes menos peligrosos, pensando en la seguridad, la salud y el ambiente. Aquí ayudan mucho las guías para elegir solventes, que ordenan las opciones con colores (recomendable, problemática o peligrosa), según sus propiedades físicas y las reglas del Sistema Globalmente Armonizado. Así se pueden cambiar los solventes clásicos más tóxicos o inflamables por otros menos peligrosos, algunos incluso hechos a partir de materiales biológicos, con buen respaldo técnico (Prat et al., 2016).

La tercera línea fue cambiar las prácticas y los procesos de laboratorio, reducir la escala de trabajo, usar medios de reacción menos dañinos, como agua en vez de solventes orgánicos, aprovechando avances en química de coordinación acuosa (Stahl & König, 2024), y pensar desde el diseño del experimento cómo generar menos residuos.

Algo especial de esta experiencia es que la química verde no se enseñó solo como teoría, se aplicó de verdad, cambiando la cultura y la infraestructura del laboratorio. La literatura ha reunido distintas formas de meter la química verde y la seguridad en esa cultura, y muestra que sustituir reactivos, reducir la escala y elegir materiales con responsabilidad funciona mejor cuando se hace parte de las decisiones diarias de compra, docencia e investigación, y no cuando queda como una materia optativa aparte (O'Neil et al., 2021). Así, la compra responsable termina siendo una práctica de seguridad muy importante, porque cada compra es, en el fondo, una decisión sobre qué riesgo va a entrar al laboratorio.

En lo técnico, esto cambió directamente el inventario, con menos sustancias en total hay también menos sustancias peligrosas y en menor cantidad. Cambiar solventes de alto riesgo por otros menos peligrosos baja la cantidad de inflamables y tóxicos que hay que guardar en gabinetes especiales, alivia la presión sobre la ventilación, y baja la gravedad de un posible incidente. Limpiar el inventario también elimina un peligro escondido muy común, los reactivos viejos y las sustancias que forman peróxidos cuando no se rotan a tiempo. En lo procedimental, el método se apoyó en reglas de compra centralizada, criterios escritos para elegir solventes, y decisiones que ya incluyen evaluar el peligro desde el momento de comprar, todo esto convierte una buena intención en una rutina que se puede comprobar. En lo organizacional, hizo falta coordinar más allá de un solo laboratorio, casi siempre con una oficina central de compras e inventarios, y una cultura compartida que viera usar los recursos con moderación como algo bueno, y no como una limitación. Sin una política institucional de compra responsable, cada grupo decide por su cuenta y eso tiende a acumular de más.

Tabla 8. Líneas de acción de la compra responsable y la química verde, y su efecto sobre la seguridad del almacenamiento

Línea de acción	***Medida implementada***	***Efecto sobre el riesgo de almacenamiento y manipulación***
Racionalización de compras	*Centralización de la adquisición y depuración de inventarios, comprar solo lo necesario*	*Reduce el volumen almacenado, la caducidad de reactivos y las incompatibilidades por saturación de anaqueles*
Selección de solventes menos peligrosos	*Uso de guías de selección con escala de colores alineada con el Sistema Globalmente Armonizado*	*Disminuye la carga de inflamables y tóxicos y la severidad potencial de incidentes*
Medios de reacción benignos	*Sustitución de solventes orgánicos por agua u opciones de menor peligrosidad cuando es viable*	*Reduce vapores peligrosos, presión sobre la ventilación y generación de residuos orgánicos*
Reducción de escala	*Diseño de experimentos con menores cantidades de reactivo*	*Aminora tanto el peligro inmediato como el volumen de residuos y de sustancias a resguardar*
Política institucional de compras	*Criterios documentados y coordinación central de adquisiciones*	*Evita la sobreacumulación discrecional y da continuidad a la prevención en la fuente*

Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 Resultados y evidencia

Esta experiencia mostró una gestión de recursos más sostenible, menos acumulación de reactivos, y compras más orientadas a opciones de menor impacto ambiental y sanitario (Gutierrez et al., 2020). El valor de esto para la seguridad del laboratorio es directo, aunque casi nunca se nota, un inventario más pequeño, ordenado y menos peligroso es más fácil de guardar bien separado, genera menos reactivos vencidos peligrosos, y es más barato de desechar. La conexión entre seguridad y sostenibilidad, que este manual defiende de fondo, se ve aquí claramente, las medidas que cuidan el ambiente también cuidan a las personas y al presupuesto. Aun así, hay que leer esta evidencia como la descripción de una intervención bien diseñada, y no como una medición controlada de efectos por separado.

Vale la pena explicar los beneficios concretos de esta experiencia para el almacenamiento, que muchas veces no se notan. Tener menos solventes inflamables baja directamente el riesgo de incendio del laboratorio y la exigencia sobre los gabinetes homologados y la ventilación, aliviando justo lo que se pedía en el tercer capítulo. Cambiar los solventes que forman peróxidos por otros más estables elimina uno de los peligros escondidos más traicioneros del almacenamiento por mucho tiempo, ese que empeora cuando no hay buena rotación. Un inventario más pequeño y ordenado también es más fácil de separar por compatibilidad química, con menos contacto entre sustancias que no deberían estar juntas, y menos reactivos vencidos significa menos residuos peligrosos que gestionar. En conjunto, la compra responsable no es solo una medida de sostenibilidad económica y ambiental, también

es una intervención de seguridad muy importante para el almacenamiento, porque ataca la raíz de muchos peligros que otras medidas solo logran contener cuando ya están en el laboratorio.

5.3.3 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas

Esta es probablemente la experiencia más fácil de aplicar en las universidades públicas ecuatorianas, porque su herramienta principal, la compra responsable, no exige más inversión, solo reorganizar decisiones que ya se toman todos los días. Con pocos recursos, ordenar las compras y limpiar los inventarios trae dos beneficios, mejora la seguridad del almacenamiento y libera presupuesto que se suele perder en reactivos que terminan caducando sin usarse. Para un programa como Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Machala, tener una política de compra centralizada con criterios claros que prioricen comprar solo lo necesario y de menor peligrosidad, y usar guías de selección de solventes al comprar materiales, son medidas de alto impacto y bajo costo, que encajan bien con la vocación de sostenibilidad del programa y con las normas ambientales del país (República del Ecuador, 2017).

Aplicar esta experiencia en la realidad local depende de dos cosas. La primera es tener una oficina que coordine las compras y los inventarios, para que las decisiones no se tomen por separado en cada laboratorio, y mantener un registro actualizado de existencias, algo que la propia literatura sobre almacenamiento seguro considera el punto de partida de cualquier buena gestión de sustancias. La segunda es formar al personal en criterios de química verde para elegir materiales, para que cambiar

solventes y reducir la escala de trabajo se vuelva algo natural, y no un esfuerzo que se hace de vez en cuando. Cuando la química verde entra en las decisiones diarias de compra y de diseño de experimentos, deja de ser una idea teórica y se convierte en la estrategia de prevención más barata y efectiva para una universidad con poco presupuesto.

5.3.4 Experiencia 3. Singapur: minimización de residuos en laboratorios de docencia mediante microescala, sustitución y recuperación

Esta experiencia del sudeste asiático se parece mucho a lo que pasa en universidades con muchos estudiantes, donde los laboratorios de práctica reciben a cientos de alumnos haciendo, una y otra vez, los mismos experimentos durante el semestre. En estos casos, si se multiplica la pequeña cantidad de reactivo que usa cada estudiante por todos los estudiantes juntos, el volumen de residuos peligrosos se vuelve grande. Esto no solo complica cómo tratar los desechos, también obliga a tener inventarios grandes de reactivos guardados, para que no falten durante todo el semestre.

Una investigación hecha en los laboratorios de docencia de la Universidad Nacional de Singapur revisó y documentó varias formas de generar menos residuos químicos en la enseñanza de química, con datos y con un método de enseñanza bien pensado (Goh et al., 2020). Este caso interesa para el manual por dos razones, toca a la vez cómo manipular reactivos con seguridad y cómo disponer de los efluentes, dos temas centrales de capítulos anteriores, y aplica estos métodos justo en

los espacios de enseñanza donde se están formando los futuros profesionales de las ciencias ambientales y aplicadas.

La base teórica de este modelo junta dos ideas, la jerarquía clásica de gestión de residuos, que pone primero prevenir y reducir desde el origen antes que tratar químicamente o desechar en celdas de seguridad, y los principios de la Química Verde, sobre todo el que dice que es mejor evitar generar el residuo que neutralizarlo después (Anastas & Warner, 1998). Las normas internacionales sobre desechos muy peligrosos apoyan este mismo orden, poniendo la minimización en la fuente como la primera medida dentro de la gestión ambiental (US EPA, 2020). En la educación superior, esto vale doble, baja mucho el riesgo laboral y el gasto de la institución, y de paso enseña a los estudiantes a usar los insumos con moderación, como parte de la ética profesional en la ciencia.

5.3.5 Descripción del método implementado

El método usó varias herramientas que se complementan, pensadas para actuar en distintos momentos del uso de los reactivos en las clases (Tabla 9). Lo más importante fue reducir la escala de los ensayos (downscaling), es decir, cambiar los protocolos para usar cantidades muy pequeñas de reactivo por estudiante, sin bajar la calidad de lo que se aprende (Goh et al., 2020). Esto se basa en la química a microescala, que junto con la química verde está bien respaldada en la literatura técnica, baja el consumo de reactivos por persona, genera menos residuos, reduce el costo de cada práctica, y baja mucho la exposición de los estudiantes a los riesgos, sin perder rigor en la formación de laboratorio (Singh et al., 1999). La segunda línea fue ir cambiando, poco a poco y de forma

ordenada, los insumos más peligrosos por otros con menos toxicidad o menos impacto ambiental, siempre que eso no afectara lo que se debía aprender. La tercera línea fue crear procesos propios para recuperar, purificar y reciclar solventes orgánicos y otros materiales, cerrando en parte el ciclo de uso, y así comprar menos reactivos nuevos y sacar menos desechos del laboratorio. La cuarta fue rediseñar por completo las guías de laboratorio, cambiando los procedimientos que generaban más residuos por otros que enseñaban lo mismo con menos impacto ambiental.

Lo que distingue a esta intervención es que fue muy metódica y se midió con números. En vez de hacer cambios sueltos sin orden, la investigación midió el efecto de cada acción sobre la cantidad de residuos generados, tanto en volumen como en peso (Goh et al., 2020). Esta medición permitió ordenar las intervenciones según qué tan bien funcionaban, y mostró con datos reales que sí se puede minimizar desde el origen en laboratorios de docencia con muchos estudiantes (Goh et al., 2020). Este enfoque basado en datos encaja con las normas internacionales para hacer de la seguridad y la química sostenible algo institucional, que exigen convertir las buenas intenciones en métricas concretas y medibles dentro de la rutina del laboratorio (O'Neil et al., 2021).

5.3.6 Análisis en tres niveles

En lo técnico, el programa cambió la escala de trabajo y las fórmulas químicas de tres formas, usando menos cantidad de reactivo, cambiando por sustancias menos peligrosas, y recuperando disolventes. Reducir la

escala es muy valioso en la docencia universitaria, porque baja al mismo tiempo la probabilidad y la gravedad de un accidente, y reduce el volumen de reactivos que hay que guardar para cubrir las materias con muchos estudiantes. En lo procedimental, esto se sostuvo actualizando los manuales de práctica, dejando fijas las microtécnicas, y poniendo protocolos permanentes para reciclar solventes, para que reducir residuos no dependiera de un solo profesor, sino que fuera parte fija del plan de estudios. En lo organizacional, el proyecto necesitó que trabajaran juntos la coordinación académica, el personal técnico, los docentes de cada materia y la administración de la institución, además de tener el aval para cambiar de forma oficial los programas y las guías de práctica. Reducir residuos químicos en la docencia universitaria no es solo un tema de ingeniería o de manejo de desechos, es sobre todo una política curricular e institucional que involucra a toda la estructura académica.

Tabla 9. Estrategias de minimización de residuos en laboratorios de docencia y su impacto

Estrategia	***Descripción***	***Impacto en seguridad y sostenibilidad***
Reducción de escala (microescala)	*Uso de cantidades sustancialmente menores de reactivo por estudiante*	*Reduce probabilidad y severidad de incidentes, residuos generados y existencias a almacenar*
Sustitución de reactivos	*Reemplazo de sustancias peligrosas por alternativas más benignas cuando es viable*	*Disminuye la toxicidad y la peligrosidad del inventario y de los residuos*

Estrategia	*Descripción*	*Impacto en seguridad y sostenibilidad*
Recuperación y reciclaje de solventes	*Purificación y reutilización de solventes y ciertos materiales*	*Reduce compras nuevas, volumen de residuos y costo de disposición*
Rediseño de experimentos	*Reemplazo de prácticas muy generadoras de residuos por equivalentes de menor impacto*	*Mantiene los objetivos de aprendizaje con menor huella y menor riesgo*
Cuantificación y priorización	*Medición del residuo evitado por cada intervención*	*Permite priorizar medidas de mayor rendimiento y sostener la mejora con evidencia*

Fuente: Elaboración propia.

5.3.7 Resultados y evidencia

Los datos de la investigación confirmaron que bajó bastante el volumen total de efluentes generados en las clases donde se aplicó el cambio, mostrando que rediseñar bien los protocolos, con microescala, sustitución de reactivos y recuperación de disolventes, reduce mucho los desechos peligrosos sin dañar el rigor ni los objetivos de la enseñanza (Goh et al., 2020). Esto tiene un efecto directo en la seguridad al almacenar y manipular insumos, si se generan menos residuos, pasan menos tiempo acumulados en las mesas de trabajo, y si se usan dosis más pequeñas por ensayo, se pueden mantener inventarios mucho más chicos, lo que mejora el uso del espacio y baja la gravedad de un posible derrame o emergencia. Esta evidencia refuerza algo que se ha dicho en todo el manual, en la docencia científica universitaria, prevenir desde el origen es a la vez el modelo de enseñanza más eficiente, la estrategia de

seguridad más sólida, y la opción de gestión más sostenible ambientalmente. Aunque esto se aplicó en un lugar concreto, su valor va más allá, porque su solidez y su facilidad de repetirlo la hacen aplicable a otras instituciones de educación superior.

Los beneficios de este esquema para el almacenamiento y la manipulación se notan sobre todo en cursos con muchos estudiantes. Pasar a microescala reduce directamente la cantidad de reactivo que maneja cada persona, lo que baja mucho la gravedad de un derrame accidental en salones llenos de gente, donde los riesgos de una evacuación rápida o de respirar vapores se multiplican por la cantidad de personas. Al usar menos cantidad de insumo por ensayo, también hace falta guardar menos reactivo en los depósitos centrales, y así los inventarios quedan más pequeños, mejor separados según qué no se debe mezclar, y más baratos de comprar y guardar. Recuperar los disolventes ayuda de dos formas a la vez, se compra menos reactivo puro, y se generan menos efluentes para mandar a tratamiento. Esto también alivia el guardado temporal en los centros de acopio de los laboratorios de clases, que suele ser un punto delicado, porque ahí se acumulan sustancias inflamables o tóxicas por mucho tiempo. Por eso, minimizar desde el origen en los laboratorios universitarios no solo mejora la formación de los estudiantes, también sube de forma medible los estándares de seguridad y salud laboral en las propias instalaciones.

5.3.8 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas

Para las universidades públicas de Ecuador, sobre todo las que tienen mucha práctica en carreras de biología, microbiología o análisis ambiental, este modelo es fácil de aplicar y da muy buen resultado. Ajustar la escala de las prácticas y cambiar los métodos que generan más efluentes permite bajar al mismo tiempo el riesgo laboral para los estudiantes, la cantidad de desechos peligrosos que hay que entregar a gestores externos, y el gasto en comprar reactivos. Estos tres beneficios encajan directo con las limitaciones de presupuesto de la universidad pública, y van de la mano con la vocación de sostenibilidad de programas como Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Machala. Aplicar la microescala en las materias de ciencias básicas, cambiar de forma estratégica las sustancias más peligrosas cuando no afecte los resultados, y adoptar métodos sencillos de destilación o purificación de disolventes son medidas de bajo costo y alto impacto en prevención. Todo esto se puede ir incorporando poco a poco en las guías de práctica de las distintas facultades.

Aplicar este modelo en el entorno universitario local depende de tres condiciones. La primera es rediseñar y revisar los manuales de práctica, algo que necesita horas de trabajo docente asignadas y el visto bueno de las autoridades, para reemplazar protocolos viejos que se mantienen solo por costumbre. La segunda es capacitar todo el tiempo al personal de laboratorio, tanto analistas como personal de apoyo, en microescala, instrumentos especializados y formas de purificar disolventes, para que las nuevas formas de trabajar se hagan siempre igual, se puedan repetir,

y sean seguras. La tercera es llevar un registro y medir cuánto residuo se ha logrado evitar, porque ese dato es clave para saber si las reformas funcionan de verdad, justificar que el programa siga, y decidir qué medidas priorizar porque son las que mejor están funcionando. Medir y anotar todo el tiempo cuánto residuo se evita convierte la gestión de residuos en una herramienta de enseñanza muy valiosa, porque le muestra a los estudiantes que cuidar el ambiente y la seguridad laboral no son solo teoría, son números reales que salen de buenas decisiones técnicas al diseñar los experimentos.

5.4 Experiencia 4. Colombia: evaluación de riesgos y química verde aplicadas a los residuos de laboratorios universitarios

Esta experiencia viene de América Latina, así que es muy fácil de aplicar en el sistema universitario ecuatoriano. Un equipo de varios investigadores organizó, dentro de una universidad colombiana, cómo unir la evaluación formal de riesgos con los principios de la Química Verde, aplicándolos directamente a los efluentes y desechos de laboratorios de análisis e investigación. El objetivo del proyecto fue caracterizar química y físicamente, y ordenar por toxicidad, las cargas contaminantes, para bajar el peligro con la sustitución de insumos y la prevención desde el origen (Murcia et al., 2023). Esta intervención es valiosa porque junta dos ideas centrales de este manual, evaluar riesgos por adelantado y gestionar bien los desechos peligrosos. Y esto pasa en una infraestructura con las mismas limitaciones de presupuesto y equipo que suelen tener las universidades del Ecuador. Además, usa herramientas que no necesitan plataformas avanzadas ni bases de datos

toxicológicas muy complicadas, sino métodos ordenados, estandarizados y fáciles de adaptar a la realidad local.

El contexto de las universidades latinoamericanas pone límites, y la experiencia colombiana lo muestra con claridad. Las universidades de la región suelen tener presupuestos ajustados, poca capacidad técnica para vigilar el ambiente todo el tiempo, y una cultura de seguridad industrial y salud laboral que todavía se está construyendo. Por eso no tiene sentido copiar directamente los modelos de países desarrollados que tienen más recursos. Las investigaciones sobre percepción del riesgo en estudiantes de química en la región muestran vacíos y confusiones importantes, y por eso urge usar métodos accesibles tanto para evaluar como para enseñar (Álvarez-Chávez et al., 2019). Ante esto, usar métodos cualitativos y semicuantitativos de evaluación de riesgos resulta lo más adecuado, porque sirve para decidir qué controles usar primero, incluso cuando falta información completa sobre las dosis de exposición o los datos toxicológicos (Álvarez-Chávez et al., 2019).

5.4.1 Descripción del método implementado

El método combinó dos partes que trabajan juntas (Tabla 10). La primera fue evaluar de forma ordenada el riesgo de las corrientes de desecho, es decir, caracterizar química y físicamente las muestras, calcular qué tan peligrosas son, y ordenar los efluentes según su riesgo, con el objetivo de poner los recursos y esfuerzos en las corrientes más peligrosas para la salud y el ambiente (Murcia et al., 2023). Para hacer esto con pocos recursos analíticos, la literatura respalda usar métodos cualitativos avanzados, sobre todo la técnica de bandas de control

(Control Banding). Esta herramienta clasifica los reactivos e insumos en bandas de peligro estandarizadas, según frases de riesgo y datos toxicológicos básicos, y cada banda se conecta automáticamente con un nivel de contención e ingeniería, lo que permite tomar medidas preventivas efectivas aunque no haya Monitoreo Ocupacional ni Valores Límite Umbral (TLVs) definidos (Zalk & Nelson, 2008). A esto se sumaron herramientas hechas específicamente para clasificar peligros en laboratorios universitarios, que ordenan y estandarizan cómo identificar, analizar y valorar el riesgo en la investigación y la docencia (Marendaz et al., 2013).

La segunda parte fue aplicar en la práctica los principios de la Química Verde, para bajar el peligro de los efluentes desde el diseño mismo. Cambiando insumos sintéticos y usando otros métodos de síntesis o análisis con menos toxicidad ambiental, se logró que los desechos fueran mucho menos dañinos, lo que simplificó bastante los pasos de neutralización, acopio y tratamiento final (Murcia et al., 2023). Juntar la evaluación de riesgos con la Química Verde funciona bien porque el diagnóstico identifica dónde está el mayor peligro y la mayor exposición, y la Química Verde da las soluciones para reducir o eliminar eso desde el origen, cerrando el círculo entre diagnóstico y solución. En el fondo, este método le da vida práctica al primer principio de la Química Verde, que dice que prevenir es siempre mejor que remediar después, y ofrece un protocolo que se puede usar en laboratorios con pocos recursos (Anastas & Warner, 1998).

5.4.2 Análisis en tres niveles

En lo técnico, la intervención se apoyó en caracterizar bien los desechos y en cambiar de forma dirigida los precursores más peligrosos, bajando así la toxicidad de los efluentes. Ahí, las bandas de control dieron un criterio objetivo para asignar medidas de ingeniería según el nivel de amenaza, sin necesitar instrumentos de monitoreo ambiental avanzados (Zalk & Nelson, 2008). En lo procedimental, el sistema se afirmó con un protocolo que incluyó caracterizar, evaluar, calcular y ordenar los riesgos, junto con guías escritas para sustituir sustancias, esto convirtió la gestión de desechos en algo estandarizado, con trazabilidad y auditable, dejando atrás la improvisación. Dentro de esto, clasificar y etiquetar según el Sistema Globalmente Armonizado (SGA) es indispensable, porque identificar bien el peligro es el paso que va antes de evaluar, manejar y separar según qué no se debe mezclar (United Nations, 2017; Karapantsios et al., 2008). En lo organizacional, aplicar este modelo exigió que las autoridades universitarias se comprometieran a revisar los métodos de laboratorio que ya se usaban, definir con claridad quién es responsable de qué para clasificar y dar seguimiento a los desechos, y cambiar la cultura de la institución para priorizar reducir y cambiar insumos, en vez de solo pagar gestores ambientales para que se los lleven.

Tabla 10. Articulación entre evaluación de riesgos y química verde en la gestión de residuos

Etapa	***Adaptación metodológica***	***Herramienta o principio de apoyo***
Caracterización	*Identificar y clasificar los residuos según su composición y peligrosidad*	*Clasificación y etiquetado conforme al Sistema Globalmente Armonizado*
Valoración del riesgo	*Asignar niveles de riesgo con métodos cualitativos y semicuantitativos*	*Banda de control; herramientas sistemáticas de evaluación de peligros*
Jerarquización	*Priorizar los flujos de residuos de mayor riesgo para la intervención*	*Matriz de riesgo; criterios de probabilidad y severidad*
Sustitución en la fuente	*Reemplazar reactivos y procesos por alternativas menos peligrosas*	*Principios de química verde (prevención en la fuente)*
Verificación	*Comprobar la reducción de peligrosidad y ajustar las medidas de control*	*Indicadores de residuo evitado y de peligrosidad*

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Resultados y evidencia

Los resultados permitieron caracterizar bien las corrientes de residuos de la universidad y encontrar alternativas de sustitución que bajaron el peligro general de las mezclas generadas. Esto confirmó que sí es posible unir la evaluación de riesgos con los principios de la Química Verge en la educación superior de América Latina (Murcia et al., 2023). La conclusión técnica principal es de método, gestionar bien y con rigor el riesgo de los residuos de laboratorio no exige necesariamente

infraestructura analítica compleja, exige un protocolo de evaluación bien pensado, herramientas cualitativas adaptadas a los datos que sí se tienen, y una política institucional para sustituir desde el origen. Esto es muy útil para instituciones que ven la seguridad química y el control ambiental como algo imposible por falta de presupuesto, porque muestra que el orden y el rigor en el método pueden compensar la falta de tecnología avanzada. El valor de esta intervención está en lo fácil que es de copiar y de aplicar en otro lugar.

5.4.4 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas

De todos los casos estudiados en este capítulo, este modelo es el más fácil de aplicar directamente en Ecuador, porque el contexto social, la escala de trabajo y el presupuesto disponible son muy parecidos. Juntar la evaluación cualitativa de riesgos, usando bandas de control, con cambiar primero los insumos según la Química Verde, es un camino que sí se puede seguir y que es realista para las universidades ecuatorianas que quieran subir sus estándares de seguridad química y de cuidado ambiental sin gastar más de lo que pueden. Para Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Machala, tener un protocolo con reglas claras para clasificar, ordenar y evaluar los riesgos de los residuos, usando herramientas cualitativas, y cambiar poco a poco los insumos más peligrosos, encaja bien con sus objetivos académicos e institucionales. Esta estrategia también encaja con el Código Orgánico del Ambiente y las normas técnicas de Ecuador, lo que asegura que el sistema funcione y dure en el tiempo (República del Ecuador, 2017).

Aplicar este método con éxito depende de tres condiciones. La primera es capacitar al personal docente, de laboratorio y de gestión ambiental en la teoría y la práctica de los métodos cualitativos y semicuantitativos de evaluación de riesgos, para usar las herramientas con rigor. La segunda es sistematizar cómo se caracterizan los desechos, con bitácoras y registros que permitan ordenar los efluentes de forma continua y dar seguimiento a las sustituciones que se hagan. Y la tercera es conectar el diagnóstico de riesgos con la compra de reactivos y con el diseño de los experimentos, para que lo que se descubra sobre peligrosidad de verdad influya en qué se compra y cómo se planean las clases. Con esta mirada completa, la experiencia colombiana muestra que la evaluación de riesgos y la Química Verde no son cosas separadas, son piezas de un mismo plan de prevención, muy útil para las universidades públicas de la región (Murcia et al., 2023).

5.5 Experiencia 5. Irán: implementación sistemática de evaluación de riesgos de salud, seguridad y ambiente (HSE) como serie de casos

Esta experiencia viene de Oriente Medio y toca un reto muy importante para cualquier laboratorio, pasar de evaluar riesgos de vez en cuando y sin orden, a tener un sistema fijo, ordenado y bien establecido. Con un estudio de varios casos, se documentó cómo se puso en marcha un sistema de evaluación de riesgos en Salud, Seguridad y Medio Ambiente (HSE) en un grupo de laboratorios de análisis en Irán. Ese sistema usó un protocolo estándar para identificar peligros, calcular qué tan grave era el riesgo, y decidir en orden qué medidas técnicas y administrativas tomar primero (Fatemi et al., 2022). Este caso es clave para el manual

porque muestra cómo evaluar riesgos por adelantado, y da un modelo fácil de copiar para universidades que quieren tener reglas de seguridad más claras, ordenadas y formales.

El problema que se estudia aquí está muy respaldado por la ciencia. Varias investigaciones sobre cómo el personal de laboratorio percibe, conoce y actúa frente al riesgo muestran algo que se repite mucho, identificar el peligro en teoría no es lo mismo que de verdad usar métodos formales de evaluación o controles de ingeniería (Papadopoli et al., 2020). De la misma forma, estudios sobre la cultura de seguridad química en universidades confirman que solo saber que algo es peligroso no hace que la gente actúe con seguridad ni use bien las protecciones (Al-Zyoud et al., 2019). Ese es justo el problema que busca arreglar tener un sistema de evaluación bien establecido. Con un procedimiento obligatorio y ordenado, la seguridad deja de depender del ánimo o la costumbre de cada investigador, y pasa a ser parte fija del trabajo diario, algo que se puede revisar en cualquier momento.

5.5.1 Descripción del método implementado

El método consistió en aplicar, en varios laboratorios distintos, un protocolo completo de evaluación de riesgos HSE. Este protocolo tuvo pasos ordenados, identificar los peligros, medir qué tan grave era cada riesgo, y poner medidas de control según cada caso (Fatemi et al., 2022). Trabajar con varios laboratorios a la vez permitió comparar los niveles de riesgo entre lugares muy distintos, encontrar patrones que se repetían, y comprobar que el protocolo funcionaba bien aunque las condiciones de trabajo fueran diferentes (Tabla 11). Este método se apoya en

herramientas cualitativas sólidas, muy útiles cuando no hay mediciones ambientales constantes. Ahí, la técnica de bandas de control (Control Banding) sirve mucho, porque da controles de ingeniería y medidas administrativas según el tipo de reactivo, sin necesitar estudios complicados de higiene industrial ni monitoreo ambiental (Zalk & Nelson, 2008). A esto se sumaron herramientas hechas justo para clasificar peligros en laboratorios universitarios, que ayudan a ordenar los riesgos en espacios de investigación y de clases (Marendaz et al., 2013).

Lo más nuevo de esta experiencia es que el proceso de evaluación se volvió parte oficial de la institución. Antes, la seguridad se veía como algo que cada persona manejaba por su cuenta y de forma ocasional. Ahora, evaluar riesgos en varios casos a la vez convierte esto en un estándar parejo para toda la institución, fácil de revisar desde la dirección. Pasar de evaluaciones sueltas e individuales a un sistema institucional conectado va de la mano con lo que muestran los estudios, procesar de forma ordenada los datos de riesgos y accidentes pasados sube el nivel de seguridad y ayuda a decidir mejor en qué capacitar primero (Simmons et al., 2017). Esto también encaja con las buenas prácticas internacionales de revisar seguido los programas de seguridad académica, para encontrar fallas a tiempo y decidir mejor dónde invertir para corregirlas (Foster, 2004).

5.5.2 Análisis en tres niveles

En lo técnico, la intervención usó esquemas ya establecidos para identificar peligros y asignar controles según qué tan grave era el riesgo, apoyándose en métodos cualitativos como el Control Banding, que funcionan muy bien cuando hay poca información sobre la exposición (Zalk & Nelson, 2008). En lo procedimental, lo clave fue hacer siempre igual los pasos de evaluar, identificar, medir, ordenar y controlar, y usar el mismo formato en todos los laboratorios. Esto dio resultados que se podían comparar entre sí, y convirtió evaluar riesgos en algo que se hace siempre, no solo de vez en cuando. En lo organizacional, este modelo necesitó que las autoridades de la universidad se comprometieran de verdad a poner reglas para evaluar riesgos, decir con claridad quién es responsable de qué, y darle seguimiento a que las correcciones se hicieran de verdad. Esto implicó cambiar la cultura para que evaluar el riesgo se viera como parte normal del trabajo, y no como puro papeleo. Además, usar indicadores que se adelantan al problema, como cuántos laboratorios ya fueron revisados y cuántas medidas de ingeniería se instalaron de verdad, ayudó a controlar mejor la seguridad antes de que pasara algo (Hinze et al., 2013).

Tabla 11. Fases de la implementación sistemática de la evaluación de riesgos HSE

Fase	***Contenido***	***Producto e indicador asociado***
Identificación de peligros	*Reconocimiento de los peligros químicos, físicos y ambientales de cada laboratorio*	*Inventario de peligros; número de laboratorios diagnosticados*
Valoración del riesgo	*Asignación del nivel de riesgo con métodos cualitativos o semicuantitativos*	*Matriz de riesgo; distribución de niveles de riesgo*
Determinación de controles	*Selección de medidas de control proporcionales al nivel de riesgo*	*Plan de control; medidas asignadas por banda de riesgo*
Aplicación homogénea (serie de casos)	*Ejecución del procedimiento en múltiples laboratorios de forma estandarizada*	*Cobertura del programa; comparabilidad entre entornos*
Seguimiento y evaluación	*Verificación de la implementación y revisión periódica del programa*	*Indicadores líderes, brechas identificadas para la mejora*

Fuente: Elaboración propia.

5.5.3 Resultados y evidencia

La investigación confirmó que sí se puede aplicar, en varios laboratorios a la vez, un protocolo ordenado de evaluación de riesgos HSE que clasifique qué tan grave es cada caso y guíe las correcciones necesarias, incluso en lugares con condiciones muy distintas (Fatemi et al., 2022). El resultado técnico más importante de este caso está en lo procedimental y en lo cultural, muestra con hechos que evaluar riesgos

sí se puede volver una práctica fija, ordenada y revisable, cerrando la brecha entre saber que algo es peligroso y de verdad controlarlo, algo que la ciencia ya había señalado como un problema (Papadopoli et al., 2020; Al-Zyoud et al., 2019). Al hacer que identificar y controlar peligros sea un proceso manejado por la institución, y no algo que cada quien resuelve por su cuenta, esta experiencia da un modelo que otras universidades pueden copiar directamente. Su gran valor está en lo clara que es su forma de trabajar, y en lo fácil que resulta repetirla en otro lugar.

5.5.4 Lecciones transferibles y relevancia para las universidades ecuatorianas

Para las universidades públicas del Ecuador, esta experiencia deja algo muy útil, evaluar riesgos funciona mejor cuando es un procedimiento obligatorio para todos, y no algo que cada jefe de laboratorio decide hacer o no según le parezca. En el caso concreto de Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Machala, tener un sistema ordenado de evaluación de riesgos HSE, con pasos claros de identificar, medir y controlar peligros, apoyado en herramientas fáciles como el Control Banding, es una estrategia posible, que no cuesta demasiado y que enseña mucho. Aplicarlo tanto en los laboratorios de clases como en los de investigación permitiría además ir generando datos útiles para controlar el riesgo antes de que se vuelva un problema.

Aplicar este método en el entorno universitario local depende de tres cosas. La primera es crear y aprobar un formato único y obligatorio para evaluar riesgos, que sea igual para todos, así los datos se pueden

comparar entre distintas áreas. La segunda es capacitar bien al personal técnico y académico para que use el procedimiento y las herramientas cualitativas de forma correcta y justa. La tercera es tener un sistema de revisión constante, para comprobar que los controles sí se instalan y que los programas de seguridad se actualizan seguido, para que evaluar el riesgo no se quede solo en el papel. Con estas tres condiciones, la experiencia de Irán confirma algo importante, cerrar la brecha entre identificar el riesgo y de verdad controlarlo es, sobre todo, un reto de organización y de cultura, algo que cualquier universidad comprometida puede lograr (Fatemi et al., 2022).

5.5.5 Síntesis Comparativa y Lecciones Transversales de las Experiencias Históricas Analizadas

Al mirar juntos los cinco casos de este capítulo, queda claro que no hay una sola receta para almacenar bien, manipular con seguridad y tener buenas prácticas de laboratorio. Lo que sí se repite, con distintos matices según cada país, es un grupo de principios que funcionan en instituciones con recursos y niveles de desarrollo muy diferentes. El primer principio es que el liderazgo de las autoridades y la responsabilidad de todos deben ir juntos. El modelo de Estados Unidos mostró que cambiar de verdad la cultura de seguridad necesita, al mismo tiempo, autoridad y presupuesto desde arriba, y que estudiantes e investigadores sientan el riesgo como algo propio en el día a día, las órdenes desde arriba solas, o los esfuerzos aislados solos, no funcionan bien (Gibson et al., 2014; Wang et al., 2019). Cuando las dos cosas se juntan, cambia el ambiente de seguridad de la institución, y eso está muy relacionado con menos accidentes y con más conductas seguras (Wu et

al., 2007; Liu et al., 2023), confirmando que la parte humana y organizativa pesa tanto como los controles técnicos (National Research Council, 2014).

El segundo principio que se repite es poner primero la prevención desde el origen. Las experiencias de España, Singapur y Colombia coinciden en algo, la forma más eficiente, tanto para el ambiente como para el bolsillo, de bajar el riesgo químico es reducir desde el inicio la cantidad y la peligrosidad de las sustancias, comprando solo lo necesario, cambiando reactivos muy tóxicos por otros menos dañinos, usando microescala, y reciclando lo que se pueda (Gutierrez et al., 2020; Goh et al., 2020; Murcia et al., 2023). Apoyado en la Química Verde, este principio cambia la forma clásica de ver la seguridad, que se enfocaba en contener peligros que ya existían, por una forma que evita que el peligro aparezca desde el diseño mismo del experimento. Esto es muy valioso en universidades con poco presupuesto, porque la medida más barata suele ser también la más sostenible con el ambiente y la que menos cuesta mantener con el tiempo.

El tercer principio es hacer del diagnóstico de riesgos algo fijo y oficial, usando métodos que no necesitan mucho equipo. Los datos de Colombia e Irán confirman que evaluar riesgos funciona mejor cuando deja de ser algo suelto y ocasional, y se convierte en un procedimiento estándar, igual para todos y fácil de revisar. Este sistema usa métodos cualitativos y semicuantitativos, como las bandas de control (Control Banding), que no necesitan instrumentos complicados de monitoreo (Murcia et al., 2023; Fatemi et al., 2022; Zalk & Nelson, 2008). Aplicar esto ayuda a cerrar la brecha, ya vista en la ciencia, entre saber que algo es peligroso

y de verdad hacer algo al respecto (Papadopoli et al., 2020; Al-Zyoud et al., 2019), y muestra que tener un método ordenado puede compensar la falta de tecnología avanzada.

El cuarto principio, presente en los cinco casos, es mirar hacia adelante con indicadores de proceso y mejorar todo el tiempo. Las instituciones estudiadas no esperaron a que pasaran accidentes para actuar, sino que midieron cosas que anticipan el resultado, cuánto personal se capacitó, cuántos laboratorios fueron revisados, cuántos reactivos vencidos se eliminaron, cuánto residuo se evitó, y cuántos cambios de sustancias se hicieron. Juntar estos datos todo el tiempo ayudó a mejorar los programas de seguridad cada cierto tiempo (Hinze et al., 2013; Simmons et al., 2017; Foster, 2004). El quinto principio es que la seguridad laboral, el cuidado del ambiente y la formación de los estudiantes van de la mano. Cuidar la salud de las personas también reduce el daño al ambiente y baja los costos de la institución. Este efecto se hace más fuerte cuando la seguridad se enseña como parte normal de las materias y de la ética de la investigación (Tang, 2025; Hill & Finster, 2017). Todo esto encaja bien con las ciencias ambientales, que no solo cuidan la salud de las personas, sino también los ecosistemas. La Tabla 12 resume cómo se hizo cada caso, qué resultados dio, y qué se puede aplicar en las universidades de Ecuador.

Tabla 12. Síntesis comparativa de las cinco experiencias y sus lecciones transferibles

Experiencia	***Método implementado***	***Resultado principal***	***Lección transferible al Ecuador***
1. Estados Unidos	*Liderazgo distribuido y rediseño institucional de la seguridad*	*Mayor participación en capacitación e institucionalización de la seguridad*	*Crear comités de seguridad de estudiantes y docentes con respaldo de las autoridades, aun sin gran inversión*
2. España	*Compra responsable y laboratorio de química verde*	*Inventarios más pequeños, menos peligrosos y más sostenibles*	*Racionalizar compras y depurar inventarios: máxima seguridad con costo mínimo*
3. Singapur	*Microescala, sustitución y recuperación en la docencia*	*Reducción significativa del residuo generado en la enseñanza*	*Adoptar la microescala y rediseñar prácticas con muchos estudiantes*
4. Colombia	*Evaluación de riesgos y química verde aplicadas a residuos*	*Jerarquización de residuos y sustitución en la fuente*	*Usar métodos cualitativos de riesgo y sustituir reactivos peligrosos; máxima afinidad de contexto*
5. Irán	*Evaluación de riesgos HSE sistemática (serie de casos)*	*Institucionalización de la evaluación de riesgos*	*Adoptar un formato único y sistemático de evaluación para todos los laboratorios*

Fuente: Elaboración propia.

5.5.6 Hoja de ruta para las universidades públicas ecuatorianas

Con todo lo aprendido de otros países, se puede armar un plan por etapas, ajustado a lo que cada universidad ya tiene, y siguiendo el Código Orgánico del Ambiente y las normas técnicas de Ecuador (República del Ecuador, 2017; Gobierno de la República del Ecuador, 2021). La idea no es copiar tal cual lo que se hizo afuera, sino tomar sus ideas principales y empezar por las medidas que cuestan poco y bajan mucho el riesgo. El plan propuesto tiene tres etapas, con varias fases dentro de cada una (Tabla 13).

Tabla 13. Modelo de implementación de estrategias basado en fases

Fase	**Enfoque principal**	**Descripción**
Fase I: Fundamentos y Prevención Inicial	Intervenciones inmediatas de reorganización operativa y minimización en el origen	Focalizada en intervenciones inmediatas de reorganización operativa y minimización en el origen sin requerimiento de erogaciones presupuestarias de significación.
Fase II: Evaluación Sistémica y Corresponsabilidad	Usar siempre el mismo método para analizar riesgos, y formar comités de seguridad sólidos y permanentes	Busca que se use siempre el mismo método para analizar riesgos, y que se formen comités de seguridad donde participen por igual distintos grupos de la comunidad universitaria.

Fase	Enfoque principal	Descripción
Fase III: Consolidación, Indicadores y Soporte Tecnológico	Evaluación periódica del sistema e integración progresiva de herramientas digitales	Se enfoca en revisar el sistema cada cierto tiempo, usando datos que muestran qué tan bien está funcionando, y en ir metiendo poco a poco herramientas digitales para manejar los inventarios y vigilar las condiciones del laboratorio.

Fuente: Elaboración propia.

En la Fase I (Fundamentos y Prevención Inicial), el plan de trabajo incluye estas acciones clave.

a) Revisar por completo los inventarios, que quiere decir comparar lo que hay físicamente y sacar de forma segura las sustancias vencidas, viejas o que ya no se sabe bien de dónde vienen, en los depósitos de la institución.

b) Tener una política de compra sostenible, que quiere decir comprar solo las cantidades mínimas necesarias y elegir reactivos que sean menos peligrosos.

c) Cambiar técnicamente los reactivos, que quiere decir reemplazar disolventes y reactivos críticos usando tablas y guías internacionales para elegir mejor.

d) Trabajar a menor escala (downscaling), que quiere decir usar microescala en las guías de laboratorio de las materias con muchos estudiantes de ciencias básicas.

e) Separar según qué no se debe mezclar, que quiere decir reorganizar el almacenamiento siguiendo la tabla de incompatibilidades químicas explicada en capítulos anteriores de este manual.

Durante la Fase II (Evaluación Sistémica y Corresponsabilidad), se plantean estas acciones.

a) Usar siempre el mismo formato de diagnóstico, que quiere decir aprobar y aplicar un solo protocolo de evaluación de riesgos basado en Control Banding, para todas las áreas de docencia e investigación.
b) Formar comités de seguridad con representación pareja, que quiere decir armar comités de gestión con personal académico, técnico y estudiantes, con funciones claras, revisiones cruzadas entre ellos, y turnos definidos.
c) Sensibilizar antes de empezar a trabajar, que quiere decir hacer charlas cortas de seguridad (safety moments) al inicio de cada práctica, para revisar rápido las fichas de datos de seguridad (FDS).
d) La ejecución de la Fase III (Consolidación, Indicadores y Soporte Tecnológico) se estructura mediante los siguientes componentes.
e) Gestión por Indicadores Prospectivos: Control del sistema mediante el seguimiento de métricas de desempeño (cobertura de

evaluaciones, tasa de inventarios saneados, masa efluente evitada y horas de capacitación acumuladas).

f) Auditoría y Revisión Sistémica: Evaluaciones periódicas para el ajuste de los programas de seguridad y la actualización de los protocolos de trabajo.

g) Pedagogía de la Minimización: Cuantificación y documentación de los volúmenes de residuos evitados como elemento de aprendizaje sobre el impacto ambiental en el trabajo analítico.

h) Digitalización Progresiva: Adopción gradual de sistemas informáticos para el control de inventarios, registro de peligros y monitoreo de parámetros ambientales en las instalaciones.

i) Para garantizar la viabilidad y sostenibilidad de este itinerario, se requiere la presencia continua de cuatro condiciones habilitantes transversales.

j) Liderazgo Directivo: Compromiso explícito de la alta dirección universitaria reflejado en asignación de recursos y respaldo normativo.

k) Capacitación Técnica Continuada: Programas permanentes de actualización para docentes y personal técnico en gestión de riesgos y química sostenible.

l) Integración Curricular: Articulación de la seguridad industrial y la ecotoxicología dentro de los planes de estudio y protocolos de ética científica.

m) Cooperación Interinstitucional: Alianzas estratégicas universitarias para la transferencia de metodologías y el intercambio de experiencias operativas.

Las experiencias de otros países muestran que trabajar juntos entre instituciones ayuda mucho a lograr cambios grandes. En Estados Unidos, mejorar el sistema de laboratorios necesitó crear un centro especializado de gran alcance, y expandir la Química Verde y el Control Banding fue posible porque grupos de universidades compartieron abiertamente lo que iban aprendiendo (Gibson et al., 2014; Zalk & Nelson, 2008). Para las universidades públicas del Ecuador, unirse a redes regionales de seguridad química es una decisión muy inteligente. Estas redes dejan compartir guías, formatos para evaluar el riesgo, criterios de compra, y manuales de microescala, ahorrando esfuerzo y aprendiendo más rápido. Trabajar en conjunto convierte la falta de recursos de cada universidad por separado en una fuerza compartida entre todas, y es el camino más sostenible para ir subiendo poco a poco los estándares de seguridad química y de cuidado ambiental en las carreras de ciencias ambientales del país.

La hoja de ruta propuesta confirma la idea central de todo este capítulo, para las universidades del Ecuador, y en especial para programas como Ingeniería Ambiental de la Universidad Técnica de Machala, tener un sistema de seguridad química sólido y sostenible no depende de tener mucho dinero, depende de la organización, de la cultura de prevención y del rigor en cómo se hacen las cosas. Las experiencias internacionales muestran que trabajar en conjunto entre instituciones y construir capacidades propias poco a poco son estrategias muy valiosas para superar las limitaciones, y que adaptar las buenas prácticas a la realidad local, en vez de copiarlas sin pensar, es lo que de verdad decide si una

estrategia de manejo de riesgos químicos funciona en los laboratorios de investigación y de clases.

CAPÍTULO VI

6 CASOS DE ESTUDIO Y PROGRAMAS DE SEGURIDAD

Para entender bien los casos de seguridad química de este capítulo, se mira cada uno desde tres ángulos que se complementan.

- Nivel técnico: Analiza los elementos materiales del evento, como el estado de los equipos, los reactivos involucrados y el entorno físico del laboratorio al momento del suceso.
- Nivel procedimental: Revisa la parte operativa diaria, enfocándose en la claridad de los protocolos aplicados y la formación previa del personal.
- Nivel organizacional: Mira toda la institución, viendo si tener suficientes recursos, una cadena de mando clara, y una buena cultura de seguridad en la entidad ayudaron a evitar el problema o, al contrario, dejaron que pasara.

Al juntar estos tres ángulos, este método permite llegar a la causa de fondo de lo que pasó. Así se puede saber con precisión qué barrera de prevención falló, y desde ahí diseñar soluciones que arreglen tanto el problema inmediato como las fallas de fondo que había detrás.

6.1 Caso 1. Incidente por almacenamiento inadecuado de peróxidos orgánicos

En una universidad muy enfocada en investigación pasó una explosión pequeña en el área de química orgánica. El problema empezó porque se formaron cristales de peróxidos dentro de un frasco de éter dietílico que

llevaba guardado más de un año, sin las revisiones periódicas que hubieran detectado el peligro a tiempo. Por suerte nadie salió gravemente herido, pero los daños en las instalaciones fueron grandes y los proyectos de investigación se detuvieron por completo durante varias semanas. Al reconstruir lo que pasó, salieron a la luz varias fallas conectadas entre sí, que muestran lo complicada que puede ser la seguridad en una universidad. Acumular peróxidos orgánicos sin darse cuenta es uno de los peligros más engañosos en este tipo de laboratorios, sobre todo cuando no hay un control cuidadoso y actualizado del inventario de reactivos (Mirafzal & Baumgarten, 1988).

Entre las causas técnicas del incidente estuvieron no tener un programa para revisar sustancias que forman peróxidos, no poner etiquetas con fecha de apertura ni de vencimiento, guardar el frasco mucho tiempo sin revisarlo, y la concentración de peróxidos que fue subiendo poco a poco por la evaporación del solvente. En lo procedimental, los protocolos de inventario eran claramente débiles, no había pasos específicos para manejar formadores de peróxidos, no se rotaban las existencias de forma ordenada, y casi no se enseñaba sobre los riesgos particulares de este tipo de sustancias. En lo organizacional faltó presupuesto para reponer solventes seguido, no había personal dedicado a manejar el inventario químico, la comunicación entre los grupos de investigación era mala, y no se hacían auditorías regulares de seguridad química. Corregir esto después del accidente exigió mirar tanto lo técnico inmediato como las causas de fondo, de hecho, las universidades que ya han puesto en marcha buenos programas de gestión de peróxidos reportan muchos menos incidentes de este tipo (R. Hill & Finster, 2017).

Entre las medidas técnicas que varias universidades han puesto en marcha para evitar que esto vuelva a pasar están crear un protocolo específico para sustancias que forman peróxidos, con revisiones mensuales programadas, poner un sistema de etiquetado con colores según la fecha, comprar kits para detectar peróxidos en los solventes, y fijar cuánto se puede guardar como máximo por laboratorio. En lo procedimental, se armó una base de datos central de inventario químico con alertas automáticas, se creó una capacitación específica sobre peróxidos orgánicos, se pusieron reglas de comunicación para cuando cambia el personal, y se empezaron a hacer auditorías de seguridad química cada tres meses. En lo organizacional, se nombró un coordinador de seguridad química por cada departamento, se asignó presupuesto propio para manejar residuos peligrosos, se escribió una política institucional sobre químicos vencidos, y se creó un comité de seguridad química con gente de distintas áreas.

6.1.2 Caso 2. Exposición a vapores de mercurio en un laboratorio de análisis

Un estudiante de posgrado que trabajaba en un proyecto de espectrometría de absorción atómica empezó a mostrar síntomas de intoxicación por mercurio después de varias semanas trabajando con ese metal en un laboratorio con mala ventilación. Tenía temblores, se irritaba fácilmente y le costaba concentrarse, así que necesitó una evaluación médica especializada y seguimiento por bastante tiempo. La investigación posterior encontró niveles de vapor de mercurio mucho más altos de lo permitido para el trabajo. El mercurio en su forma elemental ya es difícil de manejar por sí solo, porque se evapora

fácilmente a temperatura ambiente y sus gotitas se dispersan rápido por todo el espacio de trabajo (Bernhoft, 2012). Entre las causas de la exposición estuvieron un sistema de ventilación malo, con poco flujo de aire, una forma de manipular el mercurio que dejó pequeños derrames sin ver, no revisar el ambiente de forma rutinaria para detectar mercurio, no tener equipo de protección específico para sus vapores, y una exposición que duró varias semanas seguidas. El seguimiento médico incluyó medir el mercurio en sangre y en orina, revisar el sistema nervioso, hacer un monitoreo médico a largo plazo, y revisar a otros estudiantes e investigadores que pudieron estar expuestos también. Al revisar todo el caso, se encontraron varias fallas en los sistemas de protección que, en condiciones normales, debían haber evitado una exposicón tan grande.

En los equipos y controles de ingeniería, faltaban campanas específicas para captar vapores de mercurio, no había vigilancia continua de la calidad del aire, y las superficies de trabajo no estaban preparadas para contener un derrame. En los controles administrativos, los protocolos para manejar mercurio eran malos, se enseñaba poco sobre sus efectos tóxicos, no había un programa de vigilancia médica para el personal expuesto, y faltaban procedimientos para actuar ante un derrame de emergencia. Responder a este incidente necesitó tanto acciones inmediatas para cuidar la salud del estudiante como cambios de fondo para evitar que se repitiera. La evidencia sobre buenas prácticas con mercurio en laboratorios deja claro que hacen falta controles técnicos sólidos junto con protocolos de trabajo muy rigurosos.

6.1.3 Caso 3. Reacción exotérmica no controlada en síntesis orgánica

Durante un proyecto de investigación sobre síntesis de productos naturales, una reacción de hidrogenación catalítica subió de temperatura de golpe, rompió el sistema de vidrio y liberó vapores inflamables al ambiente del laboratorio. Los protocolos de emergencia funcionaron bien, pero el incidente mostró debilidades en cómo se escalaban las reacciones químicas. Las reacciones exotérmicas son de hecho uno de los riesgos más grandes en un laboratorio de síntesis orgánica, sobre todo cuando se pasa de las cantidades pequeñas de investigación a cantidades más grandes. Controlar la temperatura en reacciones catalíticas es especialmente difícil, por la forma en que estos sistemas se comportan (Stoessel, 2008).

Entre las causas técnicas de este incidente estuvieron subir la reacción de 5 a 50 mmol sin ajustar bien las condiciones de trabajo, un sistema de enfriamiento que no alcanzó para la carga de calor generada, una agitación mala que dejó puntos muy calientes dentro del recipiente, agregar un reactivo demasiado rápido lo que provocó una reacción violenta, y no vigilar la temperatura de forma continua mientras avanzaba la reacción. El análisis que se hizo después incluyó medir el calor de la reacción con calorimetría diferencial de barrido, ver qué tan rápido se liberaba calor en distintas condiciones, encontrar a qué temperatura la reacción se dispara sin control, y estudiar qué productos salían al descomponerse por el calor (Kletz, 2001; Stoessel, 2008).

El análisis después del incidente mostró que los sistemas de respuesta a emergencias funcionaron bien, pero los sistemas de prevención tenían fallas importantes que había que corregir. Esto confirma que los

principios de diseño seguro de procesos químicos sí se pueden aplicar en el laboratorio, para evitar reacciones exotérmicas fuera de control. Tener protocolos seguros para escalar reacciones exige pensar en varios factores que a pequeña escala casi no importan, pero que se vuelven muy importantes cuando la cantidad de reactivo sube.

6.2 Sistemas de Monitoreo Inteligente

Sistemas de monitoreo inteligente. Los avances en sensores y sistemas de monitoreo están cambiando mucho la forma de detectar y responder a los riesgos químicos en tiempo real. Los sistemas más modernos combinan varias formas de detección con programas de análisis avanzados, capaces de avisar temprano y de dar instrucciones específicas según el tipo de emergencia. Las redes de sensores inalámbricos permiten vigilar de forma continua varios puntos del laboratorio a la vez. Entre lo que pueden hacer estos sistemas está detectar varios químicos al mismo tiempo, mandar los datos en tiempo real a un sistema central, y usar programas que buscan patrones raros para avisar temprano. También detectan cambios de temperatura y de humedad, y otros datos importantes para la seguridad, además de poder revisarse a sí mismos y anticipar cuándo necesitan mantenimiento.

Entre los usos más útiles de estos sistemas en las universidades están vigilar la calidad del aire de forma continua, detectar temprano fugas de gas o de químicos volátiles, comprobar que la ventilación funcione bien, guardar automáticamente los datos ambientales para cumplir con las normas, y avisar de inmediato cuando hay que evacuar, además de vigilar contaminantes con mucha precisión. Usar inteligencia artificial y

aprendizaje automático para analizar riesgos químicos permite además anticipar problemas, yendo más allá de simplemente avisar cuando se pasa un límite fijo. Estos sistemas pueden encontrar patrones complicados que anuncian riesgos nuevos y sugerir qué hacer para evitarlos.

6.3 Realidad Virtual y Aumentada

Realidad virtual y aumentada. Las tecnologías de realidad virtual y aumentada están transformando la manera tradicional de entrenar en seguridad química, al hacer posibles experiencias inmersivas y repetibles que resultarían peligrosas o simplemente poco prácticas de llevar a cabo con sustancias reales. Estas tecnologías abren oportunidades únicas para desarrollar competencias críticas dentro de entornos seguros y plenamente controlados. Las simulaciones de realidad virtual, en particular, permiten a estudiantes e investigadores practicar los procedimientos de respuesta ante emergencias químicas en escenarios que resultan realistas, sin quedar expuestos a un riesgo real. Este tipo de experiencias ofrece, además, la oportunidad de desarrollar habilidades para tomar decisiones bajo presión y de familiarizarse con el equipo y los procedimientos que corresponde usar en una emergencia (Abulrub et al., 2011).

Entre los escenarios de entrenamiento que se pueden recrear están la respuesta a derrames de distintos tipos de sustancias químicas, los procedimientos de evacuación y descontaminación, el uso apropiado del equipo de protección personal en situaciones de emergencia, la comunicación efectiva durante una crisis y la coordinación con los

servicios de emergencia, y la toma de decisiones críticas sobre cómo escalar la respuesta ante un incidente. Entre las ventajas pedagógicas de este tipo de entrenamiento están la posibilidad de repetir un procedimiento con seguridad hasta alcanzar un buen nivel de eficiencia, evaluar el desempeño de forma objetiva a través de métricas automatizadas, experimentar las consecuencias de una decisión equivocada sin correr un riesgo real, personalizar cada escenario según las necesidades específicas de aprendizaje, y reducir los costos que suele implicar el entrenamiento tradicional.

La realidad aumentada, por su parte, permite superponer información crítica directamente sobre el campo visual de la persona que está trabajando, dándole acceso inmediato a los datos relevantes sin necesidad de interrumpir su flujo de trabajo. Esta tecnología resulta especialmente valiosa para ofrecer guías paso a paso durante la ejecución de procedimientos complejos.

6.4 Evaluación de programas de seguridad

Se conoce como programa de seguridad química al sistema integral y estructurado de políticas, procedimientos, recursos y actividades diseñado para identificar, evaluar, controlar y gestionar los riesgos asociados al uso, manejo, almacenamiento y disposición de sustancias químicas dentro de un entorno específico, en particular en instituciones académicas y laboratorios de investigación. Para que resulte efectivo en el ámbito académico, un programa de este tipo debería incluir capacitación integral sobre seguridad de laboratorio, procedimientos operativos estándar aplicables a las actividades potencialmente

peligrosas, discusiones regulares sobre temas de seguridad durante las reuniones de grupo del laboratorio, e inspecciones rutinarias de seguridad (Abbas et al., 2016).

Para evaluar bien un programa de seguridad química hace falta un sistema de medición completo, que registre tanto los resultados concretos como las señales que anticipan cómo va a ir el desempeño futuro. Los mejores sistemas de medición combinan indicadores que miran hacia atrás, que muestran los resultados finales y qué tan bien ha funcionado el programa hasta ahora, con indicadores que miran hacia adelante, que registran las actividades y condiciones que anuncian cómo va a ser la seguridad más adelante. Estos últimos son los que permiten actuar antes de que pase un accidente, por eso son tan importantes para manejar bien los riesgos. Evaluar por completo un programa de seguridad química necesita entonces métodos que capturen tanto los números como los aspectos más cualitativos de su desempeño.

Las evaluaciones cualitativas aportan una comprensión más profunda de los factores que influyen en el desempeño de seguridad, incluso de aquellos que no resultan fáciles de cuantificar, y son particularmente valiosas para entender los aspectos culturales y organizacionales que rodean a la seguridad de un laboratorio. El análisis estadístico de tendencias, por su parte, incluye el análisis de series temporales para identificar cómo evolucionan la frecuencia y la severidad de los incidentes, comparaciones estadísticas entre distintos departamentos o facultades, análisis de correlación entre lo que se invierte en seguridad y los resultados de desempeño obtenidos, y proyecciones basadas en

modelos predictivos sobre el desempeño futuro (Glendon & Stanton, 2000).

6.5 Recomendaciones para la implementación de programas de manejo de sustancias

Las instituciones que están comenzando un programa de gestión de seguridad química pueden beneficiarse de un enfoque estructurado, capaz de ir construyendo capacidades de forma gradual mientras sienta bases sólidas para su desarrollo futuro. En una primera fase de preparación, que podría extenderse entre los meses 1 y 6, correspondería realizar una evaluación integral del estado actual de la seguridad química en la institución, establecer compromisos formales de liderazgo institucional (lo que implica designar personal dedicado, con la autoridad apropiada para dirigir el programa), desarrollar alianzas con instituciones más experimentadas que puedan ofrecer mentoría y asesoría, y asegurar los recursos financieros básicos necesarios para la fase inicial de implementación.

En una fase de implementación inicial, entre los meses 7 y 18, conviene comenzar por los laboratorios de mayor riesgo para maximizar el impacto desde el principio, implementar sistemas básicos de gestión de inventarios y de fichas de datos de seguridad, desarrollar capacidades internas de capacitación en seguridad química, establecer protocolos básicos de respuesta a emergencias, e iniciar los sistemas de documentación y de reporte de incidentes. Ya en una fase de expansión y consolidación, entre los meses 19 y 36, correspondería extender el programa de forma gradual a todos los laboratorios y espacios relevantes

de la institución, desarrollar capacidades más avanzadas de evaluación de riesgos, implementar sistemas de monitoreo y de evaluación de la efectividad del programa, establecer colaboraciones con otras instituciones para intercambiar conocimientos, y comenzar a desarrollar experiencia especializada en áreas concretas. Las instituciones que ya cuentan con un programa en marcha, por su parte, pueden concentrar sus esfuerzos en las áreas de mejora que identifiquen mediante evaluaciones sistemáticas de su efectividad actual, o mediante un diagnóstico completo. Esta evaluación y diagnóstico supone realizar una auditoría integral de todos los componentes del programa existente, comparar el desempeño actual con las mejores prácticas reconocidas a nivel internacional, identificar brechas concretas en conocimientos, recursos o capacidades, evaluar la satisfacción y las percepciones de los distintos grupos de usuarios, y analizar cómo han evolucionado los indicadores de desempeño a lo largo del tiempo.

El futuro de la gestión de seguridad química en el entorno académico está siendo moldeado por avances rápidos en distintas áreas tecnológicas, que prometen transformar de manera profunda la forma en que se identifican, se evalúan y se gestionan los riesgos químicos. Los desarrollos en inteligencia artificial están abriendo oportunidades sin precedentes para el análisis predictivo de riesgos químicos y para la optimización automática de los sistemas de seguridad, ya que estas tecnologías pueden procesar volúmenes masivos de datos con el fin de identificar patrones complejos que resultarían imposibles de detectar mediante los métodos tradicionales. Entre las aplicaciones que ya están emergiendo se cuentan los sistemas de predicción de riesgos que

integran datos ambientales, de inventario y de actividades del laboratorio; la optimización automática de los sistemas de ventilación en función de las condiciones en tiempo real; el análisis predictivo de mantenimiento para los equipos críticos de seguridad; los sistemas de recomendación inteligente para seleccionar el equipo de protección personal más adecuado; y el análisis automático de video de seguridad para identificar comportamientos riesgosos.

Poner en marcha estos planes y programas conlleva, sin embargo, ciertos desafíos ligados a precondiciones importantes: la necesidad de manejar grandes volúmenes de datos de calidad para entrenar los modelos, el requerimiento de contar con experiencia técnica especializada tanto para su desarrollo como para su mantenimiento, las consideraciones éticas en torno a la privacidad y a la autonomía en la toma de decisiones, la necesidad de validar con rigor estos sistemas antes de implementarlos en aplicaciones críticas de seguridad, y los costos, potencialmente elevados, que implica su desarrollo y su implementación inicial. Entre las capacidades que ya empiezan a emerger están el monitoreo continuo de las condiciones ambientales y de seguridad, la coordinación automática entre los sistemas de detección, ventilación y respuesta a emergencias, el seguimiento en tiempo real de la ubicación y el estado del personal dentro de los espacios de laboratorio, la gestión automática de inventarios con seguimiento del uso y de los vencimientos, y la integración de múltiples fuentes de datos para lograr una evaluación de riesgos más completa.

La conciencia cada vez mayor sobre sostenibilidad está impulsando que se incorporen consideraciones ambientales y sociales en todos los

aspectos de la gestión de seguridad química, lo que va abriendo paso a enfoques más integrados. Los principios de la química verde se están sumando a los programas de seguridad química, en un intento por crear enfoques que reduzcan simultáneamente los riesgos y los impactos ambientales. Entre las estrategias de esta integración están la evaluación conjunta de los riesgos para la salud humana y para el ambiente, la priorización de sustancias y procesos según criterios de sostenibilidad, el desarrollo de métricas que capturen tanto la seguridad como la sostenibilidad, la incorporación de consideraciones sobre el ciclo de vida al seleccionar materiales, y el impulso a la innovación en el desarrollo de alternativas más seguras y sostenibles. Las ideas de economía circular, por ejemplo, están cambiando cómo las universidades manejan sus residuos químicos, dándole cada vez más importancia a prevenir, reutilizar y recuperar. Entre las ideas nuevas que están apareciendo están los programas para pasar entre laboratorios los químicos que no se usaron, crear procesos para purificar y volver a usar los solventes usados, trabajar junto con la industria para recuperar y reciclar materiales valiosos, y pensar en cómo se van a manejar los residuos desde el momento mismo de comprar los materiales.

La conciencia cada vez mayor sobre sostenibilidad está impulsando que se incorporen consideraciones ambientales y sociales en todos los aspectos de la gestión de seguridad química, lo que va abriendo paso a enfoques más integrados. Los principios de la química verde se están sumando a los programas de seguridad química, en un intento por crear enfoques que reduzcan simultáneamente los riesgos y los impactos ambientales. Entre las estrategias de esta integración están la evaluación

conjunta de los riesgos para la salud humana y para el ambiente, la priorización de sustancias y procesos según criterios de sostenibilidad, el desarrollo de métricas que capturen tanto la seguridad como la sostenibilidad, la incorporación de consideraciones sobre el ciclo de vida al seleccionar materiales, y el impulso a la innovación en el desarrollo de alternativas más seguras y sostenibles.

Las nuevas tecnologías, como la inteligencia artificial, el internet de las cosas y los sistemas de monitoreo avanzado, dan oportunidades enormes para mejorar los programas de seguridad química, pero usarlas bien exige pensar con cuidado, al mismo tiempo, en las personas y en la organización que hay detrás. Avanzar hacia formas de trabajar más completas, que tomen en cuenta la sostenibilidad y la economía circular, trae retos y también oportunidades para las universidades, y pide nuevas habilidades y nuevas formas de pensar la gestión de los riesgos químicos. La gestión de la seguridad química en el entorno académico seguirá evolucionando frente a los nuevos desafíos y oportunidades que se presenten, y las instituciones que adopten enfoques adaptativos, que inviertan en el desarrollo de sus capacidades humanas y que mantengan un compromiso sostenido con la mejora continua estarán en mejores condiciones para atravesar estos cambios con éxito.

Los casos vistos en este capítulo, tanto los buenos como los malos, muestran que trabajar junto a otras instituciones y construir capacidades propias poco a poco son estrategias muy valiosas para superar la falta de recursos y lograr programas de seguridad efectivos que duren en el tiempo. También dejan claro que apoyarse en redes regionales y adaptar las buenas prácticas internacionales a la realidad local son factores clave

para tener éxito. Todo esto debería ser un llamado a la acción real para las universidades de Ecuador y de la región.

6.6 Preguntas para la reflexionar y pasar de la lectura a la práctica

Las preguntas que se presentan a continuación buscan orientar tanto la reflexión individual como el debate en grupo, y facilitar que cada lector aplique las lecciones de este documento al contexto concreto en el que se desenvuelve. Ninguna de ellas tiene una sola respuesta correcta. Su valor está sobre todo en pensar en la propia realidad, mirando las experiencias que se contaron a lo largo de este manual.

1) ¿Qué prácticas concretas de almacenamiento por compatibilidad química podrían implementarse de inmediato en su laboratorio, sin inversión adicional significativa de recursos?
2) ¿Existen en su institución un comité de seguridad con participación de estudiantes y docentes? De no existir, ¿qué roles y funciones mínimas debería contemplar su conformación?
3) ¿Cómo podría aplicarse una política de compra responsable para reducir el inventario de sustancias peligrosas en su unidad académica?
4) ¿Qué prácticas de docencia podrían rediseñarse a microescala para disminuir simultáneamente el riesgo y la generación de residuos en cursos con numerosos estudiantes?
5) ¿Qué método cualitativo o semicuantitativo de evaluación de riesgos, como la banda de control, resultaría más apropiado para

su realidad del tratamiento de los datos de utilización de las sustancias y de las disponibles en laboratorio

6) ¿Qué indicadores principales permitirían medir el avance de un programa de seguridad en su institución antes de que ocurra un incidente

7) ¿Cuáles de los errores frecuentes descritos en este capítulo reconoce en su entorno, y qué correctivos aplicaría en primer lugar

8) ¿Qué oportunidades de colaboración interinstitucional o de conformación de redes regionales identifica para compartir protocolos, formatos y aprendizajes en materia de seguridad química?

BIBLIOGRAFÍA

Abbas, M., Zakaria, A. M., Balkhyour, M. A., & Kashif, M. (2016). Chemical Safety in Academic Laboratories: An Exploratory Factor Analysis of Safe Work Practices & Facilities in a University. Journal of Safety Studies, 2(1). https://doi.org/10.5296/jss.v2i1.8962

Abulrub, A.-H. G., Attridge, A., & Williams, M. A. (2011). Virtual Reality in Engineering Education: The Future of Creative Learning. International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET), 6(4), 4. https://doi.org/10.3991/ijet.v6i4.1766

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. Computer Networks, 38(4), 393–422. https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4

Al-Zyoud, W., Qunies, A. M., Walters, A. U. C., & Jalsa, N. K. (2019). Perceptions of chemical safety in laboratories. Safety, 5(2). https://doi.org/10.3390/safety5020021

Alaimo, P. J., Langenhan, J. M., Tanner, M. J., & Ferrenberg, S. M. (2010). Safety teams: An approach to engage students in laboratory safety. Journal of Chemical Education, 87(8), 856–861. https://doi.org/10.1021/ed100207d

Álvarez-Chávez, C. R., Marín, L. S., Perez-Gamez, K., Portell, M., Velazquez, L., & Munoz-Osuna, F. (2019). Assessing College Students' Risk Perceptions of Hazards in Chemistry Laboratories.

Journal of Chemical Education, 96(10). https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00891

American Chemical Society. (2017). Safety in academic chemistry laboratories : Best practices for First-and Second-Year University students (D. Finster, Ed.). American Chemical Society, Joint Board-Council Committee on Chemical Safety.

Anastas, P. T., & Warner, J. C. (1998). Green Chemistry: Theory and Practice. Green Chemistry: Theory and Practice, Oxford University Press, New York.

Bernhoft, R. A. (2012). Mercury toxicity and treatment: A review of the literature. In Journal of Environmental and Public Health (Vol. 2012). https://doi.org/10.1155/2012/460508

Boobis, A. R. (2010). Mode of action considerations in the quantitative assessment of tumour responses in the liver. Basic and Clinical Pharmacology and Toxicology, 106(3). https://doi.org/10.1111/j.1742-7843.2009.00505.x

Boobis, A. R., Cohen, S. M., Dellarco, V., McGregor, D., Meek, M. E., Vickers, C., Willcocks, D., & Farland, W. (2006). IPCS framework for analyzing the relevance of a cancer mode of action for humans. In Critical Reviews in Toxicology (Vol. 36, Issue 10). https://doi.org/10.1080/10408440600977677

Boobis, A. R., Doe, J. E., Heinrich-Hirsch, B., Meek, M. E., Munn, S., Ruchirawat, M., Schlatter, J., Seed, J., & Vickers, C. (2008). IPCS

framework for analyzing the relevance of a noncancer mode of action for humans. In Critical Reviews in Toxicology (Vol. 38, Issue 2). https://doi.org/10.1080/10408440701749421

Bruch, Q. J., Butler, S. K., Tonks, I. A., & Miller, A. J. M. (2021). Resources for improving safety culture, training, and awareness in the academic laboratory. In Comprehensive Coordination Chemistry III (Vols. 1–9). https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102688-5.00092-1

Cadwallader, L. C., & Pawelko, R. J. (2019). Elements of experiment safety in the laboratory. Journal of Chemical Health and Safety, 26(4–5). https://doi.org/10.1016/j.jchas.2019.01.002

Cheng, F., Li, W., Zhou, Y., Shen, J., Wu, Z., Liu, G., Lee, P. W., & Tang, Y. (2012). AdmetSAR: A comprehensive source and free tool for assessment of chemical ADMET properties. Journal of Chemical Information and Modeling, 52(11). https://doi.org/10.1021/ci300367a

Cohen, S. M., & Ellwein, L. B. (1991). Genetic Errors, Cell Proliferation, and Carcinogenesis. Cancer Research, 51(24).

Cornell University. (2024). Concentrated solutions of acids and bases. Https://Ehs.Cornell.Edu/Book/Export/Html/1305.

Dartmouth College. (2024). Personal protective equipment in chemistry. Environmental Health and Safety. . Https://Ehs.Dartmouth.Edu/Laboratory-Research-

Safety/Chemical-Safety/Personal-Protective-Equipment-Chemistry .

Doe, J. E., Boobis, A. R., Dellarco, V., Fenner-Crisp, P. A., Moretto, A., Pastoor, T. P., Schoeny, R. S., Seed, J. G., & Wolf, D. C. (2019). Chemical carcinogenicity revisited 2: Current knowledge of carcinogenesis shows that categorization as a carcinogen or non-carcinogen is not scientifically credible. In Regulatory Toxicology and Pharmacology (Vol. 103). https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.01.024

Ennis, R. (2019). Osha Laboratory Standard - Implementation Guide. In Osha Laboratory Standard - Implementation Guide. https://doi.org/10.1201/9780203744703

Erickson, B. (1999). U.S. environmental protection agency. Today's Chemist at Work, Suppl.

European Chemicals Agency. (2023). European Chemicals Agency (ECHA). In Encyclopedia of Toxicology, Fourth Edition: Volume 1-9 (Vol. 4). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00066-X

Fatemi, F., Dehdashti, A., & Jannati, M. (2022). Implementation of Chemical Health, Safety, and Environmental Risk Assessment in Laboratories: A Case-Series Study. Frontiers in Public Health, 10. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.898826

Foster, B. L. (2004). Laboratory safety program assessment in academia. Chemical Health and Safety, 11(5). https://doi.org/10.1016/j.chs.2004.05.016

Gibson, J. H., Schröder, I., & Wayne, N. L. (2014). A research university's rapid response to a fatal chemistry accident: Safety changes and outcomes. Journal of Chemical Health & Safety, 21(4), 18–26. https://doi.org/10.1016/j.jchas.2014.01.003

Glendon, A. I., & Stanton, N. A. (2000). Perspectives on safety culture. Safety Science, 34(1–3), 193–214. https://doi.org/10.1016/S0925-7535(00)00013-8

Gobierno De la República del Ecuador. (2021). Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN – Ecuador. Servicio Ecuatoriano de Normalización.

Goh, H. Y., Wong, W. W. C., & Ong, Y. Y. (2020). A Study To Reduce Chemical Waste Generated in Chemistry Teaching Laboratories. Journal of Chemical Education, 97(1), 87–96. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00632

Gutierrez, J., Santaolalla, A., Tercjak, A., Rojo, N., Encinas, D., Gomez-De-balugera, Z., & Gallastegui, G. (2020). Creating a green chemistry lab: Towards sustainable resource management and responsible purchasing. Sustainability (Switzerland), 12(21). https://doi.org/10.3390/su12218934

Health and Safety Executive. (2025). The GB CLP Regulation. https://www.hse.gov.uk/chemical-classification/legal/clp-regulation.htm

Hill, R. H. (2007). The emergence of laboratory safety. Journal of Chemical Health and Safety, 14(3). https://doi.org/10.1016/j.jchas.2006.10.001

Hill, R., & Finster, D. (2017). Laboratory safety for chemistry students (R. Hill & D. FInster, Eds.; 2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc.

Hinze, J., Thurman, S., & Wehle, A. (2013). Leading indicators of construction safety performance. Safety Science, 51(1), 23–28. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.05.016

Högberg, J., & Järnberg, J. (2023). Approaches for the setting of occupational exposure limits (OELs) for carcinogens. In Critical Reviews in Toxicology (Vol. 53, Issue 3). https://doi.org/10.1080/10408444.2023.2218887

Indiana University. (2024). Storage of laboratory chemicals. Research Safety: Environmental Health & Safety. Https://Protect.Iu.Edu/Environmental-Health/Research-Safety/Lab-Chemicals.Html.

Inobeme, A., Natarajan, A., Pradhan, S., Adetunji, C. O., Ajai, A. I., Inobeme, J., Tsado, M. J., Jacob, J. O., Pandey, S. S., Singh, K. R., & Singh, J. (2024). Chemical Sensor Technologies for Sustainable Development: Recent Advances, Classification, and

Environmental Monitoring. Advanced Sensor Research, 3(12). https://doi.org/10.1002/adsr.202400066

Kansas State University. (2024). Fume hoods and laboratory ventilation. Environmental Health and Safety. Https://Www.k-State.Edu/Safety/Lab/Fumehood/.

Karamertzanis, P. G., Atlason, P., Nathanail, A. V., Provoost, J., Karhu, E., & Rasenberg, M. (2019). The impact on classifications for carcinogenicity, mutagenicity, reproductive and specific target organ toxicity after repeated exposure in the first ten years of the REACH regulation. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 106. https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2019.05.003

Karapantsios, T. D., Boutskou, E. I., Touliopoulou, E., & Mavros, P. (2008). Evaluation of chemical laboratory safety based on student comprehension of chemicals labelling. Education for Chemical Engineers, 3(1), e66–e73. https://doi.org/10.1016/j.ece.2008.02.001

Kletz, T. (2001). Learning from accidents. Engineering Technology, 4(12). https://doi.org/10.4018/ijiscram.2018070103

Liu, Y., Feng, W., Zhang, G., & Zhang, Y. (2023). The Influence of the University Laboratory Safety Climate on Students' Safety Behavior: The Parallel Mediating Effects of Ability and Motivation. Sustainability (Switzerland), 15(19). https://doi.org/10.3390/su151914070

Lestari, F., Budiawan, Kurniawidjaja, M. L., & Hartono, B. (2016). Baseline survey on the implementation of laboratory chemical safety, health and security within health faculties laboratories at Universitas Indonesia. Journal of Chemical Health & Safety, 23(4), 38–43. https://doi.org/10.1016/j.jchas.2015.11.002

Marendaz, J. L., Suard, J. C., & Meyer, T. (2013). A systematic tool for Assessment and Classification of Hazards in Laboratories (ACHiL). Safety Science, 53. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.10.001

Ménard, A. D., & Trant, J. F. (2020). A review and critique of academic lab safety research. Nature Chemistry, 12(1), 17–25. https://doi.org/10.1038/s41557-019-0375-x

Mirafzal, G. A., & Baumgarten, H. E. (1988). Control of peroxidizable compounds: An addendum. Journal of Chemical Education, 65(9). https://doi.org/10.1021/ed065pa226

Murcia, J. E., Martinez, S., Martins, V., Herrera, D., Buitrago, C., Velasquez, A., Ruiz, F., & Torres, M. (2023). Risk assessment and green chemistry applied to waste generated in university laboratories. Heliyon, 9(5). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15900

National Research Council. (2011). Prudent Practices in the Laboratory. In Prudent Practices in the Laboratory. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/12654

National Research Council. (2014). Safe Science. National Academies Press. https://doi.org/10.17226/18706

O'Neil, N. J., Scott, S., Relph, R., & Ponnusamy, E. (2021). Approaches to Incorporating Green Chemistry and Safety into Laboratory Culture. Journal of Chemical Education, 98(1). https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00134

OECD. (2018). Guidance Document on Good In Vitro Method Practices (GIVIMP). OECD Guidline for the Testing of Chemicals, 1(286).

OSHA. (2015). OSHA Field Safety and Health Manual. Department of Labor Manual Series (DLMS) 4, Chapter 800, DOL Safety and Health Program.

Papadopoli, R., Nobile, C. G. A., Trovato, A., Pileggi, C., Pavia, M., & Pavia, M. (2020). Chemical risk and safety awareness, perception, and practices among research laboratories workers in Italy. Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 15(1). https://doi.org/10.1186/s12995-020-00268-x

Peplow, M., & Marris, E. (2006). How dangerous is chemistry? Nature, 441(7093), 560–561. https://doi.org/10.1038/441560a

Prat, D., Wells, A., Hayler, J., Sneddon, H., McElroy, C. R., Abou-Shehada, S., & Dunn, P. J. (2016). CHEM21 selection guide of

classical- and less classical-solvents. Green Chemistry, 18(1), 288–296. https://doi.org/10.1039/C5GC01008J

Princeton University, E. H. and S. (2024). Laboratory safety manual. Https://Ehs.Princeton.Edu/Laboratory-Research/Laboratory-Safety/.

República del Ecuador. (2017). Codigo Organico del Ambiente. Registro Oficial Suplemento 983.

Schietgat, L., Cuissart, B., De Grave, K., Efthymiadis, K., Bureau, R., Crémilleux, B., Ramon, J., & Lepailleur, A. (2023). Automated detection of toxicophores and prediction of mutagenicity using PMCSFG algorithm. Molecular Informatics, 42(3). https://doi.org/10.1002/minf.202200232

Schröder, I., Huang, D. Y. Q., Ellis, O., Gibson, J. H., & Wayne, N. L. (2016). Laboratory safety attitudes and practices: A comparison of academic, government, and industry researchers. Journal of Chemical Health & Safety, 23(1), 12–23. https://doi.org/10.1016/j.jchas.2015.03.001

Shaban, S. A. (2024). A Smart System for the University Chemical Laboratory Using IoT. Journal of Advances in Information Technology, 15(1). https://doi.org/10.12720/jait.15.1.104-117

Simmons, H. E., Matos, B., & Simpson, S. A. (2017). Analysis of injury data to improve safety and training. Journal of Chemical Health and Safety, 24(1). https://doi.org/10.1016/j.jchas.2016.03.004

Singh, M. M., Szafran, Z., & Pike, R. M. (1999). Microscale chemistry and green chemistry: Complementary pedagogies. Journal of Chemical Education, 76(12), 1684–1686. https://doi.org/10.1021/ed076p1684

Sonawane, S. L., Patil, V. J., & Tigaa, R. A. (2023). Evaluating and Promoting Chemical Safety Awareness in the Chemical Sciences. Journal of Chemical Education, 100(2), 469–478. https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.2c00102

Stahl, J., & König, B. (2024). A survey of the iron ligand-to-metal charge transfer chemistry in water. In Green Chemistry (Vol. 26, Issue 6). https://doi.org/10.1039/d3gc04595a

Stoessel, F. (2008). Thermal Safety of Chemical Processes: Risk Assessment and Process Design. In Thermal Safety of Chemical Processes: Risk Assessment and Process Design. https://doi.org/10.1002/9783527621606

Tanaka, M. O., Souza, A. L. T., & Módena, É.´ S. (2006). Habitat structure effects on size selection of snail kites (Rostrhamus sociabilis) and limpkins (Aramus guarauna) when feeding on apple snails (Pomacea spp.). Acta Oecologica. https://doi.org/10.1016/j.actao.2006.02.003

Tang, B. L. (2025). Laboratory Safety Regulations and Training must Emphasize the Underpinning Research Ethics Perspectives. Journal of Academic Ethics, 23(1), 159–165. https://doi.org/10.1007/s10805-024-09531-w

Thomas, R. S., Paules, R. S., Simeonov, A., Fitzpatrick, S. C., Crofton, K. M., Casey, W. M., & Mendrick, D. L. (2018). Food for Thought ... The US Federal Tox21 Program: A Strategic and Operational Plan for Continued Leadership. Altex, 35(2). https://doi.org/10.14573/altex.1803011

Tice, R. R., Austin, C. P., Kavlock, R. J., & Bucher, J. R. (2013). Improving the human hazard characterization of chemicals: A Tox21 update. In Environmental Health Perspectives (Vol. 121, Issue 7). https://doi.org/10.1289/ehp.1205784

UCLA. (2024). Laboratory safety training courses. Https://Ehs.Ucla.Edu/Training-Support/Courses/Labsafety Universidad de Boston.

United Nations. (1992). Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, Río de Janeiro, Brasil, 3 a 14 de junio de 1992.

United Nations. (2017). Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals; (GHS). (Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals; GHS）, 10(2).

University of Nottingham. (2012). Guidance on Safe Storage of Chemicals in Laboratories. The Unversity of Nottingham, July.

University of Pennsylvania. (2024). Fume hood and laboratory exhaust specifications. PennEHRS. Https://Ehrs.Upenn.Edu/Health-

Safety/Lab-Safety/Lab-Design-Equipment/Fume-Hood-and-Laboratory-Exhaust-Specifications.

University of South California. (2024). Chemical Segregation and Storage. Https://Ehs.Usc.Edu/Research/Lab/Chem-Storage/.

University of Wisconsin. (2024). Chemical safety guidelines. Https://Ehs.Wisc.Edu/Labs-Research/Chemical-Safety/ .

US EPA. (2020). Resource Conservation and Recovery Act (RCRA) Laws and Regulations. In United States Environmental Protection Agency.

van der Kolk, J. (2023). Globally harmonized system for classification and labeling of chemicals (GHS). In Encyclopedia of Toxicology, Fourth Edition: Volume 1-9 (Vol. 4). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00171-8

Van Noorden, R. (2013). Safety survey reveals lab risks. Nature, 493(7430), 9–10. https://doi.org/10.1038/493009a

Vinceti, S. R., Docea, A. O., Tsitsimpikou, C., & Filippini, T. (2021). Updating the European Union's regulation on classification, labelling and packaging of substances and mixtures (CLP): A key opportunity for consumers, workers and stakeholders with interests in the legislation and toxicology of hazardous chemicals. Toxicology Reports, 8. https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2021.11.011

Wang, X., Thorarinsdottir, A. E., Bachrach, M., & Blayney, M. B. (2019). Building a Sustainable Student-Led Model to Promote Research Safety in Academic Laboratories. In ACS Central Science (Vol. 5, Issue 12). https://doi.org/10.1021/acscentsci.9b00562

Wu, T. C., Liu, C. W., & Lu, M. C. (2007). Safety climate in university and college laboratories: Impact of organizational and individual factors. Journal of Safety Research, 38(1). https://doi.org/10.1016/j.jsr.2007.01.003

Yang, Y., Reniers, G., Chen, G., & Goerlandt, F. (2019). A bibliometric review of laboratory safety in universities. Safety Science, 120, 14–24. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2019.06.022

Yaroshenko, I., Kirsanov, D., Marjanovic, M., Lieberzeit, P. A., Korostynska, O., Mason, A., Frau, I., & Legin, A. (2020). Real-Time Water Quality Monitoring with Chemical Sensors. Sensors, 20(12), 3432. https://doi.org/10.3390/s20123432

Zalk, D. M., & Nelson, D. I. (2008). History and evolution of control banding: A review. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 5(5), 330–346. https://doi.org/10.1080/15459620801997916

Zinn, S. R., Slaw, B. R., Lettow, J. H., Menssen, R. J., Wright, J. H., II, Mormann, K., & Ting, J. M. (2020). Lessons learned from the creation and development of a researcher-led safety organization

at the University of Chicago. ACS Chemical Health & Safety, 27(2), 114–124. https://doi.org/10.1021/acs.chas.9b00012

Manual de Manipulación y Disposición de Sustancias en Actividades Académicas y de Investigación de las Ciencias Ambientales, se publicó en el mes de noviembre de 2026.

ISBN: 978-9907-852-26-4

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

BIOGRAFÍA DE AUTOR

Denis Alexander Mosquera Muñoz:
Es biólogo y Magíster en Ecología y Ecosistemas, docente de Ingeniería Ambiental en la Universidad Técnica de Machala. Ha colaborado con la Universidad de Viena, la Fundación Charles Darwin y el Max Planck Institute for Ornithology, con diez publicaciones indexadas en biodiversidad y gestión ambiental..

MANUAL DE MANIPULACIÓN Y DISPOSICIÓN DE SUSTANCIAS EN ACTIVIDADES ACADÉMICAS Y DE INVESTIGACIÓN DE LAS CIENCIAS AMBIENTALES

Estimado lector, este manual aborda la seguridad en la manipulación de sustancias como un pilar indispensable para la integridad científica, la preservación de la vida y el avance de las ciencias ambientales. Fruto de más de una década de investigación en entornos de alta exigencia —desde las islas Galápagos hasta laboratorios en Austria y Ecuador continental—, la obra responde a la necesidad de contar con una guía especializada que trascienda los manuales químicos convencionales para atender los retos singulares del campo ambiental, abarcando desde el muestreo biológico en ecosistemas frágiles hasta la gestión responsable de reactivos analíticos.

El texto fundamenta que los riesgos más críticos suelen derivar de la subestimación de procedimientos rutinarios y materiales cotidianos, afectando con frecuencia a la comunidad académica. Frente a ello, articula una sólida base teórica con protocolos operativos actualizados, normativas internacionales, análisis de casos reales y directrices de química verde. Su propuesta trasciende la protección laboral individual para proyectarse hacia una ética de sostenibilidad activa: el deber ineludible de salvaguardar los mismos ecosistemas objeto de estudio.

Orientado a estudiantes, docentes, investigadores y consultores ambientales, este volumen se presenta como una herramienta de consulta flexible y formativa. En su conjunto, la obra se consolida como un referente técnico y ético indispensable para cimentar una cultura de prevención rigurosa, orientada a formar profesionales competentes y comprometidos con la bioseguridad, la calidad investigativa y la custodia ambiental responsable.

GRUPO BLR

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
https://grupoblr.com/
publicaciones@grupoblr.com

ISBN: 978-9907-852-26-4

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MACHALA
1969