

Strategies for use, treatment, management and final disposition of wastes in academic laboratories

Vladimir Gaviria González^{1*}, and Henry Reyes Pineda²

¹Institución Universitaria Colegio Mayor de Antioquia, Medellín, 050034, Colombia;

²Universidad de Manizales, 170001, Colombia;

*Corresponding author, e-mail: vladimir.gaviria@colmayor.edu.co¹ hreyes@umanizales.edu.co²

Abstract

Las instituciones de educación superior que cuentan con laboratorios pueden generar una gran diversidad de residuos, muchos de los cuales poseen características de peligrosidad. La acumulación no controlada de estos residuos trae consigo considerables impactos en el ambiente, la seguridad y la higiene de la comunidad académica. Este artículo formula estrategias que permitan el planteamiento de soluciones integradas con el fin de mitigar el riesgo latente en espacios de práctica académica en laboratorios de instituciones de educación superior. Por lo cual, se considera cuantificar la generación de residuos en las unidades de análisis de diferentes espacios de experimentación y evaluar los factores que intervienen en la implementación de estrategias para el diagnóstico, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos. A partir del diagnóstico y la caracterización de residuos, se evalúan alternativas que ayuden a prevenir y en otros casos a mitigar los impactos que estos pueden provocar, de tal manera que se consolide un protocolo para la gestión de residuos. Se han implementado estrategias de disposición de residuos peligrosos, mecanismos de tratamiento y estrategias de minimización como: microquímica, reciclaje por precipitación y métodos de encapsulamiento e inmovilización.

Keywords: hazardous waste, academic laboratories, final disposition, waste treatment, waste management

Copyright © 2020 Universitas Ahmad Dahlan. All rights reserved.

1. Introduction

Aunque la generación de residuos peligrosos y no peligrosos en muchos de los laboratorios académicos puede considerarse como baja, la acumulación no controlada trae consigo considerables impactos en el medio ambiente, la seguridad y la higiene de la comunidad académica. Resultan perjudiciales para la salud y el medio ambiente cuando hay una exposición prolongada a altas concentraciones de residuos. Sin embargo, hasta las bajas concentraciones de materiales peligrosos pueden alterar las condiciones de los ecosistemas reflejado en la contaminación de los cuerpos de agua (subterráneas, fuentes hídricas, entre otras), causada por la disposición inadecuada de los residuos químicos peligrosos [1].

En la actualidad, existen guías y políticas mundiales, para la clasificación de los residuos químicos generados en laboratorios [2]. Es común la ejecución de acciones correctivas con base en la evaluación de los procesos [3]. El objetivo de estos tratamientos es la obtención de sólidos monolíticos de resistencia elevada, ya sea a la compresión (resistencia mecánica) y sobre todo a la lixiviación de los contaminantes (resistencia química) [4].

La osmosis inversa es otro método de tratamiento de residuos en la cual “se emplea para separar el agua de las sales inorgánicas a través de una membrana que permite el paso del agua, pero impide el paso de las sales. El costo de las membranas puede representar el 50% o más del costo del equipo. Aparte de los problemas de ensuciamiento, los sistemas de osmosis inversa son muy sensibles a la temperatura” [5]. Además, los autores de [6] proponen un modelo general de gestión para el tratamiento de residuos en la búsqueda de soluciones para el manejo y control de este tipo de residuos en la Universidad Nacional de Río Cuarto, con el propósito de solucionar la problemática de residuos peligrosos. En [7], los autores proponen el programa para mejorar progresivamente la seguridad y minimizar el vertimiento de residuos Universidad Central de las Villas.

Además, en [8] se utilizó el método de valoración contingente para la determinación de los beneficios ambientales para la evaluación de la implementación de un plan de manejo de las sustancias descartadas en el laboratorio de fisicoquímica de la Universidad de Carabobo, mediante la relación beneficio costo de dos planes de manejo respecto a la recuperación y almacenamiento de residuos. En [9], se proponen pautas para el desarrollo de un Plan de Gestión

de Residuos tanto peligrosos, como domésticos o asimilables a los domésticos generados en un laboratorio químico, para el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (ITBA). En el año 2011, en la Universidad Nacional de San Marcos en Perú, [10], estudió los factores que intervienen en el tratamiento y disposición final de los residuos tóxicos generados en los laboratorios de dicha institución, dónde tuvo en consideración variables como el grado de peligrosidad, el grado de toxicidad y emisiones. Los resultados de la investigación permitieron desarrollar: 1. Un modelo para el tratamiento de los residuos de laboratorio, 2. Un modelo para la identificación de los impactos medioambientales y de los peligros y riesgos.

En la Universidad Nacional de Costa Rica [11], se realizaron inventarios de los reactivos químicos utilizados y almacenados en algunos laboratorios para establecer patrones de distribución, ubicación y manipulación de estos en los diferentes espacios académicos, dónde se manipulan agentes químicos y los reactivos que se utilizan en mayor cantidad. En [12] se describe información detallada sobre la gestión de residuos químicos peligrosos generados en el laboratorio OSP ambiental, enfocado en la gestión específica de cada tipo de residuo químico peligroso para los procesos de: generación, optimización, reutilización, almacenamiento, tratamiento y disposición final. También, en [13] se emplearon algunas metodologías como: la caracterización de soluciones residuales, caracterización de catalizadores, procesos de prereacción y procesos de reacción experimental las cuales condujeron a la identificación de una elevada concentración de materia orgánica oxidable en la solución residual pura.

En [14] se establecieron procedimientos adecuados desde la generación hasta el almacenamiento de los residuos químicos peligrosos generados de los laboratorios en la Universidad de Nariño, Colombia. Para tal fin se implementó una metodología orientada al diagnóstico, caracterización, disposiciones para la minimización, tratamiento, manejo adecuado y almacenamiento temporal de los residuos químicos generados. En la Universidad Tecnológica de Pereira Colombia [15], desarrollaron el trabajo investigativo basado en evaluar la degradación del ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) mediante fotocátalisis homogénea en un reactor de recirculación y reactor solar CPC, concluyendo que la fotocátalisis homogénea probada con luz ultravioleta y energía solar es un método eficaz para la degradación de DNS en el agua. Un método de tratamiento para los residuos generados en laboratorios de química de la Universidad de Pamplona sugerido por [16], indica mecanismos de evaporación para tal fin, esto en virtud de los pequeños volúmenes de residuos químicos que se generan habitualmente durante de las prácticas de laboratorio. El estudio se basó en evaluar el proceso la evaporación al aire libre para la eliminación de residuos, teniendo presente variables como la velocidad, el volumen, el tiempo y la temperatura de evaporación en bajo condiciones ambientales de temperatura y presión.

En el trabajo desarrollado por [17], se desarrollaron procedimientos que permiten diseñar e implementar estrategias educativas para la adecuada disposición y segregación de residuos químicos. Esto permite minimizar los efectos nocivos al medio ambiente y cumplir con la normatividad. La ejecución de la metodología planteada permitió la caracterización cualitativa de los residuos generados en las prácticas de laboratorio y los procesos de gestión implícitos. En el mismo sentido, en [1] se empleó las metodologías estándar de definición y clasificación internacional de residuos químicos, las cuales se adecuaron acorde con las necesidades y los principios emanados por la política ambiental de la Universidad. El resultado del trabajo permitió definir los criterios de gestión para la identificación, clasificación y el tratamiento adecuado a los residuos químicos y peligrosos que se generan en las actividades académicas de la institución.

En el estudio el “uso de nuevas tecnologías en los laboratorios de química y la minimización del impacto sobre la salud y el medio ambiente” [3], enmarcado en la prevención de los riesgos asociados al manejo y disposición final de sustancias residuales. Como resultado de la implementación de esta tecnología, “se han generado una serie de recomendaciones y protocolos que se deben seguir en el momento de hacer la disposición final de los residuos de los laboratorios y específicamente en el laboratorio de química” de la Universidad del Norte (Barranquilla). El estudio desarrollado en la Universidad Industrial de Santander, por parte de [18] el cual consistió en la estructuración de un “protocolo de rutas de transporte y disposición final de residuos químicos peligrosos, generados en los laboratorios de la escuela de química”, se enfocó en métodos que permitiesen la aplicación de normas vigentes, mediante la documentación de procedimientos de tal manera que se puedan incorporar a disposiciones y políticas institucionales. En [19] se desarrolló el ejercicio investigativo orientado a la “contribución al sistema de gestión ambiental para el adecuado manejo de residuos sólidos químicos generados en el campus de la Universidad Nacional - Sede Bogotá”. El propósito consistió en

“realizar el diagnóstico del estado actual de los residuos sólidos químicos en las diferentes unidades generadoras de la Universidad Nacional, Sede Bogotá”, para la implementación de estrategias que permitan mitigar aspectos adversos en el ambiente y la salud humana. Se emplearon metodologías de diagnósticos de residuos, adecuación de espacios de laboratorio y protocolos para el manejo de residuos.

De acuerdo a la literatura consultada, es necesario conocer los niveles de afectación o impactos generados por la inadecuada disposición de residuos químicos en los laboratorios. El inadecuado almacenamiento, la acumulación e incorrecta disposición final de residuos químicos y biológicos en una institución universitaria, pueden representar riesgo químico y un impacto ambiental negativo y detrimento en la salud humana no solo para la institución sino además para la comunidad aledaña en general. Además, el vertimiento y la inadecuada disposición final de residuos químicos, tóxicos y peligrosos, generados durante las prácticas de laboratorio, pueden derivar en la contaminación de cuerpos de agua (subterráneas, fuentes hídricas, entre otras), los suelos y el aire, esto sino se dispone de protocolos o procedimientos para su gestión.

Por lo tanto, este artículo se centra en realizar el análisis de mecanismos para la gestión de residuos peligrosos generados en los espacios de práctica académica proponiendo estrategias de aprovechamiento, tratamiento, manejo adecuado y disposición final. Caracterizar por tipo y volumen, los residuos químicos generados en los laboratorios de la Institución. Evaluar alternativas para el diagnóstico, aprovechamiento, tratamiento, manejo adecuado y disposición final de los residuos químicos generados en la Institución Universitaria Colegio Mayor. Identificar los peligros, riesgos y controles asociados a la generación de residuos químicos en los laboratorios de la Institución. Al desarrollar una caracterización y un diagnóstico del estado actual de los residuos químicos peligrosos y no peligrosos en los laboratorios de la institución, y la consolidación de estrategias para el aprovechamiento, tratamiento y disposición final, se obtendrá una herramienta importante para la creación y ejecución de alternativas de manejo que promuevan el cuidado del ambiente y la protección de la salud humana, de aproximadamente 6000 personas que transitan diariamente por la institución.

El resto del artículo se encuentra dividido en tres secciones. En la sección 2 presenta la metodología de investigación, en la cual se desarrolla el planteamiento del problema en torno a la pregunta de investigación, destacando los síntomas y causas de las dificultades asociadas a la generación e inadecuado manejo de los residuos de laboratorios en el ámbito académico. En la sección 3 se establecen los análisis de los resultados obtenidos con base en las alternativas implementadas dadas sus características de impacto y pertinencia con base en las dinámicas institucionales. Finalmente, en la sección 4 se presentan las conclusiones y recomendaciones derivadas del trabajo investigativo.

2. Research Method

Esta investigación es de enfoque cuantitativo con un nivel de investigación del tipo descriptivo y experimental, en tanto que se pretende identificar una problemática respecto a la gestión de los residuos generados en los laboratorios en el ámbito universitario, y emplear los conocimientos y desarrollos teóricos para la aplicación de mecanismos para el diagnóstico, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de residuos químicos.

2.1. Definición de residuos

En este trabajo se consideran los siguientes residuos de laboratorio: corrosivos, reactivos, tóxicos, inflamables, infecciosos y radiactivos. Se caracterizaron los residuos provenientes de laboratorios con base en la cantidad generada por tipo de residuo, periodicidad en la rotación, almacenamiento y disposición final. Se revisan los protocolos de gestión institucional en el manejo de residuos de laboratorio. Se establecen posibles disposiciones institucionales para la gestión de residuos de los laboratorios. Se evalúan los posibles impactos generados por los residuos de laboratorio: Ambientales: alteraciones en el ambiente, contaminación de biosistemas, contaminación de suelos, cuerpos de agua y aire. Salud humana: mutaciones, presencia de sustancias carcinógenas o teratogénicas, alteraciones y patologías nerviosas y pulmonares, entre otras.

2.2. Sitios de toma de muestra

Se definen nueve laboratorios para toma de muestras, dos de ellos se encuentran ubicados en la Facultad de Arquitectura e Ingeniería y los otros siete se encuentran en la Facultad

de Ciencias de la Salud. En la Tabla 1 se muestran las áreas de trabajo de cada laboratorio y la capacidad de estudiantes y docentes que atiende cada uno por clase. Cada laboratorio tiene una capacidad determinada de estudiantes y cuenta con la dotación de equipos insumos y reactivos suficientes.

Tabla 1. Unidades de análisis

Facultad	Laboratorio	Área (m ²)	Capacidad (Docentes/Estudiantes)
Arquitectura e Ingeniería	Ambiental	68.0	20
	Suelos	85.0	25
Ciencias de la Salud	Control de Calidad LACMA	113.0	8
	Centro de Biotecnología	118.0	20
	Laboratorio Bioanálisis (129A)	77.5	30
	Laboratorio Química (129 B)	116.5	30
	Microscopia (144 A)	100.0	30
	Microbiología (144 B)	70.0	30
	Investigación	60.0	12

Fuente: Infraestructura Física IUCMA. 2019.

Además, en el laboratorio Química y Bioanálisis se realizan actividades de docencia para los estudiantes de pregrado y posgrado en asignaturas de Química, Bioquímica, Genética, Inmunología, Análisis Instrumental Biomédico y actividades extensión y proyección social para el público en general. El laboratorio de Investigación de la Facultad de Ciencias se destina para actividades de estudiantes y docentes de la Institución y de otras Instituciones con las cuales se tiene convenio para el desarrollo de los proyectos. En el laboratorio de Microbiología y Microscopia se realizan actividades de docencia para los estudiantes de pregrado y posgrado en asignaturas de Biología, Micología, Hematología, Microbiología, Parasitología, Bromatología, Morfofisiología, Histología, entre otras y actividades extensión y proyección social para el público en general. Se cuenta además con dos espacios destinados para central de materiales, un cuarto para almacenamiento de reactivos y otro para almacenamiento de insumos.

2.3. Levantamiento de información secundaria

En este paso se realiza la verificación de la existencia de planes de gestión de residuos para los laboratorios de la institución, y aquellos que sean susceptibles de ser elaborados o actualizados. Se describen las actividades desarrolladas en los laboratorios y procesos operativos: para cada uno de los laboratorios se levanta y analiza la información correspondiente a la programación de prácticas desarrolladas por los programas académicos que hacen uso de dicho espacio con el fin de determinar los posibles insumos o reactivos empleados (inventarios, registros, entre otros), la posible generación de residuos y la manera cómo operan cada uno de estos espacios de práctica.

2.4. Diagnóstico del uso y la generación de residuos en cada laboratorio

Se realiza la verificación de la entrada de reactivos, dotación de laboratorios (reactivos líquidos y sólidos), fichas de seguridad de reactivos, naturaleza de los reactivos e insumos implementados, tipos de prácticas desarrolladas y procedimientos a lo largo del periodo académico, generación de residuos, manejo y disposición transitoria de residuos, disposición final de residuos, normas de seguridad, y uso de un formulario para implementar como sondeo (encuesta).

2.5. Caracterización y clasificación de los residuos

Para efectos de estudio previo al propósito central del proyecto, se debe realizar el diagnóstico de la producción per cápita de los residuos generados en cada uno de los laboratorios, previa identificación y clasificación, complementario a éste procedimiento se deben desarrollar las siguientes actividades: análisis físico – químico de residuos; Colección y segregación de residuos peligrosos; identificación de residuos aprovechables; identificación de residuos que requieren de tratamiento; y residuos tóxicos y peligrosos que requieren inactivación.

Los residuos químicos peligrosos generados durante las prácticas académicas se deben clasificar con base en el Decreto 4741 de 2005 [20], establecido por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo, en las siguientes categorías: Grupo I: Disolventes Halogenados; Grupo II: Disolventes no Halogenados; Grupo III: Disoluciones Acuosas con Metales Pesados;

Grupo III: Disoluciones Acuosas libre de Metales Pesados; Grupo IV: Ácidos; Grupo V: Aceites; Grupo VI: Sólidos orgánicos; Grupo VI: Sólidos inorgánicos; y Grupo VII: Especiales.

2.6. Estrategia para el manejo de residuos tóxicos y peligrosos

Se plantea el aprovechamiento de residuos mediante procesos de recuperación de solventes no halogenados (grupo II) utilizando destilación fraccionada. En el laboratorio de suelos y materiales se generan residuos de concreto, arena y materiales pétreos con los cuáles se plantea su aprovechamiento mediante la conformación de matrices de encapsulamiento de residuos del grupo I, III y VI con base en la caracterización y clasificación desarrollada. También, se establecen métodos de precipitación para residuos acuosos con metales pesados (grupo III) y evaporación de disolventes halogenados (grupo I). En el caso de la precipitación de metales pesados como método alternativo a la inmovilización, se establece un procedimiento general tal como se describe en la Figura 1.

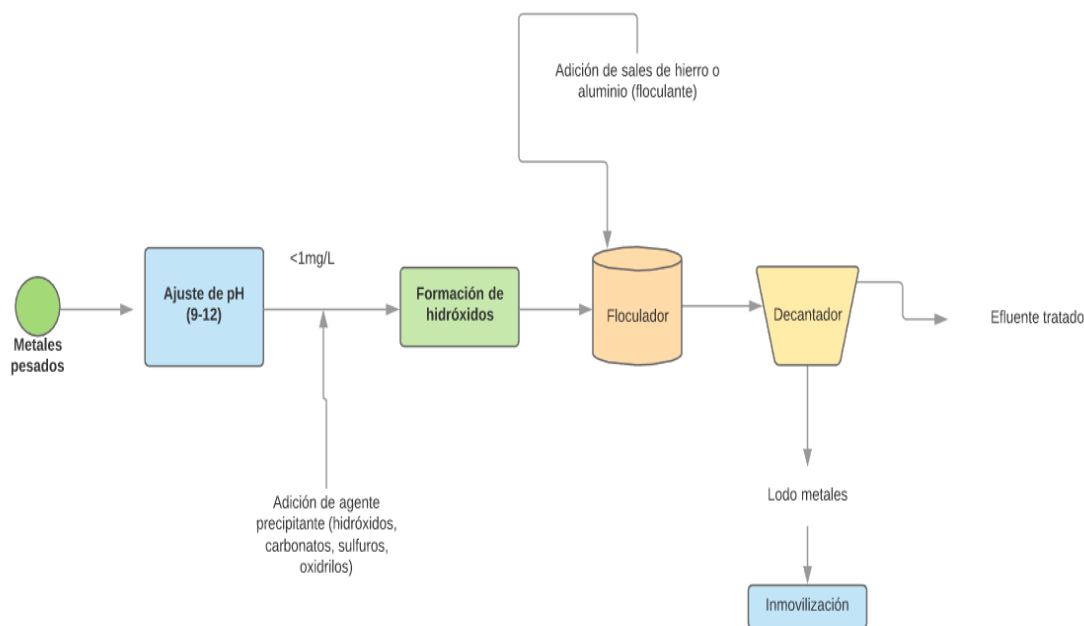


Figura 1. Precipitación de metales pesados

Para la inactivación e inmovilización de residuos se plantea un proceso mediante el cual el residuo es incorporado a un material que lo aísla del ambiente. En este caso se emplean matrices de concreto elaboradas con arena, cemento y cal en relación de peso 3:1:1/2 respectivamente, previa identificación y clasificación de los residuos. Para la determinación del grado de inmovilización se desarrollan pruebas de Transformación de Fourier del Espectro de Infrarrojos (FTIR) y el seguimiento a posibles cambios estructurales y de composición química por la pérdida de masa con la temperatura mediante análisis termogravimétrico –TGA-. (Ver Fig. 2).

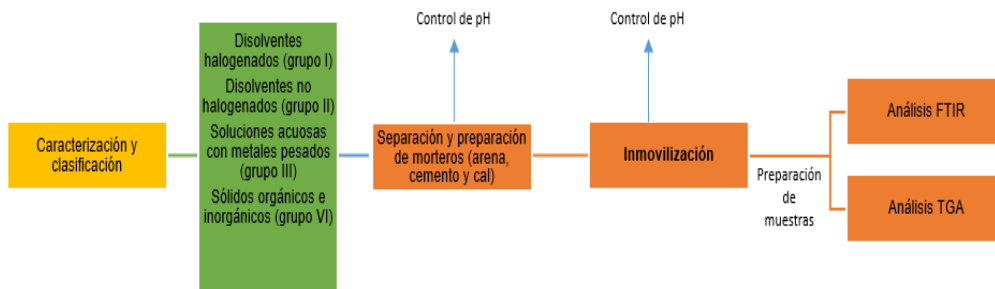


Figura 2. Inmovilización de residuos

Para el tratamiento de corrientes ácidas y básicas se plantean métodos de neutralización y posterior encapsulamiento. (Ver Fig. 3). Finalmente, y dadas las dinámicas de los procesos de gestión de residuos químicos generados en el ámbito universitario en el contexto internacional, se implementan acciones que conduzcan a la minimización y optimización de materiales y reactivos con procedimientos de microquímica.

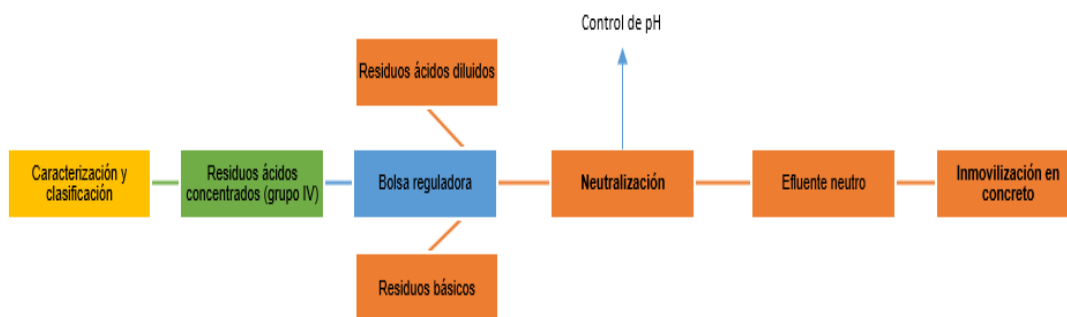


Figura 3. Reciclaje por neutralización de residuos ácidos

2.7. Identificación de peligros, evaluación de riesgos y controles:

Los riesgos asociados a la salud humana, disposición en cuerpos de agua, suelos y aire mediante la consideración de aspectos ambientales y determinación de grados de significancia. En la Fig. 4 se presenta un esquema resumen con las alternativas de gestión y tratamiento que se plantean en el trabajo investigativo conforme al diseño metodológico establecido y los objetivos propuestos.



Figura 4. Alternativas de gestión de residuos peligrosos en unidades generadoras

3. Results and Analysis

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la investigación sobre el manejo de residuos en los diferentes sitios estudiados en la Institución Universitaria Colegio Mayor.

3.1. Caracterización de residuos

La tabla 2 muestra la producción mensual de residuos biosanitarios, ordinarios y reciclables que se encuentran en los laboratorios estudiados.

Tabla 2. Caracterización cualitativa y cuantitativa de los residuos generados en laboratorios de Ciencias de la Salud y consultorio médico

Área	Cantidad (Kg) /mes Por tipo de residuo			
	Biosanitarios	Radiactivos	Ordinarios	Reciclables
Consultorio Médico	19,7		17,6	
Biotecnología	27,1		37,6	6,6
Lab. Química	64,6	7,3	23,2	16,1
Lab. Microscopía	102	35	36,5	6,7
Investigaciones	31,2		12,9	1,3

Los residuos obtenidos de la caracterización cuantitativa en promedio para el año 2018 nos indican que el 55% de los residuos generados, corresponden a los residuos peligrosos biosanitarios, el 29% a residuos no peligrosos (ordinarios), el 9 % corresponde a residuos peligrosos reactivos y el 7% a los residuos a reciclables (aprovechables).

La presencia de residuos radiactivos se debe al uso de yodo en pruebas de radioinmunoanálisis y compuestos de radio, cesio y estroncio en procesos de control de la calidad.

3.2. Clasificación de residuos

Respecto a la recolección y transporte de los residuos caracterizados, la ruta de los residuos ordinarios y reciclables se realiza de manera conjunta dentro de las instalaciones de la Institución por no presentar incompatibilidad en cuanto al riesgo. Estos son llevados hasta el almacenamiento central o centro de acopio, donde son recogidos por las empresas gestoras de su tratamiento y disposición final. En ningún caso se realiza la recolección en forma simultánea con los residuos generados en la atención en salud y las actividades académicas y utilizando los mismos elementos de protección personal. Esta se realiza separada y exclusivamente para residuos peligrosos.

Los residuos generados son recolectados en contenedores de tipo rodantes, en material rígido, de bordes redondeados, lavables e impermeables, de uso exclusivo para tal fin y plenamente identificados y posteriormente son llevados al almacenamiento central o centro de acopio dentro de la celda de residuos peligrosos. Las actividades de recolección de los residuos de riesgo biológico (gestión externa), es responsabilidad de la empresa EMVARIAS- ASEI, los cuales, con la colaboración del personal de la Institución, se desplazan hasta el almacenamiento central, en el centro de acopio, celda de residuos peligrosos, toman los residuos generados en la atención en salud y otras actividades y los llevan hasta el carro transportador dando cumplimiento al Decreto 1609 de 2002 [21], para el transporte de mercancía peligrosa. Para esta actividad el personal de la ruta hospitalaria, cuenta con los elementos de protección personal necesarios para desarrollar esta actividad.

3.3. Desactivación de residuos peligrosos

Los residuos infecciosos son desactivados mediante proceso químico de baja eficiencia con glutaraldehído al 2.5%, en cada una de las áreas donde son generados dentro de la Institución para neutralizar sus características infecciosas. Se depositan en el área del almacenamiento temporal y no mayor a siete (7) días para ser entregados posteriormente a la empresa recolectora. Los residuos cortopunzantes no son desactivados por contar con un recipiente seguro (guardián); estos son sellados con cinta en los bordes de la tapa y así se entregan a la empresa encargada de su recolección.

3.4. Movimiento Interno

La Institución en los espacios de práctica cuenta con áreas destinadas para el almacenamiento temporal de los residuos. La recolección de residuos ordinarios y de reciclaje se inicia primero en forma simultánea. Posterior a ello se realiza la recolección de residuos generados en la atención en salud y otras actividades en forma independiente. La Institución dispone de un lugar adecuado para el almacenamiento, lavado, limpieza y desinfección de los recipientes y demás implementos utilizados. Se cuenta con área independiente para el lavado de implementos de aseo y espacio suficiente para colocar las escobas, traperos, jabones, detergentes y otros implementos usados con el mismo propósito. Un ejemplo de las rutas de evacuación establecidas al interior de la institución se muestra en la Figura 5. Todos los laboratorios cuentan con esta ruta de evacuación para el manejo de residuos.

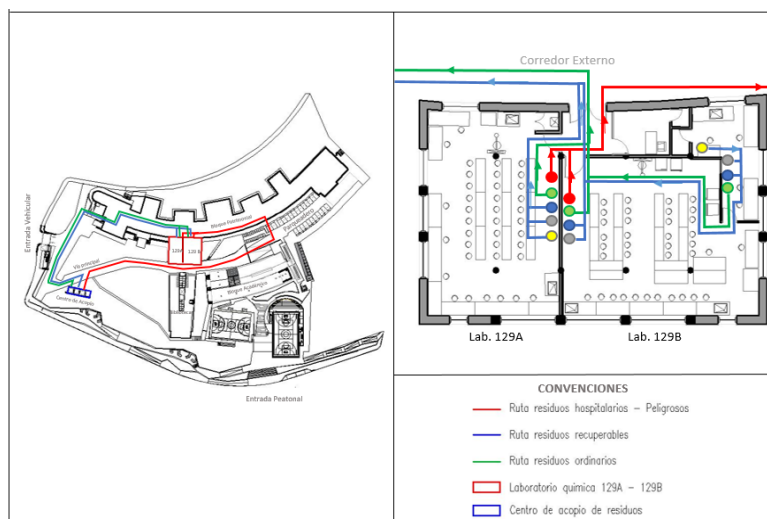


Figura 5. Ruta de evacuación de residuos laboratorio de química

3.5. Almacenamiento intermedio y/o central de residuos

La ubicación del almacenamiento central de la Institución se encuentra en un área retirada de la circulación habitual de la comunidad universitaria, minimizando cualquier posibilidad de contaminación. La Institución solo cuenta con la central de almacenamiento principal, ya que la recolección de los residuos previa desactivación en los lugares generadores de dichos residuos se realiza una vez al día (Menos de 60 kilogramos/día), para posteriormente ser llevados al centro de acopio, dentro de la celda de residuos peligrosos, dentro del espacio señalado para residuos generados en la atención en salud y otras actividades y finalmente ser entregado a la empresa recolectora que realiza la disposición final. Los residuos anatomopatológicos generados se depositan inmediatamente en el congelador ubicado en laboratorio de química y el día destinado para la recolección por parte de la ruta hospitalaria, éstos son entregados por el personal de la central de materiales en bolsa roja.



Figura 6. Manejo interno de los residuos peligrosos - Fuente: IUCMA

El almacenamiento central en el centro de acopio de residuos se encuentra dividido en tres secciones: Una para los residuos ordinarios, otra para residuos peligrosos (biosanitarios – cortopunzantes, anatomopatológico, medicamentos, “químicos”), y otra para residuos reciclables y/o recuperables.



Figura 7. Centro de acopio de residuos - Fuente: IUCMA

3.6. Caracterización y diagnósticos

Para efectos de investigación y análisis de la información obtenida en ésta unidad generadora de residuos (laboratorio ambiental de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería) se identificó la generación anual por cada tipo de reactivo empleado en este espacio de práctica en actividades de docencia e investigación. Para tal fin se verificaron la organización de actividades académicas que allí se realizan, así como el registro de inventarios, programación de prácticas, entrada, salida y rotación de reactivos, la naturaleza de los reactivos, el manejo y disposición transitoria.

En la Tabla 3 se presenta la clasificación con base en el Decreto 4741 de 2005 [20], empleados anualmente en el desarrollo de prácticas de docencia e investigación en el laboratorio ambiental en asignaturas como: química (inorgánica y orgánica), bioquímica, microbiología, diagnóstico de aguas, fisicoquímica e investigación. En estos destaca el consumo y la producción de residuos líquidos con alto contenido de ácidos fuertes, con una producción anual promedio de 2226 ml, etanol con un consumo anual promedio de 11300 ml, 700 ml de hexano y el consumo de acetato de grado comercial y reactivo con una producción superior a los 3257 ml anuales. Con base en el consumo de reactivos de naturaleza sólida destaca la producción anual de residuos de naturaleza básica con el sodio como principal constituyente mediante el consumo de cloruro de sodio (897 gramos), hidróxido de sodio (614.7 gr) y tiosulfato de sodio (297 gr). Al considerar las cantidades antes mencionadas, si bien no son alarmantes, es importante indicar que, desde el punto de vista ambiental, incluso bajas concentraciones de materiales peligrosos pueden alterar las condiciones de los ecosistemas reflejado en la contaminación de los cuerpos de agua (subterráneas, fuentes hídricas, entre otras), la contaminación del suelo y del aire, causada por la disposición inadecuada de los residuos químicos y peligrosos, además de los efectos que puede presentar sobre la salud.

Tabla 3. Caracterización de los residuos con base en el Decreto 4741 de 2005 [20]

Decreto 4741 de 2005	Cantidad anual promedio en gr	Cantidad anual promedio en ml
Grupo I: Disolventes Halogenados	-	-
Grupo II: Disolventes no Halogenados		16215.4
Grupo III: Disoluciones Acuosas con Metales Pesados		0.62
Grupo III: Disoluciones Acuosas libre de Metales Pesados		127.6
Grupo IV: Ácidos	36	2308.75
Grupo V: Aceites	-	-

Decreto 4741 de 2005	Cantidad anual promedio en gr	Cantidad anual promedio en ml
Grupo VI: Sólidos orgánicos	274.9	
Grupo VI: Sólidos inorgánicos	3647.5	
Grupo VII: Especiales	-	-

Con base en lo antes mencionado, se resalta la producción de residuos con naturaleza ácida, en este caso considerando tanto el consumo de ácidos fuertes y ácidos orgánicos se cuenta con una generación de residuos anualmente con una carga de 2308.75 ml de ácidos, de igual manera es considerable la generación de solventes no halogenados (16 litros anuales aproximadamente) y una gran cantidad de sólidos inorgánicos (3647.5 gr anuales) representada en residuos con metales como: aluminio, bario, calcio, cobre, hierro, mercurio, cobre, manganeso, magnesio, plata, potasio, sodio y zinc. A partir de lo anterior, si se tiene presente que algunos de estos sólidos inorgánicos constituyen metales pesados, después de su consumo generan soluciones acuosas con cargas de cromo, cobre, mercurio y zinc representando las siguientes cantidades (Tabla).

Tabla 4. Cantidad de metales pesados en la producción anual de residuos

REACTIVO	TOTAL promedio anual - masa en gr
Cobre en polvo	14.5
Cobre Metálico	1.5
Mercurio Sulfato	33.3
Potasio Cromato	5.82
Potasio Dicromato	14.32
Zinc en Metálico Granallas	7.75
Zinc en polvo	10.5
TOTAL ANUAL	87.69

Tabla 5. Caracterización de los residuos con base en su naturaleza

Naturaleza de reactivos	TOTAL promedio anual - masa en gr	TOTAL promedio anual - volumen en ml
Carburantes		700
Metales	181.1	
Solvente Orgánico	6.25	15543
Corrosivos		2280.4
Oxidantes	21.14	
Clorados	1354.5	

3.7. Reciclaje por precipitación

Dada la gran cantidad de residuos de acetato producidos anualmente en el laboratorio ambiental (3257 ml apróx.) y de ácido sulfúrico (1173 ml), dichas soluciones principalmente acuosas, se han logrado neutralizar, promoviendo su tratamiento mediante el siguiente mecanismo químico,

en el cual se establece el siguiente equilibrio: $\text{CH}_3\text{COONa} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{Na}^+$, $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{HSO}_4^- + \text{H}^+$; $\text{CH}_3\text{COONa} + \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CH}_3\text{COOH} + \text{NaHSO}_4$.

A partir de esta reacción química y las consideraciones técnicas, de temperatura y catálisis pertinente, se lograron producir cerca de 740gr de bisulfato de sodio (un rendimiento cercano al 38%) con el cual se contempla la posibilidad de emplearlo en jardinería para el control de plagas¹, sin embargo, sería objeto de estudio su peligrosidad para las plantas y el suelo. En el momento, su comportamiento ácido (genera ácido sulfúrico en solución acuosa) se emplea para disminuir el pH de residuos con naturaleza alcalina previo a su inactivación y disposición final mediante mecanismos de inmovilización en morteros de concreto.

El método se puede ampliar para la neutralización de ácidos fuertes y la formación de complejos con ácidos orgánicos.

3.8. Estrategias para la minimización de residuos

Para tal fin se establecen algunos principios de la "microquímica": método empleado para la optimización de los reactivos empleados en el desarrollo de prácticas de laboratorio, en las que con pequeñas cantidades de materiales se pueden lograr los propósitos iniciales. Para evaluar dicha estrategia se reestructuran las guías de laboratorio, con el propósito de emplear menor cantidad de reactivos en cada una de las prácticas sin afectar los propósitos académicos y los procedimientos en cada caso.

Es de aclarar que el consumo de reactivos y por ende la producción de residuos también depende de la rotación de grupos, la cantidad de estudiantes por sesión y en general la programación académica y el porcentaje de ocupación de las unidades generadoras. Se debe considerar además que en algunos casos el consumo de reactivos no sólo obedece al desarrollo de prácticas académicas, pues en estos espacios se desarrollan actividades de investigación para las cuáles no es posible determinar una cantidad específica de reactivo a emplear.

Tabla 6. Porcentaje de reducción de consumo y de generación anual de los residuos generados en el laboratorio ambiental

REACTIVO	Cantidad total anual CANTIDAD MASA (gr)			Porcentaje de reducción	Cantidad total anual CANTIDAD VOLUMEN (ml)			Porcentaje de reducción
	2016	2017	2018		2016	2017	2018	
Acetona	-	-	-		1380	390.4	50.42	87%
Ácido Clorhídrico	-	-	-		1930.14	245	753	61%
Ácido nítrico	-	-	-		120	100	10	90%
Ácido Sulfúrico	-	-	-		1684	1120	717.7	36%
Aldehído Benzóico	-	-	-		120	230.8	170.9	26%
Amonio Hidróxido	-	-	-		71.5	40	50	30%
Dióxido de Manganeso	14	8	1	88%	-	-	-	
Etanol 96% industrial	-	-	-		-	14220	4700	67%
Etanol	-	-	-		2620	1480	1420	4%
Éter Etilico	-	-	-			230	15	93%
Hexano	-	-	-		450	1000	650	35%
Hierro III Cloruro	-	132	4	97%	-	-	-	
Hierro III Sulfato	7.5	-	3.73	50%	-	-	-	

¹ Dado que es tóxico para el control de plagas de *Acanthaster planci*.

REACTIVO	Cantidad total anual CANTIDAD MASA (gr)			Porcentaje de reducción	Cantidad total anual CANTIDAD VOLUMEN (ml)			Porcentaje de reducción
Magnesio Sulfato	134.5	261.1	172.87	34%	-	-	-	
Mercurio Sulfato	33.3	-	-	100%	-	-	-	
Plata Nitrato	10.1	55	23.1	58%	-	-	-	
Plata Sulfato	5.5	10.1	5.5	46%	-	-	-	
Potasio Cloruro	81	102.25	91	11%	-	-	-	
Potasio Dicromato	16.88	-	11.76	30%	-	-	-	
Potasio Yoduro d	1.94	12.53	2.63	79%	-	-	-	
Sodio Cloruro	729	1493.8	469.125	69%	-	-	-	
Sodio Hidróxido	156	1424	264.21	81%	-	-	-	

3.9. Métodos de encapsulamiento e inmovilización

Mediante este proceso el residuo es incorporado a un material que lo aísla del ambiente, sin que los componentes del residuo se fijen químicamente al material utilizado. En éste caso se empleó como material de encapsulamiento el concreto. Para tal fin se prepararon 6 muestras en morteros de tres partes de arena, una parte de cemento y media parte de cal (relación de 3:1:1/2) empleando un molde estandarizado de corte diagonal de bronce de 50mm (cubos de 5 cm de lado). (Ver Figura 8).

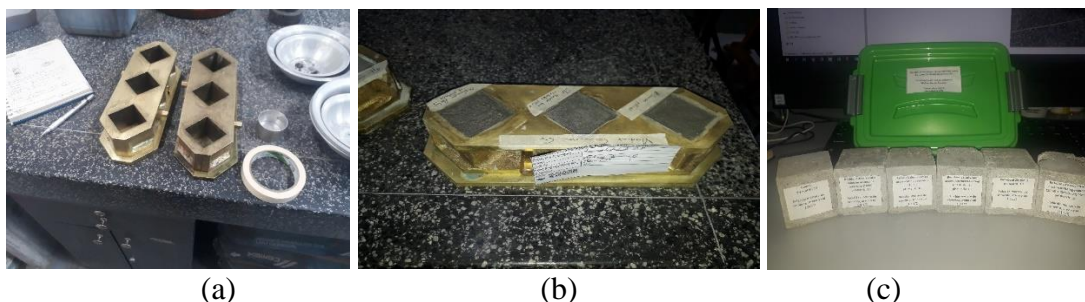


Figura 8. Preparación de morteros para prueba de inmovilización de residuos (a) molde estandarizado ASTM C87 – H2823 (b) conformación de morteros de cemento y cal (c) muestras de mortero con residuos

Tabla 7. Conformación de morteros para prueba de inmovilización de residuos peligrosos

Mortero	Residuos inmovilizados	Volumen de residuo	pH inicial	Laboratorio de suelos y materiales Temperatura: 24°C Humedad R. : 67%
1	Mortero de prueba (blanco) sin residuos	N/A	12	
2	Solución acuosa con residuos de mercurio	10ml	10	
3	Residuos de solventes orgánicos halogenados	10ml	10	
4	Residuos de permanganato de potasio (KMnO ₄)	5ml	11	
5	Residuos de solución acuosa sin metales	20ml	1	
6	Residuos de solventes orgánicos halogenados + solución (4ml) de KMnO ₄ al 2%	10ml	10	

3.10. Prueba FTIR

Es importante recordar lo que describe Fuhrmann [22] “las tecnologías de encapsulamiento pueden implicar una combinación de encerramiento físico a través de la solidificación y la estabilización química con la precipitación, adsorción u otras interacciones”. En

este sentido, las matrices procesadas se someten a pruebas de Transformación de Fourier del Espectro de Infrarrojos (FTIR) con el fin de determinar las posibles interacciones de los grupos funcionales remanentes en el mortero.

La Figura 9a muestra la prueba para el mortero sin residuos. Los alargamientos entre los 3400 cm⁻¹ y los 3600 cm⁻¹ corresponden a enlaces de grupos hidroxilo (OH) debido a las fases acuosas del mortero y de los residuos. Las vibraciones alrededor de los 1000 cm⁻¹ corresponde a los silicatos, la zona cercana a los 1500 cm⁻¹ corresponde a la presencia de carbonatos y en los alargamientos inferiores a los 1000 cm⁻¹ representa la presencia de enlaces Al – O.

La Figura 9b muestra la prueba para el mortero con los residuos de solventes orgánicos halogenados. La aparición de vibraciones en el espectro entre los 1400 -1500 cm⁻¹ están indicando tensiones C – H, al igual que las vibraciones cercanas a los 3000 cm⁻¹ confirman la presencia de compuestos hidrocarbonados, se puede establecer además la presencia de compuestos carbonílicos debido a los alargamientos entre los 900 cm⁻¹ y 1100 cm⁻¹, las vibraciones cercanas a los 500 cm⁻¹ pueden corresponder a la presencia de halogenuros. No se logran identificar tensiones y vibraciones que indiquen la presencia de compuestos aromáticos.

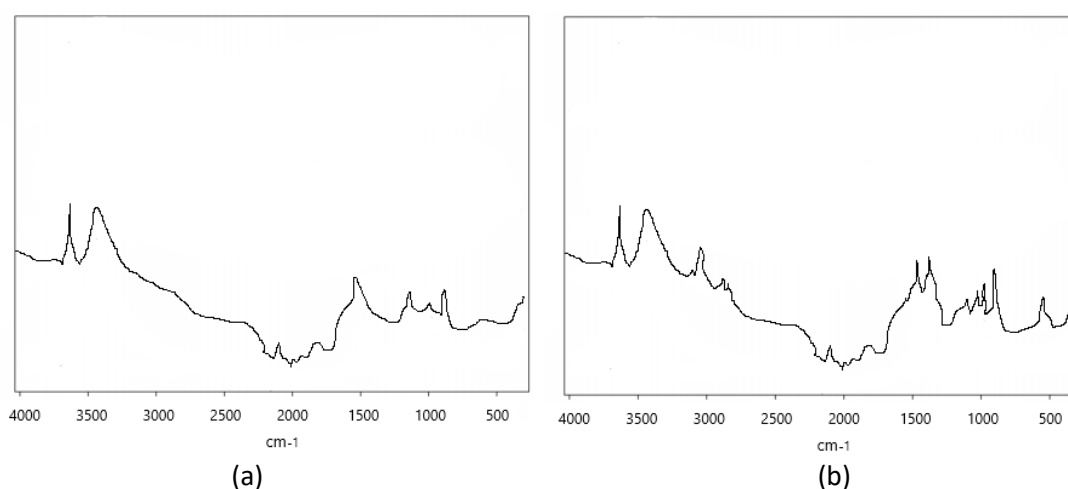


Figura 9. Pruebas de FTIR para el mortero (a) sin residuos y (b) con residuos de solventes orgánicos halogenados

La hidratación del cemento por parte de las soluciones acuosas de los residuos peligrosos fijados y/o solidificados, favorecen la formación de estructuras cristalinas de silicatos, adicionalmente, las condiciones de pH elevado permiten la formación de hidróxidos y carbonatos en el proceso de estabilización química, con lo que se reduce la movilidad de los residuos y la posible generación de lixiviados.

4. Conclusion

Este artículo presentó la formulación de estrategias que permiten el planteamiento de soluciones integradas que mitiguen el riesgo latente que representan los residuos peligrosos en los lugares de práctica académica. Se consideró cuantificar la generación de residuos en las unidades de análisis de diferentes espacios de experimentación y evaluar los factores que intervienen en la implementación de estrategias para el diagnóstico, aprovechamiento, tratamiento y disposición final de los residuos. Mediante el proceso de reciclado por precipitación es posible neutralizar una cantidad considerable de la corriente ácida y la correspondiente producción de bisulfato de sodio para un posible uso en jardinería para el control de plagas. Mediante las estrategias de minimización se logra optimizar el uso de reactivos como acetona, HCl, HNO₃, etanol, éter etílico, sulfato de mercurio, potasio yoduro, cloruro e hidróxido de sodio, entre otros, con reducciones en el consumo superiores al 60%. Es una alternativa económica y ambientalmente viable dada la naturaleza de los programas académicos de la institución. En el contexto internacional a partir de los antecedentes analizados, es común la implementación de estrategias que conduzcan a la minimización de residuos mediante políticas que promuevan el uso de sustancias con menos grados de peligrosidad en actividades académicas, en éste mismo

sentido en los últimos años en la organización de actividades académicas en programas de educación superior viene siendo relevante el principio de sostenibilidad en la programación de prácticas de laboratorio a partir de mecanismos que impliquen un menor consumo de reactivos.

Mediante estrategias de inmovilización se logra la inactivación y encapsulamiento de residuos constituidos por metales pesados y compuestos orgánicos halogenados semivolátiles y no volátiles, se debe evaluar el comportamiento de residuos orgánicos volátiles inmovilizados en matrices de concreto mediante las técnicas de análisis termogravimétricos que permitan evaluar la cantidad y cinética en el cambio de la cantidad de materia en función de los cambios de temperatura y el tiempo con el fin de analizar la estabilidad térmica y la disminución de la masa por efectos de la descomposición de los residuos en los morteros constituidos por acción de procesos de oxidación, absorción, desorción, evaporación, entre otros. Para evaluar la efectividad del método de encapsulamiento es importante determinar su grado de resistencia ante el contacto con agentes lixiviantes como el agua. En las pruebas de análisis FTIR, la ausencia de tensiones y vibraciones que indiquen la presencia de compuestos aromáticos demuestran una probable volatilización de este tipo de compuestos y la baja efectividad del método para la incrustación e inmovilización de residuos con componentes de esta naturaleza. Para la disposición final de los residuos peligrosos generados en espacios de práctica en instituciones universitarias es importante tener presente las disposiciones normativas en el orden local, regional, nacional e internacional, al igual que las consideraciones como el conocimiento de los residuos que se pretenden descartar (por la presencia de residuos "huérfanos y mixtos"), éstos no deben estar clasificados como explosivos, no deben estar constituidos por componentes tóxicos y no pueden presentar comportamientos radiactivos.

References

- [1] C. J. Galvis, "Manual para el Manejo de los Residuos Químicos y Peligrosos de la Universidad Pedagógica Nacional," Bogotá, Colombia, 2009.
- [2] A. C. Mera Benavides, B. Adrade Vivas, and M. F. Ortiz Sarria, "Alternativa para la segregación de residuos químicos generados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca," *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 2, no. 1, pp. 54–66, 2007.
- [3] C. A. Arias Villamizar, "El uso de nuevas tecnologías en los laboratorios de química y la minimización del impacto sobre la salud y el medio ambiente," in *II Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 2009, pp. 1–12.
- [4] F. A. López Gómez and A. López-Delgado, "Solidificación / Estabilización de residuos orgánicos mediante granulación con sepiolita," *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 41, no. 3, pp. 305–309, 2002.
- [5] F. Ruiz Beviá, J. L. Fernández Sempere, R. Salcedo Díaz, and P. García Algado, "Estudio de la capa de polarización durante el proceso de ósmosis inversa Equipo experimental para visualizar la formación de la capa," *Ing. química*, ISSN 0210-2064, N^o. 431, 2006, págs. 147-154, no. 431, pp. 147–154, 2006.
- [6] M. Massera, ; Héctor Piñeda, N. Reartes, and C. Bologna, "Gestión Integral de Residuos Peligrosos en la Universidad Nacional de Río Cuarto," in *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 1998, pp. 1–18.
- [7] I. Águila Hernández and et al., "Propuesta de Programa para mejorar la seguridad y minimizar el vertimiento de residuos en laboratorios químicos de la UCLV," *Rev. Cuba. Química*, vol. 17, no. 3, pp. 108–116, 2005.
- [8] M. Colmenares, A. Correia, D. S. C., and B. Díaz, "Relación beneficio - costo de un plan de manejo de sustancias descartadas desde una perspectiva ambiental caso. Laboratorio de Fisicoquímica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.," *Rev. Faces*, 2003.
- [9] L. Bertini and D. Cicerone, "Gestión de Residuos Generados en Laboratorios de Enseñanza de la Química de Entidades Universitarias," in *Primer Congreso de Fomento e Innovación con nuevas tecnologías en la Docencia de la Ingeniería*, 2009, p. 237.
- [10] J. E. Estrada Alarcon, "Tratamiento de residuos químicos peligrosos generados en los laboratorios de la Facultad de Química e Ingeniería Química de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos," Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2011.
- [11] J. C. Mora Barrantes, G. Piedra Marín, D. Benavides Ramírez, and C. Ruedert Ruedert, "Clasificación de reactivos químicos en los laboratorios de la Universidad Nacional," *Rev. Tecnol. en Marcha*, vol. 25, no. 3, Nov. 2012.
- [12] L. S. Vaca Álvarez, "Elaboración del manual para el adecuado manejo de residuos químicos peligrosos en la Facultad de Ciencias Químicas," Universidad Central de Ecuador, 2012.
- [13] S. Castañeda, "Uso de un proceso fotocatalítico para la degradación de contaminantes orgánicos presentes en aguas residuales provenientes de laboratorios clínicos," Universidad Nacional de

- Colombia, 2016.
- [14] et al Riascos, "Propuesta para el Manejo de Residuos Químicos en los Laboratorios de Química de la Universidad de Nariño," Universidad de Manizales, 2015.
- [15] D. L. Arias Ortíz and V. E. Pizza Londoño, "Evaluación de la degradación del ácido 3,5-dinitrosalicílico mediante fotocatalisis homogénea en un reactor de recirculación y reactor solar CPC de la Escuela de Química de la Universidad Tecnológica de Pereira," Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [16] J. A. Vera Solano, "Tratamientos de evaporación para la reducción de residuos químicos generados en los laboratorios de química general de la Universidad de Pamplona.," *Cuad. Act.*, vol. 6, pp. 88–97, 2014.
- [17] L. D. Mejía and A. N. Ardila, "Metodología para la segregación de residuos químicos generados en el laboratorio de bioquímica y nutrición animal del Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.," *Prod. + Limpia*, vol. 7, no. 1, pp. 68–79, 2012.
- [18] A. García Jerez, "Protocolo de rutas de transporte y disposición final de residuos químicos peligrosos, generados en los laboratorios de la escuela de química. Universidad Industrial de Santander," Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [19] A. E. Bernal Nieves, "Contribución al sistema de gestión ambiental para el adecuado manejo de residuos sólidos químicos generados en el campus de la Universidad Nacional - Sede Bogotá.)," Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [20] Presidencia de la República de Colombia, "Decreto 4741 de 2005 | Secretaría Distrital del Hábitat," 2005. [Online]. Available: <https://www.habitatbogota.gov.co/decreto-4741-2005>. [Accessed: 19-Jul-2019].
- [21] Presidencia de la República de Colombia, "Decreto 1609 de 2002," 2002. [Online]. Available: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=6101>. [Accessed: 19-Jul-2019].
- [22] M. Fuhrmann, D. Melamed, P. D. Kalb, J. W. Adams, and L. W. Milian, "Sulfur polymer solidification/stabilization of elemental mercury waste.," *Waste Manag.*, vol. 22, no. 3, pp. 327–33, 2002.
-