



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Diseño de un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador

Túqueres León, Jessica Liseth

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Maestría en Sistemas de Gestión Ambiental

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magíster en Sistemas de Gestión Ambiental

Ing. Haro Robayo, Margarita Del Pilar, Mgtr.

27 de octubre del 2022

Reporte de verificación de contenido



TESIS_JESSICA TUQUERES 08Jun22 r2.docx

Scanned on: 16:40 June 10, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	307
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	0
Omitted Words	1752



Escaneado y certificado por:
MARGARITA DEL
PILAR HARO
ROBAYO



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: “Diseño de un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador” fue realizado por la señorita Túqueres León, Jessica Liseth; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 27 de Octubre del 2022

Firma:

Haro Robayo, Margarita del Pilar

Director

C.C.: 1802278067



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Responsabilidad de Autoría

Yo Túqueres León, Jessica Liseth, con cédula de ciudadanía n° 1718325127, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: “Diseño de un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador” es de mí autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 27 de Octubre del 2022

Firma

Túqueres León, Jessica Liseth

C.C.: 1718325127



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Autorización de Publicación

Yo Túqueres León, Jessica Liseth, con cédula de ciudadanía n° 1718325127, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “Diseño de un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 27 de Octubre del 2022

Firma

Túqueres León, Jessica Liseth

C.C.: 1718325127

Dedicatoria

Al forjador de mi camino, a mi Padre Celestial, por ser mi roca y mi fortaleza.

A mis padres quienes con su ejemplo y valores han sido la guía y el camino para lograr esta meta en mi vida profesional.

A mi novio por su apoyo incondicional en el transcurso de esta maestría.

Agradecimientos

A todo el personal de ALS ECUADOR S.A. que de alguna u otra manera colaboraron en la realización del presente trabajo, especialmente el Dr. Miguel Maliza por sus invaluable consejos.

A mi tutora Ing. Margarita Haro por su guía y paciencia.

A mis padres y amigos por sus consejos e ideas para la elaboración del presente trabajo.

Tabla de Contenidos

Resumen.....	13
Abstract.....	14
Capítulo I.....	15
Generalidades.....	15
Antecedentes.....	15
Planteamiento del problema.....	17
Macro.....	17
Meso.....	18
Micro.....	20
Objetivos del proyecto.....	20
Objetivo general del proyecto.....	20
Objetivos específicos del proyecto.....	21
Justificación, importancia y alcance del proyecto.....	21
Pregunta de investigación.....	22
Hipótesis de investigación.....	22
Categorización de las variables de investigación.....	23
Variable independiente.....	23
Variable dependiente.....	23
Marco teórico referencial.....	23
Marco Legal.....	23
Marco Epistemológico.....	24

Marco Conceptual.....	31
Trabajos relacionados.....	32
Capítulo II.....	37
Origen de los efluentes de ALS Ecuador.....	37
Cantidad de residuos generados según su tipo.....	38
Capítulo III.....	39
Diseño experimental aplicado.....	39
Toma de muestras y ensayos de neutralización-precipitación en el laboratorio.....	40
Equipos, materiales y reactivos químicos.....	40
Procedimiento para la toma de muestras y pruebas de neutralización-precipitación ..	41
Caracterización química de los residuos líquidos peligrosos.....	48
Resultados obtenidos de metales pesados, pH, temperatura y reactivos químicos utilizados.....	48
Capítulo IV.....	51
Diseño y construcción del prototipo del reactor químico.....	51
Construcción del de reactor químico.....	51
Diseño del reactor.....	51
Diseño del agitador.....	54
Potencia del motor.....	58
Selección del material de construcción.....	63
Capítulo V.....	64
Ensayos de neutralización y precipitación en el reactor químico.....	64

Equipos, materiales y reactivos químicos.....	64
Procedimiento para la toma de muestras y pruebas de neutralización-precipitación	65
Diseño general de la planta piloto	66
Resultados obtenidos mediante el tratamiento de neutralización - precipitación	67
Evaluación de metales pesados y porcentaje de remoción	67
Evaluación del peso final del lodo filtrado.....	68
Capítulo VI	68
Diseño del Sistema de Tratamiento Físico-químico para ALS Ecuador	68
Análisis del costo de tratamiento por litro	68
Cálculo de las dimensiones de la planta de tratamiento	69
Parámetros de diseño	69
Condiciones de operación.....	75
Propuesta arquitectónica.....	76
Capítulo VII	77
Conclusiones.....	77
Recomendaciones.....	78
Revisión bibliográfica.....	79
Apéndice	84

Índice de Tablas

Tabla 1	Cantidad de residuos peligrosos generados por año	38
Tabla 2	Resultados obtenidos en los ensayos de neutralización-precipitación	49
Tabla 3	Relación de Reynolds en función de la velocidad de agitación	60
Tabla 4	Comparación de resultados con normativa ambiental y porcentaje de remoción de contaminantes.....	67
Tabla 5	Costo aproximado del tratamiento por litro de desecho	69
Tabla 6	Relación de Reynolds en función de la velocidad de agitación	73

Índice de Figuras

Figura 1	Agitadores para viscosidades moderadas	30
Figura 2	Agitadores para viscosidades altas.....	30
Figura 3	Diseño experimental.....	39
Figura 4	Dimensiones del reactor químico.....	54
Figura 5	Dimensiones del agitador	57
Figura 6	Número de potencia para tres valores de Reynolds	61
Figura 7	Diseño del reactor químico de 20 litros	66
Figura 8	Número de potencia para tres valores de Reynolds	74
Figura 9	Dimensiones de la propuesta de reactor químico	76

Resumen

Se determinó un procedimiento para lograr la neutralización y precipitación de los metales pesados presentes en los residuos líquidos ácidos provenientes de los ensayos químicos de los laboratorios ambientales, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador mediante una serie de prácticas realizadas a escala de laboratorio con el objetivo de descargar el agua tratada al alcantarillado y el lodo formado entregar al gestor ambiental. Una vez que todos los metales cumplieron con la normativa ambiental se diseñó y construyó un prototipo de reactor químico tipo batch de acero galvanizado con capacidad para tratar 20 litros, impulsor tipo turbina y agitación automática en donde se puso en marcha la metodología de tratamiento definida. Los resultados obtenidos cumplieron con los límites máximos permisibles a excepción del Aluminio. Debido a que el Aluminio siempre tuvo una remoción mayor al 90% en todas las pruebas realizadas a nivel de laboratorio, la alta concentración obtenida en el reactor se debió al material del equipo, ya que contenía recubrimientos de aluminio, mas no al procedimiento determinado. Posteriormente, se hizo un análisis de costos mediante el cual se calculó un ahorro económico en gestión de residuos de \$0,43/litro. Finalmente, se diseñó un reactor tipo batch con capacidad de 100 litros considerando la cantidad que genera el laboratorio en estudio por semana, proponiendo que se realice el tratamiento 1 vez al mes.

Palabras clave: residuos líquidos ácidos, metales pesados, neutralización, precipitación, reactor batch.

Abstract

A procedure was determined to achieve the neutralization and precipitation of heavy metals present in acidic liquid residues from chemical tests of environmental laboratories, taking ALS Ecuador as a case study, through a series of practices carried out on a laboratory scale with the objective of discharging the treated water to the sewage system and the sludge formed to be delivered to the environmental manager. Once all the metals complied with the environmental regulations, a batch-type chemical reactor prototype of galvanized steel with a capacity to treat 20 liters, turbine-type impeller and automatic agitation was designed and built, where the defined treatment methodology was put into operation. The results obtained complied with the maximum permissible limits with the exception of Aluminum. Due to the fact that Aluminum always had a removal greater than 90% in all the tests carried out at the laboratory level, the high concentration obtained in the reactor was due to the material of the equipment, since it contained aluminum coatings, but not to the determined procedure. Subsequently, a cost analysis was carried out, through which an economic saving in waste management of \$0.43/liter was calculated. Finally, a batch type reactor with a capacity of 100 liters was designed considering the amount generated by the laboratory under study per week and proposing that the treatment be carried out once a month.

Keywords: acid liquid waste, heavy metals, neutralization, precipitation, batch reactor.

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

Solamente en los últimos 20 años, en el ámbito internacional, se ha reconocido como un problema prioritario el manejo de los residuos químicos. Los diferentes acontecimientos y desastres ambientales relacionados con estos residuos han suscitado el establecimiento de sistemas de control. Así, por ejemplo, Japón fue uno de los primeros países en establecerlo como acto seguido al incidente de Minamata, el cual ocasionó varias muertes en los años 60 debido al consumo de pescado contaminado con residuos de mercurio vertidos al mar (Ossa, 2007).

En el Ecuador, a partir de la publicación del Acuerdo Ministerial 061 del 04 de mayo del 2015, las leyes ambientales han adquirido mayor peso en el sector industrial, por lo que las empresas se ven obligadas a que sus actividades productivas no generen impactos ambientales negativos y cumplan con las normas legales; en ese sentido, los laboratorios ambientales juegan un papel importante, ya que los mismos al ofrecer servicios analíticos y de medición tienen la facultad de establecer cumplimientos de parámetros ambientales para evaluar el desempeño de un proyecto, obra o actividad. Por este motivo, esta actividad comercial ha crecido durante los últimos años, y de acuerdo al Servicio de Acreditación Ecuatoriano (SAE) para el año 2020 el país cuenta con 125 laboratorios de ensayo de los cuales el 50% se encuentran en Quito.

De acuerdo a lo expuesto, un laboratorio ambiental se encarga de realizar tomas de muestras de aguas, suelos, sedimentos, entre otros, en donde utiliza productos químicos que deben tener un correcto almacenamiento y manejo, sin embargo, justamente ésta es una de las grandes falencias de este tipo de actividades. Por cuanto, pese a que en junio de 2006 Bolivia, Colombia, Ecuador y Perú se reunieron para la elaboración de un Plan Subregional Andino para la Prevención y Respuesta a Emergencias por productos Químicos Peligrosos y Materiales Radioactivos, cuyo objetivo era promover la prevención de los accidentes con productos

químicos peligrosos y la reducción de los efectos adversos de dichos accidentes sobre la salud y el ambiente, los accidentes por estas sustancias químicas han seguido ocurriendo.

En tal sentido, es sumamente importante contar con sistemas de gestión integral de residuos peligrosos para las entidades generadoras, en donde considerando el concepto de priorizar el tratamiento, se ha visto como alternativa tratar las descargas líquidas peligrosas en la fuente para mejorar el cuidado al medio ambiente y evitar la entrega de los mismos a un gestor ambiental, de modo que se haga realidad el principio de responsabilidad social que deben poner en práctica todas las empresas, instituciones y por supuesto los laboratorios de análisis químico. Por tanto, “Los tratamientos más utilizados para los residuos químicos peligrosos son neutralización, incineración, recuperación, reutilización-reciclado, en donde la neutralización es el más recomendable para residuos peligrosos y no peligrosos” (Berrio, Beltrán, Agudelo, & Cardona, 2012).

Por ejemplo, en los laboratorios de: Biotecnología Ambiental, Aguas y Residuos Ambientales y Química Ambiental pertenecientes al área académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle-Colombia, usando reactivos se logró la precipitación de metales de los residuos líquidos de las pruebas de DQO en donde el Cr (VI) fue reducido químicamente en una hora, hasta Cr (III) utilizando glucosa (Mañuga, Gutiérrez, Rodríguez, & Villarreal, 2010).

Por otro lado, en la Universidad Central del Ecuador se realizó una investigación con los residuos químicos peligrosos generados en el laboratorio ambiental de la OSP,” empleando HCl para la neutralización de las bases al 25% alcanzando valores de pH de alrededor de 7, es decir lo requerido para la descarga, y en el caso de los residuos ácidos utilizó Hidróxido de Calcio” (Vaca, 2012).

Finalmente, en el laboratorio de calidad de aguas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en Argentina se diseñó una propuesta de tratamiento y disposición final de los residuos químicos generados, aplicando tratamientos de separación,

aislamiento y desactivación mediante la precipitación, destilación y neutralización con hidróxido de sodio cumpliendo con la normativa ambiental para metales como: hierro, cobre, manganeso, zinc, arsénico, cadmio y plomo (Flores, Valladares, & Villegas, 2013).

Planteamiento del problema

Macro

Las instituciones educativas y las empresas de servicios que cuentan con laboratorios de química o afines, para realizar experiencias de laboratorio o análisis químicos como parte de los servicios prestados a terceros, requieren al igual que las empresas productivas, de una gestión y un adecuado manejo de sus residuos químicos (Loayza, 2005).

Si bien es cierto, todos los laboratorios ambientales particulares deberían contar con un sistema de gestión de residuos químicos peligrosos, muy pocos son los que llevan este procedimiento documentado; sin embargo, los laboratorios pertenecientes a universidades ponen mayor énfasis en el tema.

Por ejemplo, de acuerdo a una investigación realizada en el 2009, las universidades de Estados Unidos tienen en su totalidad, planes de gestión de residuos bien especificados y detallados, mientras que las universidades latinoamericanas tienen una variedad muy grande de escenarios para la gestión de residuos: algunas carecen de dichos planes y otras lo están recién implementando (Bertini & Salvador, 2009).

De acuerdo a lo mencionado, la gestión que se realiza para el manejo de residuos peligrosos está más ligada a países desarrollados debido a que cuentan con el presupuesto e infraestructura para su manejo, a diferencia de los países en vías de desarrollo. Es por esto que se realizan disposiciones inadecuadas, las cuales son letales y de gran impacto tanto para el medio ambiente como para la salud pública (Castillo A. , 2016).

“Los residuos especiales y peligrosos en Latinoamérica generalmente se mezclan con los ordinarios municipales, dada la falta de control de las autoridades por la carencia de recursos

humanos, físicos y financieros” (Vega, 2016), sin embargo, se debe considerar que “La complejidad de estos residuos contribuyen también a la incorrecta gestión, ya que presentan mayor dificultad a la hora de tratarlos por la dificultad para identificar sus constituyentes, en comparación con los residuos líquidos industriales o aguas residuales domésticas” (Berrio, Beltrán, Agudelo, & Cardona, 2012).

En ese sentido, el escenario en Latinoamérica respecto a tratamientos de residuos peligrosos es poco alentador, por ejemplo, en el año 2016, en “Colombia se generaron 305.216,2 toneladas de residuos peligrosos, de estas el 39% fueron gestionadas, adecuadamente, el 32% aprovechadas y el 28% restante llegó a los basureros sin ningún tipo de tratamiento” (Beleño, 2018).

De igual manera, en los laboratorios destinados a la docencia en la facultad de Ciencias Químicas de la UNAN-León en Nicaragua, no se cuentan con procedimientos adecuados para la eliminación de sustancias químicas que resultan de las diferentes operaciones, por lo que actualmente, los residuos peligrosos son desechados al basurero o al desagüe sin ningún tratamiento previo, lo que constituye una evidente fuente de contaminación (Altamirano, Gómez, & González, 2019).

Por tal motivo, no es de sorprenderse que los accidentes ambientales ocasionados por los residuos líquidos químicos tales como derrames, pueden llegar a suelos y ríos, contaminándolos con altas concentraciones de metales pesados ocasionando daño a los ecosistemas acuáticos y a la población que llegue hacer uso de esos cuerpos de agua, ya sea para riego o consumo humano debido a las características de toxicidad que adquieren.

Meso

“Uno de los principales problemas ambientales en el Ecuador es la falta de concientización en el manejo de desechos peligrosos” (Moyano, 2017). El desarrollo de la actividad industrial ha ocasionado un incremento en la generación de residuos tóxicos, los cuales

afectan tanto al ambiente como a la salud de las personas que se encuentran en contacto con ellos o están relacionadas con su manejo.

En nuestro país, son pocos los laboratorios ambientales que tratan sus residuos químicos peligrosos o que al menos cuentan con un manual para el adecuado manejo de los mismos, ya que en muchas ocasiones el trabajo no se concluye como es el caso de la Universidad Central del Ecuador que “Se conoce que ocasionalmente hubo profesores interesados en dar a los residuos un tratamiento adecuado; entre ellos se incluía la recuperación de disolventes para su reutilización, actividad actualmente suspendida al entrar la facultad en régimen semestral desde el año 2010” (Vaca, 2012).

De igual manera, se realizó un estudio de riesgos en la planta piloto de Tecnología de Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Central del Ecuador, encontrando que al no contar con un manual de procedimientos donde se especifique la manera adecuada de trabajo, se han producido ciertos accidentes, causados fundamentalmente, por la impericia (y en algunos casos negligencia personal) durante el transcurso de las prácticas (Vaca, 2012).

Mientras que el “Laboratorio OSP en 1990, empieza a recuperar la plata de los residuos de argentometría, dado el alto valor de este metal precioso, procedimiento actualmente en desuso” (Vaca, 2012).

Por otro lado, el Instituto Nacional de Pesca ubicado en Guayaquil durante los análisis realizados en los laboratorios de alimentos, química de alimentos, metales pesados, cromatografía, microbiología y ensayos de productos acuícolas genera de una u otra manera algún tipo de residuo químico que se lo ha dejado en segundo plano y muy poco se ha trabajado en este campo. Se planteó una propuesta de manejo de residuos químicos líquidos que incluye: procedimiento de manejo, cumplimiento legal, formación del equipo de manejo de residuos, técnicas de manejo de residuos, indicadores, requisitos para la contratación de gestores ambientales para el transporte y disposición

final de residuos; sin embargo, no se busca un tratamiento para estos residuos, lo que no representa una solución total al problema (Paredes, 2012).

Finalmente, en el laboratorio de química orgánica de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo constantemente se generan residuos líquidos orgánicos que no poseen una correcta disposición que facilite una futura reutilización, ni cuentan con un tratamiento previo a su eliminación. En muchas ocasiones, estos residuos son almacenados de forma inadecuada y en otras, incluso son descargados en el sistema de drenaje común sin ningún tipo de precaución, convirtiendo a la ESPOCH en una fuente permanente de contaminación ambiental (Urgiléz, 2018).

Micro

En el caso de ALS Ecuador, se lo ha identificado como uno de los mayores y más diversificados proveedores de servicios analíticos. ALS posee laboratorios estratégicamente ubicados alrededor del mundo, operando en más de 350 locaciones en 55 países a lo largo de seis continentes. Por tal motivo, es uno de los más representativos de la capital con más de 400 clientes anuales, lo que conlleva a realizar alrededor de 41000 análisis al año generando aproximadamente de 25 litros de residuos líquidos peligrosos por semana. No obstante, pese a su reconocimiento ante el sector industrial, el laboratorio no cuenta con un tratamiento para sus residuos líquidos peligrosos, por lo que almacena los mismos para entregar a un gestor ambiental con el peligro de derrames, sin embargo, para evitar accidentes dentro del laboratorio debido a un mal almacenamiento, se proyecta que el laboratorio trate sus propios residuos en la fuente independientemente de la cantidad que se genere.

Objetivos del proyecto

Objetivo general del proyecto

Diseñar un sistema de tratamiento físico-químico para la remoción de metales pesados de los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios ambientales de la ciudad de

Quito, provincia de Pichincha, tomando como caso de estudio a ALS Ecuador mediante un procedimiento de neutralización y precipitación.

Objetivos específicos del proyecto

1. Realizar una caracterización química de los residuos líquidos peligrosos generados en ALS Ecuador para comparar con los resultados obtenidos después del tratamiento y determinar su eficacia.
2. Elaborar un prototipo de reactor químico para realizar las pruebas de neutralización y precipitación para la eliminación de metales pesados provenientes de los residuos líquidos peligrosos.
3. Evaluar la calidad del agua tratada mediante el tratamiento físico-químico de neutralización y precipitación para comparar con los parámetros establecidos en la normativa ambiental.
4. Proponer el sistema de tratamiento físico-químico para los residuos líquidos peligrosos en ALS Ecuador, de manera que sirva de referencia para la implementación de otros sistemas en otros laboratorios.

Justificación, importancia y alcance del proyecto

Actualmente los residuos líquidos peligrosos generados en los laboratorios de ensayo representan una problemática ambiental tanto para entidades públicas como privadas debido al manejo y la gestión integral que requieren. El control, tratamiento y eliminación de estos residuos peligrosos necesitan adecuadas condiciones de trabajo, por lo que su gestión es un aspecto imprescindible en la organización de todo laboratorio.

A pesar de que a nivel mundial la cultura del manejo de desechos peligrosos va en aumento, en nuestro país existen muchas falencias en esta temática principalmente por el almacenamiento que requieren estos residuos. Si bien es cierto, la legislación ecuatoriana incluye a los laboratorios de docencia, investigación y ensayo como sujetos obligados a cumplir las leyes y ordenanzas; la falta de inspección por parte de la autoridad ambiental ha ocasionado el poco

interés por llevar a cabo un correcto sistema de gestión ambiental para los residuos químicos peligrosos generando de esta manera problemas de contaminación ambiental y riesgos para la salud especialmente de los trabajadores de estas instituciones.

Si bien, algunos laboratorios ambientales cuentan con un plan de manejo de residuos peligrosos, estos consisten únicamente en entregar a un gestor ambiental, lo que ocasiona que muchas veces por limitaciones de tiempo y espacio en las áreas de almacenamiento, estos residuos peligrosos se descarguen directamente a cuerpos de agua en lugar de realizar un adecuado tratamiento. Es por ello que, la presente investigación tiene como objetivo tratar en la fuente estos residuos para evitar su acumulación, de manera que los laboratorios sean el gestor ambiental de sus propios residuos para asegurar el cuidado del medio ambiente y la salud de las personas, y por otro lado, generar ahorros económicos para estas instituciones.

En ese sentido, ALS Ecuador, al ofrecer un gran número de servicios a la comunidad en general, busca con esta propuesta de diseño de un tratamiento físico-químico de neutralización y precipitación tener impacto regional, nacional e internacional, a través de sus laboratorios de extensión ubicados alrededor del mundo, de manera que sirva de referencia para la implementación de otros sistemas en otros laboratorios del país.

Pregunta de investigación

¿Mediante un sistema de tratamiento físico-químico de neutralización y precipitación para los residuos líquidos peligrosos se logrará la remoción de todos los metales pesados estipulados en la Ordenanza Metropolitana 138, Norma Técnica para Control de Descargas Líquidas, Anexo 1, Tabla N° A1: Límites Máximos Permisibles por Cuerpo Receptor, Alcantarillado del Distrito Metropolitano de Quito para su descarga final?

Hipótesis de investigación

El diseño de un sistema de tratamiento físico-químico de neutralización y precipitación para los residuos líquidos peligrosos permitirá la remoción de todos los metales pesados estipulados en la Ordenanza Metropolitana 138, Norma Técnica para Control de Descargas

Líquidas, Anexo 1, Tabla N° A1: Límites Máximos Permisibles por Cuerpo Receptor, Alcantarillado del Distrito Metropolitano de Quito para su descarga final.

Categorización de las variables de investigación

Variable independiente

- Concentración inicial de metales pesados
- Costos de materiales

Variable dependiente

- pH de reacción
- Tiempo de residencia
- Volumen del prototipo del reactor
- Agitación del prototipo del reactor
- Concentración de reactivos
- Calidad de los materiales de construcción

Marco teórico referencial

Marco Legal

1. Constitución de la República del Ecuador aprobada el 20 de octubre de 2008. Artículos: 14, 15, 32, 71, 72, 83, 395, 396.
2. Código Orgánico Integral Penal. Artículo: 251
3. Reglamento al Código Orgánico Ambiental, Registro Oficial Suplemento N° 752 de 12 de junio del 2019. Artículo: 190
4. Acuerdo Ministerial 061, Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria TULSMA, Registro Oficial 316 del 04 de mayo de 2015. Artículos: 50, 86, 88, 91, 93, 95.
5. Acuerdo Ministerial 026, expide los procedimientos para: Registro de generadores de desechos peligrosos, Gestión de desechos peligrosos previo al licenciamiento ambiental, y para el transporte de materiales peligrosos, publicado en el Registro Oficial N° 334 de 12 de mayo del 2008.

6. Acuerdo Ministerial 142. Listado nacional de sustancias químicas peligrosas, desechos peligrosos y especiales, publicado en Registro Oficial N° 856 de viernes 21 de diciembre del 2012.
7. Norma Técnica Ecuatoriana NTN-INEN 2266-2013; Transporte, Almacenamiento y Manejo de Materiales Peligrosos y Requisitos.
8. Ordenanza Metropolitana 138, Norma técnica para control de descargas líquidas (NT002), Anexo 1, Tabla N° A1: límites máximos permisibles por cuerpo receptor. Alcantarillado.

Marco Epistemológico

“En la actualidad, son muchos los experimentos que se realizan en los laboratorios utilizando material de vidrio, líquidos inflamables, sustancias tóxicas, entre otras” (Jonhson, 2019), ya que estas instituciones se encargan de proveer un amplio rango de servicios de análisis especializados en suelos, sedimentos, aguas, lixiviados, lodos, ruido, emisiones a la atmósfera, etc. Si bien es cierto, todos los campos mencionados generan de alguna manera desechos, es importante mencionar que los análisis de aguas y suelos es la actividad que mayor cantidad de residuos líquidos peligrosos producen como ácidos y bases (a causa de los productos químicos utilizados durante el análisis) cuya concentración dependerá del tipo de experimentos llevados a cabo y de los químicos empleados.

“Estos residuos en cualquier estado físico, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, venenosas o biológico-infecciosas, representa un peligro para el equilibrio ecológico” (Camargo & Giraldo, 2017) “Por su estabilidad de bioacumulación y permanencia en el ambiente por largos períodos” (Urgiléz, 2018). “Aunque el volumen de residuos que se genera es relativamente más bajo en relación al proveniente del sector industrial, no por ello debe considerarse como un problema menor” (Mera, Andrade, & Ortiz, 2007). Por tal motivo, los residuos peligrosos antes de su disposición final necesitan de un tratamiento especializado que garantice la eliminación de riesgos de contaminación ambiental y la protección de la salud humana.

De acuerdo a lo expuesto, la gestión de residuos en los laboratorios debe considerar: las actividades humanas y los residuos químicos generados; la minimización y eliminación de los residuos generados, almacenados o descargados; y el almacenamiento y tratamiento de los residuos químicos peligrosos de una manera eficiente, segura, legal, y de costo adecuado (Estrada & Villanueva, 2015).

En ese sentido, los tratamientos más importantes utilizados para los desechos peligrosos son (Salas, Quesada, & Harada, 2009):

Tratamientos biológicos.- El tratamiento biológico es la degradación del residuo orgánico por la acción de los microorganismos. Una limitación de este tratamiento es que las concentraciones de los residuos por tratar pueden ser letales para los microorganismos.

Tratamiento térmico.- El tratamiento térmico consiste en un proceso de incineración que destruye únicamente los residuos orgánicos, pero no los residuos inorgánicos, mediante la combustión completa de la materia orgánica, transformándola en dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O). Para obtener el resultado anterior, se necesita tener un buen control del sistema de incineración, pues de lo contrario se estaría enviando sustancias tóxicas a la atmósfera.

Estabilización y solidificación.- Los desechos peligrosos se mezclan con otros materiales para ser capturados o fijados, formando una estructura sólida. El objetivo es convertir los desechos peligrosos en un sólido inerte, estable, de baja lixiviabilidad y con suficiente fuerza mecánica, se previene que migren hacia el agua.

Tratamientos físico-químicos.- En los tratamientos físicos no se da una transformación de la composición del desecho, sino que se utilizan para recuperar algunos componentes que se pueden reutilizar, mientras que en los tratamientos químicos sí se utilizan para transformar la composición de los desechos, con el fin de obtener sustancias menos peligrosas.

En todo caso, los objetivos de los tratamientos son: Disminuir el volumen y mejorar las características de los desechos para su futuro, tratamiento o disposición final; eliminar la peligrosidad de los residuos empleando reacciones químicas o alternativas biológicas; y separar los compuestos químicos peligrosos de forma que sean aislados desde el origen (Urgiléz, 2018).

De acuerdo con lo expuesto, Hervás (2000) menciona que:

Los procesos químicos más utilizados por su eficacia son reacciones de neutralización, reacciones de precipitación y reacciones de oxidación-reducción. Para el caso de la neutralización, puede realizarse en tanques resistentes a la corrosión o en estanques lechos filtrantes, generalmente de piedra caliza. La neutralización requiere de una agitación intensa para que la reacción ocurra de forma homogénea y el tiempo de residencia en el reactor, del residuo y del agente neutralizante, oscila entre 5 y 15 minutos para que la reacción sea efectiva. La reacción de neutralización debe controlarse con dosificadores de reactivos para control de pH y caudal donde los reactivos de mayor utilización son hidróxido cálcico, carbonato cálcico, sosa caustica, ácido sulfúrico y ácido clorhídrico. Mientras que el tratamiento de precipitación se centra en la eliminación de metales pesados a través de la formación de hidróxidos que son posteriormente separados en un decantador. Entre los metales pesados a los que es factible su aplicación se encuentran arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel y zinc. Este proceso ocurre generalmente en tres etapas: ajuste del pH, adición de un agente precipitante, siendo los más utilizados los hidróxidos, los carbonatos y los sulfuros, y finalmente la floculación. Este proceso se efectúa en un reactor fabricado de material adecuado; los materiales más utilizados son el acero o los polímeros orgánicos (polipropileno, PVC, polietileno, etc.). El proceso completo puede concluir con un floculador y un decantador. En cuanto al lodo, rico en metales pesados, puede someterse

a un proceso de deshidratación para posteriormente destinarlo a la eliminación mediante incineración controlada o su almacenamiento en depósito de seguridad.

En ese sentido, existen varios tipos de reactores, “Los cuales pueden resumirse en tres tipos: reactor tipo batch (discontinuo), reactor CSTR (perfectamente agitado) y reactor tipo PFR (flujo pistón). Cada uno es utilizado para diferentes productos y aplicaciones dependiendo de cuál sea el caso” (Coronel, 2014).

Los reactores CSTR operan con flujos continuos y son utilizados cuando se tiene una demanda de producto constante y a gran escala, estos reactores son diseñados para operar en grandes periodos de tiempo sin tener que parar su operación. Los reactores tipo PFR son usados comúnmente en gases y cuando se realizan reacciones que requieran un catalizador heterogéneo. Los reactores Batch se emplean para operaciones a pequeña escala, para experimentar con procesos nuevos a escala de laboratorio, para fabricar productos costosos o de difícil elaboración (Coronel, 2014).

En fin, “El tipo de tratamiento y gestión de los residuos depende, entre otros factores, de las características y peligrosidad de los mismos, así como de la posibilidad de recuperación, de reutilización o de reciclado, que para ciertos productos resulta recomendable (Berrio, Beltrán, Agudelo, & Cardona, 2012).

Es por esto que, con el fin de establecer prioridades en cuanto a la aplicación de tratamientos para remoción de metales pesados presentes en los residuos líquidos, es necesario conocer sus efectos sobre las plantas y los seres vivos, a partir de sus propiedades toxicológicas, las concentraciones y dosis letales, ya que los metales pesados presentan tendencia hacia fenómenos de biomagnificación y bioacumulación, teniendo en cuenta que estos se incrementan a medida que se avanza en la cadena trófica (Camargo & Giraldo, 2017).

Por tal motivo, si no se tratan y se acumulan en el laboratorio se generan productos químicos peligrosos innecesarios. Además, a menudo no suelen estar adecuadamente envasados, identificados y almacenados provocando derrames. Por tanto, la gestión de este tipo de residuos constituye un aspecto fundamental en la aplicación de criterios de calidad y gestión ambiental (Escobar, Aguila, & Gari, 2005).

Es así que, para el presente proyecto, se decidió diseñar y construir un prototipo de reactor tipo batch, para lo cual es necesario tomar en cuenta los siguientes términos:

- **Reactor Tipo Batch**

Este tipo de reactores se caracteriza por no tener flujo de entrada de reactivos, ni de salida de productos mientras se lleva a cabo el proceso. Todos los compuestos son cargados inicialmente en los tanques de agitación y la reacción continua hasta completarse. Este dispositivo tiene la ventaja de que su costo de instrumentación es bajo, además de ser flexible en su uso (se le puede detener de modo fácil y rápido). Tiene la desventaja de un elevado costo en su funcionamiento y de mano de obra debido a la gran cantidad de tiempo que pasa detenido debido a la carga, descarga y limpieza. Además, no siempre es posible implementar un sistema de control adecuado (Covaleda & Hoyos, 2014).

- **Ecuación general de diseño de un reactor tipo batch**

Para realizar el diseño de un reactor, es necesario primero realizar un balance de materiales, para esto hay que tomar en cuenta que en un reactor tipo batch al ser un intermitente, este no tiene entradas, ni salidas; en este tipo de reactor los reactivos se cargan, y se espera hasta que la reacción termine durante cierto periodo de tiempo, por lo cual si se tiene la ecuación de balance de materiales (Coronel, 2014):

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida} + \textit{Generación (consumo)} + \textit{Acumulación}$$

Para reactores batch la ecuación quedaría de la siguiente forma (Octave, 2004):

$$\text{Generación (consumo)} = -\text{Acumulación}$$

Que significa:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de consumo} \\ \text{o pérdida de un reactivo} \\ \text{al reaccionar dentro del} \\ \text{volumen del reactor} \end{array} \right\} = - \left\{ \begin{array}{l} \text{Velocidad de consumo} \\ \text{o pérdida de un reactivo} \\ \text{al reaccionar dentro del} \\ \text{volumen del reactor} \end{array} \right\}$$

- **Mezclado**

De acuerdo con Coronel (2014):

El mezclado es una operación importante en un reactor, debido a que esta se encarga de poner en contacto los reactivos y catalizadores de dicha reacción, ya sean estos en la misma fase (líquido-líquido) o en diferentes fases (líquido-gas; líquido-sólido).

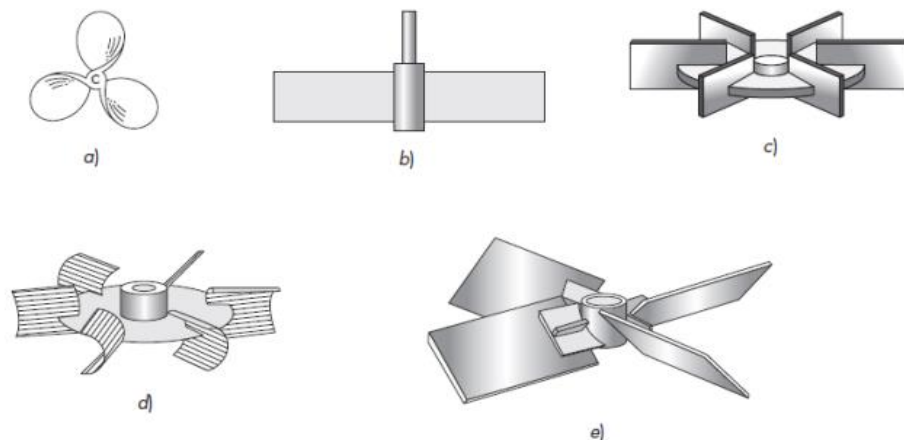
En la mezcla de líquidos, se deben tomar en cuenta los siguientes factores:

- Si es una operación por lotes o continua.
- La naturaleza del proceso: líquidos miscibles; o líquidos inmiscibles.
- El grado requerido de mezclado.
- Las propiedades físicas del líquido especialmente la viscosidad.
- Si la agitación está relacionada con otras operaciones: reacciones, transferencia de calor.

Existen varios tipos de agitadores dependiendo de la viscosidad y del propósito de la agitación entre los más comunes para una agitación de líquidos con viscosidades moderadas y altas se tiene los siguientes:

Figura 1

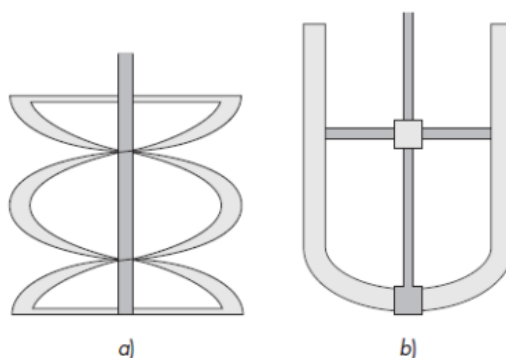
Agitadores para viscosidades moderadas



Nota. El gráfico muestra los tipos de agitadores para viscosidades moderadas, siendo a) agitador marino de tres palas; b) turbina simple de pala recta; c) turbina de disco; d) agitador de pala cóncava; e) turbina de pala inclinada. Tomado de *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.*, por Coronel, 2014.

Figura 2

Agitadores para viscosidades altas



Nota. El gráfico muestra los tipos de agitadores para viscosidades altas, siendo a) agitador de cinta de doble trayectoria helicoidal; b) agitador de ancla. Tomado de *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK.*, por Coronel, 2014.

Marco Conceptual

Laboratorio Ambiental.- En un laboratorio ambiental se realizan servicios analíticos y de medición relacionados con los diferentes componentes ambientales: aire, agua, suelo, sedimentos, y desechos de diversos tipos, etc., a través de ensayos físico-químicos y bacteriológicos, siempre según métodos normalizados o reconocidos nacional e internacionalmente, apoyando los programas de monitoreo de la calidad ambiental (Bioesfera, 2016).

Desechos.- Son las sustancias (sólidas, semi-sólidas, líquidas, o gaseosas) o materiales compuestos resultantes de un proceso de producción, transformación, reciclaje, utilización o consumo, cuya eliminación o disposición final procede conforme a lo dispuesto en la legislación ambiental nacional e internacional aplicable (TULSMA, 2015).

Material peligroso.- Es todo producto químico y los desechos que de él se desprenden, que por sus características físico-químicas, corrosivas, tóxicas, reactivas, explosivas, inflamables, biológico-infecciosas, representan un riesgo de afectación a la salud humana, los recursos naturales y el ambiente o de destrucción de los bienes y servicios ambientales u otros, lo cual obliga a controlar su uso y limitar la exposición al mismo, de acuerdo a las disposiciones legales (TULSMA, 2015).

Neutralización química.- Envuelve la neutralización de un ácido por adición de una base o el proceso inverso. La neutralización es frecuentemente usada para sólidos, líquidos y lodos orgánicos e inorgánicos. Si no se pueden neutralizar desechos ácidos con desechos alcalinos se deben adicionar soluciones de cal o hidróxido de sodio o en caso contrario ácido clorhídrico o sulfúrico para completar la neutralización. Este proceso puede ser un tratamiento de bajo costo especialmente si se puede tratar un desecho alcalino con uno de tipo ácido (Bernal, 2004).

Precipitación química.- Son los procesos básicos que componen el tratamiento físico-químico, se va añadir reactivos para insolubilizar los contaminantes presentes y al estar fundamentalmente destinadas a la eliminación de metales pesados, las reacciones de precipitación química son ampliamente utilizadas. La precipitación se basa en alterar el equilibrio químico del sistema excediendo el producto de solubilidad de las especies (Kaifer, 2006).

Metales pesados.- Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que presentan una densidad relativamente alta y cierta toxicidad para las plantas y animales (Faz, Acosta, & Zornoza, 2019). Los metales que más frecuentemente se encuentran en los residuos son: Fe, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Cr (Kaifer, 2006).

Trabajos relacionados

Según Berrio et al. (2012) “Los tratamientos más utilizados para los residuos químicos peligrosos son neutralización, incineración, recuperación, reutilización-reciclado, en donde la neutralización es el más recomendable para residuos peligrosos y no peligrosos”.

Es así que, varios estudios relacionados de tratamientos de residuos líquidos peligrosos con neutralización y precipitación han sido realizados por (Carrión & Cochachi, 2007); (Ribeiro, Paim, & Rocha, 2008); (Salas, Quesada, & Harada, 2009); (Bertini & Salvador, 2009); (Calvo, Mora, Quesada, & Quesada, 2010); (Mañuga, Gutiérrez, Rodríguez, & Villarreal, 2010); (Vaca, 2012); (Flores, Valladares, & Villegas, 2013); (Camargo & Giraldo, 2017); (Soriano, 2018).

Carrión et al. (2007) realizó un estudio basado en la modificación del proceso de neutralización de los efluentes ácidos de la planta de ácido sulfúrico de la empresa DOE RUN en Perú, esta investigación nació debido a que se gastaba gran cantidad de reactivos neutralizantes (CaCO_3 , CaO y NaOH) y también al momento de neutralizar se desprendía gases en la poza de neutralización provocando a los trabajadores irritación a la piel, los ojos y contaminación al medio ambiente. Se modificó el proceso de neutralización optimizando la proporción de caliza y cal y

diseñando e instalando un sistema de desorción de SO_2 . Se determinó la proporción óptima de caliza y cal (16.32/1); esta proporción da un pH alto y un menor gasto de reactivos neutralizantes.

Ribeiro et al. (2008) evaluó el rendimiento del hidróxido de magnesio obtenido de la hidratación de magnesia como agente precipitante para la remoción de metales de los efluentes ácidos de la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad de Atacama-Brasil. Fue llevado a cabo una comparación entre el óxido (MgO) y el hidróxido (Mg(OH)_2) de magnesio en experimentos de precipitación de metales pesados. En un sistema batch fue realizada la precipitación de los metales Fe, Cu, Zn y Ni presentes en un efluente ácido simulado a pH 1. Se obtuvo una eficiencia de precipitación mayor que 99,6% para todos los metales estudiados Zn, Fe, Cu y Ni, y el pH se encontró alrededor de 9,3. Fue comparado el rendimiento de la cal, soda cáustica, óxido de magnesio e hidróxido de magnesio. Todos los agentes neutralizantes fueron efectivos a fin de tratar el efluente; no obstante, las características de sedimentación del sólido formado fueron distintas, siendo más rápida para aquellos obtenidos con compuestos a base de magnesio.

Salas et al. (2009) realizó a nivel de planta piloto el tratamiento de los desechos peligrosos del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Para lo cual diseñó y construyó un reactor y filtro de acero inoxidable y recolectó desechos acuosos de metales pesados y de cianuro. Aplicando hipoclorito de sodio al 13% en una relación de ($5\text{Cl}_2/2\text{CN} = 6,83$ gramos/1gramos) se trató dos lotes de desechos acuosos de metales pesados. El primero estaba constituido por 47,7 kilogramos de mezcla de desechos provenientes de la determinación de DQO, mezcla de desechos de dicromato de potasio al 5,0%, desechos de disolución al 10,0% de sulfato de cobre y desechos del Laboratorio de Docencia. El segundo lote fue de 111 kg y estuvo constituido por una mezcla de desechos de DQO y desechos del tratamiento de la madera. Para las dos pruebas, el cromo hexavalente, cromo total, cobre y plomo precipitaron cumpliendo con la normativa ambiental a excepción del mercurio, para lo cual se trató este último metal con carbón vegetal dos veces para reducir su concentración hacia los límites máximos permisibles.

Bertini et al. (2009) realizó una planta piloto para el tratamiento físico-químico de soluciones acuosas de cromo (VI) de los laboratorios de enseñanza química en el Instituto Tecnológico de Buenos Aires, Argentina, pero adaptable a otros tipos de tratamiento en el que se considere la precipitación de un metal en forma de hidróxido o sal. Se diseñó la planta con dos unidades principales: un reactor de polietileno de alta densidad de 40 litros de capacidad con una resistencia regulada con un termostato en su interior donde se produce la reducción y un decantador o sedimentador de 45 litros de acrílico transparente de sección cuadrada con una base con forma de pirámide invertida donde se produce la precipitación y decantación del hidróxido. Adicional, la planta contó con recipientes para reactivos y para recibir el sobrenadante final y el barro generado con el hidróxido de cromo (III). También se le agregó un filtro de carbón activado para el tratamiento final del sobrenadante y un filtro de arena para el filtrado inicial de los efluentes a tratar en caso de ser necesario un tratamiento primario de este tipo. La homogenización se realizó por agitación con una bomba de aire o por acción de paletas metálicas, se utilizó como reductor una mezcla de alcoholes (metanol, etanol, 1-butanol, 2-butanol y terbutanol), como precipitante se utilizó solución acuosa de hidróxido de sodio 2M, agregada hasta $\text{pH} = 8$. La concentración de cromo de este paso final estuvo entre 0,6 a 1,6 ppm por debajo del límite máximo establecido para descarga a cloacas.

Calvo, et al. (2010) diseñó un tratamiento con tecnología de membranas para el tratamiento de residuos líquidos peligrosos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica en donde realizó un pretratamiento utilizando NaOH y filtró el líquido decantado a través de un filtro grueso de hilo de tela deshilachada para separar los sólidos resultantes para un proceso de solidificación, mientras que el líquido remanente pasó a la segunda fase del tratamiento, que consistió en la filtración mediante ósmosis inversa. De la filtración se obtuvo un concentrado y un permeado; el concentrado era la fracción líquida en que quedaron los solutos disueltos, mientras que el permeado era la fracción líquida en que la concentración de solutos era mucho menor, y que debía de poder ser desechada sin tratamiento adicional. Con ello se hizo posible tratar la

solución remanente con la membrana y cumpliendo con los límites máximos permisibles para descarga para Hg, Ag, Cr, Pb, Ni, Cd y Cu. Sin embargo, como desventajas se señala que se requiere de un pretratamiento, un postratamiento y el tratamiento en sí, tiene un costo elevado.

Mañunga et al. (2010) usando reactivos logró la precipitación de metales de los residuos líquidos de las pruebas de DQO provenientes de los laboratorios de: Biotecnología Ambiental, Aguas y Residuos Ambientales y Química Ambiental pertenecientes al área académica de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad del Valle-Colombia en donde el Cr (VI) fue reducido químicamente, en una hora, hasta Cr (III) adicionando 200 mg.L⁻¹ de glucosa. La concentración final de Cr (VI) fue inferior a 0,5 mg.L⁻¹; el Cr (III) formado se precipitó como hidróxido metálico con NaOH. Adicionando 2 g.L⁻¹ de NaCl los iones de Ag se precipitaron hasta valores inferiores a 0,2 mg.L⁻¹. El Hg fue reducido hasta concentraciones inferiores a 0,005 mg.L⁻¹ usando 10 g.L⁻¹ de FeS de esta manera cumpliendo con los valores permisibles. Todos los ensayos de precipitación se efectuaron bajo agitación constante y tanto el sobrenadante como el lodo resultante en cada una de las etapas de precipitación se filtraron con papel filtro rápido ($\emptyset = 125$ mm) para garantizar la separación selectiva de los iones de Ag, Hg y Cr. Las soluciones y diluciones se prepararon con agua proveniente del residuo del destilador previamente aclimatada, es decir, a temperatura ambiente (25 ± 1 °C).

Vaca (2012) en su investigación realizada con los residuos químicos peligrosos generados en el laboratorio ambiental de la OSP, empleó HCl para la neutralización de las bases al 25% alcanzando valores de pH de alrededor de 7, es decir lo requerido para la descarga, y en el caso de los residuos ácidos utilizó Hidróxido de Calcio, sin embargo los resultados de Cromo Hexavalente, Plata, Mercurio y pH sobrepasaron los límites establecidos en la normativa ambiental para descargas por lo que se descartó el tratamiento.

Flores et al. (2013) para diseñar una propuesta de tratamiento y disposición final de los residuos químicos generados en el laboratorio de calidad de aguas del Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales en Argentina, aplicó tratamientos de separación, aislamiento y

desactivación mediante la precipitación, destilación y neutralización, en donde se tomó una muestra de 100 mL de residuo ácido y se agregó 110 mL de hidróxido de sodio al 3.5 M. Con esta dosis consiguió el cumplimiento en la normativa ambiental para hierro, cobre, manganeso, zinc, arsénico, cadmio y plomo, mientras que el tratamiento no fue efectivo para níquel, cromo total y aluminio, ya que estos metales presentaron un incremento del 23.71% para cromo, el níquel que pasó de un valor menor del límite de detección <0.000468 mg/L a 0.281 mg/L y el aluminio redujo su concentración, pero no cumplió con la normativa ambiental sobre los residuos que son desechados al alcantarillado.

Camargo et al. (2017) empleó diversos procedimientos químicos en el laboratorio de aguas de la empresa Proactiva Aguas de Tunja S.A E.S.P. en Colombia, que permitieron reducir a niveles aceptables (en la normatividad vigente) la presencia de metales tales como Arsénico, Bario, Cromo, Cobalto, Mercurio, Plata, entre otros. Se realizaron diferentes ensayos en los cuales se modificaron alguna de las variables que intervienen en las reacciones químicas (pH, temperatura, agitación, uso de catalizadores, tiempo de reacción, etc.) e incorporando procesos de operación unitaria (filtración por gravedad y al vacío, calentamiento, etc.). Lo anterior permitió identificar el procedimiento que optimizó la remoción de sustancias contaminantes de los residuos analizados, mediante evaluación de la capacidad de remoción y/o reducción de los niveles de la sustancia o variable contaminante. Los porcentajes de remoción obtenidos fueron los siguientes: Arsénico (99,99%), Bario (99,99%), Cobalto (98,09%), Cromo (99,96%), Estaño (99,94%) y Mercurio (99,99%).

Finalmente, Soriano (2018) mediante La Cía. Minera en Perú implementó una Planta Piloto la remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido con neutralización mediante la tecnología de lodos de baja densidad. Inicialmente se realizó la neutralización de tres volúmenes de 10 L de drenaje ácido de mina mediante la adición de volúmenes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ al 2.5%, 5% y 10% (p/v) con medición constante del pH hasta obtener valores entre 8.8 y 9. Seguidamente, se añadió el floculante AR-3775 (0.03%) para mejorar la sedimentación de

hidróxidos metálicos. Finalmente, después de un tiempo de reacción de 15 minutos, se extrajeron muestras del agua tratada para los análisis de laboratorio en cuanto a su contenido de los metales indicados. Los resultados evidencian que el sistema de lodos de baja densidad permitió neutralizar el drenaje ácido de mina de un pH inicial de 3.54 a valores de 8.96, 8.8 y 9 empleando concentraciones de Ca(OH)_2 de 2.5%, 5% y 10% respectivamente. Asimismo, permitió remover el cobre, plomo, zinc y el hierro en cantidades de 4.187 mg/L, 6.542 mg/L, 632.355 mg/L y 362.008 mg/L respectivamente, concentraciones que se encuentran por debajo de los límites máximos permisibles establecidos. Finalmente, se obtuvieron eficiencias de remoción del 98.91%, 98.49%, 99.95% y 99.97% para el cobre, plomo, zinc y hierro respectivamente. Para el plomo y hierro se requirió una concentración de Ca(OH)_2 del 2.5%, mientras que para el zinc y cobre del 5%.

Capítulo II

Origen de los efluentes de ALS Ecuador

El documento denominado *Procedimiento Operativo Estándar – Manejo de Residuos* elaborado por ALS Ecuador, indica que el área de laboratorio propiamente dicha durante los procedimientos de ensayos químicos genera los siguientes residuos:

- Desechos líquidos peligrosos
- EPP contaminados
- Envases plásticos no contaminados
- Botellas vidrio contaminadas
- Material de vidrio
- Envases plásticos contaminados
- Basura

De acuerdo a lo mencionado, los desechos líquidos peligrosos son el objetivo de estudio del presente proyecto.

Cantidad de residuos generados según su tipo

Como resultado de los análisis químicos realizados en el laboratorio, se generan residuos químicos peligrosos como ácidos, bases y solventes orgánicos, sin embargo según los kilogramos de residuos entregados al gestor ambiental durante los años 2020 y 2021 se puede constatar que los ácidos son los que se producen en mayor cantidad, por lo que el sistema de tratamiento se basa en disminuir su peligrosidad y facilitar la descarga del agua resultante hacia el alcantarillado y el lodo formado entregar al gestor ambiental.

En la tabla 1 se presentan los kg de residuos peligrosos generados desde el 2020 con la categorización establecida por el Acuerdo Ministerial 142 del Ministerio del Ambiente y su costo de tratamiento:

Tabla 1

Cantidad de residuos peligrosos generados por año

Residuo	CRETIB	Código	Basilea	Clasificación	Kg/Año 2020	Precio (\$)	Kg/Año 2021	Precio (\$)
Desechos de soluciones ácidas con pH <2	C	NE-18	Y34 Y35 Y25	Listado de Desechos Peligrosos por fuente no específica	698,5	421,58	1227,4	675,07
Desechos de soluciones alcalinas con pH>12.5	C	NE-19	Y26 Y27 Y28 Y29	Listado de Desechos Peligrosos por fuente no específica	274,5	168,03	430,5	236,78
Solventes orgánicos gastados y mezclas de solventes gastados	T,I	NE-51	Y6	Listado de Desechos Peligrosos por fuente no específica	209,5	145,43	329	148,05

Nota. Esta tabla muestra la cantidad de residuos que genera al año el laboratorio en estudio con el precio que paga al gestor ambiental para su tratamiento.

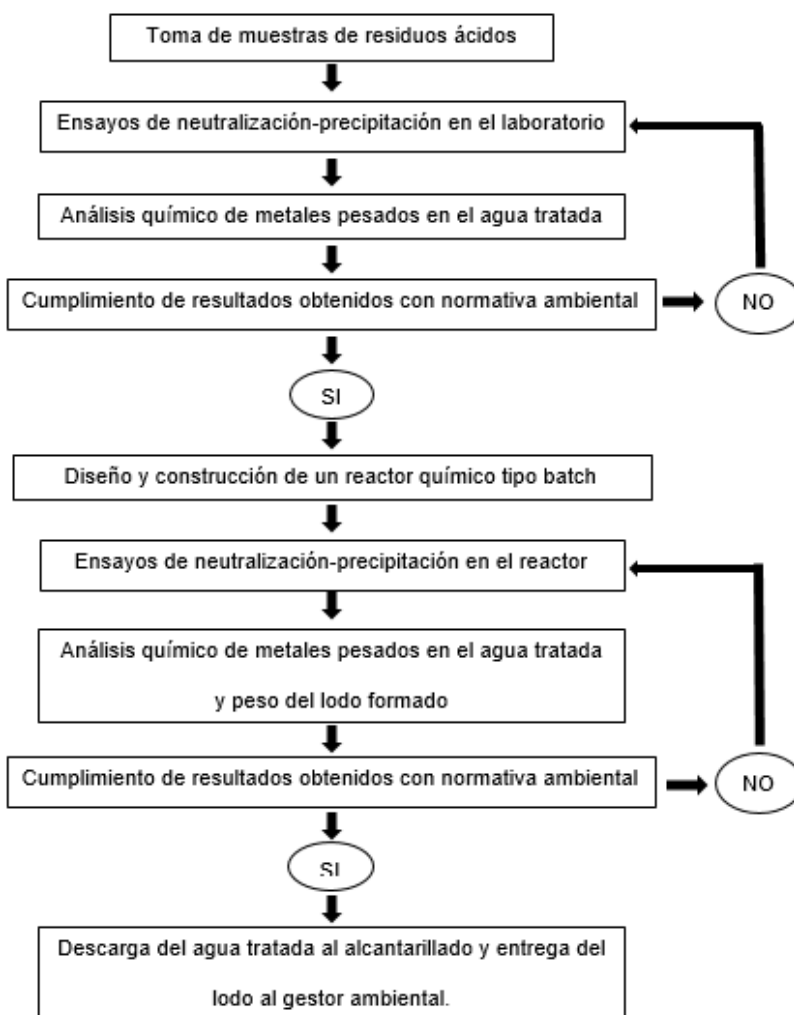
Capítulo III

Diseño experimental aplicado

La figura 3 resume el diseño experimental que se llevó a cabo en el presente proyecto para determinar el procedimiento de neutralización-precipitación que logre el cumplimiento de los límites máximos permisibles de la Ordenanza Metropolitana 138 del DMQ para metales pesados (cada paso realizado se describe más adelante).

Figura 3

Diseño experimental



Nota. El gráfico muestra el procedimiento llevado a cabo a escala de laboratorio y en el reactor químico.

Toma de muestras y ensayos de neutralización-precipitación en el laboratorio

Equipos, materiales y reactivos químicos

Para la toma de muestra de los residuos líquidos peligrosos y posteriores ensayos químicos se empleó lo siguiente:

Equipos de protección personal:

- Mandil
- Mascarilla
- Guantes de nitrilo
- Gafas de seguridad

Equipos de laboratorio:

- ICP OES
- Multiparámetro
- Termómetro
- Agitador automático
- Balanza analítica

Materiales:

- Canecas plásticas
- Jarra plástica
- Papel filtro
- Frascos de PVC
- Vasos de precipitación
- Varilla de agitación
- Embudo
- Espátula
- Carbón activado granular y en polvo

Reactivos químicos:

- Hidróxido de sodio
- Ácido sulfúrico 0,5 N
- Ácido sulfúrico 1:1

Procedimiento para la toma de muestras y pruebas de neutralización-precipitación

Para la toma de muestras y ensayos de neutralización-precipitación se realizaron diferentes pruebas que se detallan a continuación:

Prueba 1

- Se seleccionó al azar una caneca almacenada en el área de desechos y se realizó una agitación manual para homogeneizar la muestra.
- En una jarra plástica se tomaron 2 litros de muestra directamente de la caneca y se llevó la jarra al área de laboratorio para realizar los ensayos de neutralización-precipitación.
- Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 500 ml de desecho y se añadieron 36 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.
- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 9,1 U pH y 45°C, respectivamente.
- Debido a que el pH se salió del rango de 6 a 9 que establece la normativa, se bajó el resultado añadiendo 150 ml de residuo ácido.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 5,48 por lo que se subió el pH añadiendo 0,84 g de NaOH.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 6,10; por lo que se concluye un volumen final de 650 ml y 36,84 g de NaOH para el vaso de precipitación 1.
- En un segundo vaso de precipitación se colocaron 500 ml de desecho y se añadió 34,1 g de NaOH.

- Se realizó una agitación durante 1 minuto con la varilla de agitación y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 11 U pH y 44,5 °C, respectivamente.
- Se bajó el resultado añadiendo 50 ml de residuo ácido.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 6,58, debido a que en el segundo vaso se deseó comprobar la precipitación con un pH mayor de 8, se añadió 0,3 g de NaOH.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 9, por lo que se añaden 5ml de residuo ácido y se obtuvo un valor de pH de 8,20; por lo que se concluye con un volumen final de 555 ml y 34,4 g de NaOH.
- Se deja sedimentar las dos muestras en los vasos de precipitación y después de dos horas la muestra ha sedimentado a 298 mg/l en el vaso de precipitación 1 y 300 mg/l en el vaso de precipitación 2.
- Se vuelve a medir después de 24 horas y el vaso de precipitación 1 ha bajado a 260 mg/l y 250 mg/l en el vaso N° 2.
- Se procedió a filtrar con papel filtro los dos vasos de precipitación y después de 10 minutos las muestras filtraron completamente.
- Se colocaron las muestras filtradas en frascos PVC.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: El procedimiento realizado en el vaso de precipitación N° 1 no cumple con el límite máximo permisible para Cobre, Selenio y Mercurio; mientras que el vaso de precipitación N° 2 no cumple en Cobre, Selenio; por lo que se realiza una nueva prueba.

Prueba 2

- Se decidió comprobar si las concentraciones de metales pesados son similares en todas las canecas almacenadas en el área de desechos, por lo que se seleccionaron 5

canecas al azar y se realizó una agitación manual a cada una para homogeneizar las muestras.

- Se tomaron 5 litros de cada caneca y se almacenó en botellones plásticos y se llevó al laboratorio.
- En el laboratorio se procedió a colocar en frascos PVC 100 ml de cada botellón obteniendo un total de 5 Blancos.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: Se comprueba que las concentraciones de metales pesados en los 5 blancos son similares, por lo que se concluye que de cualquier caneca se puede obtener muestra para realizar las pruebas.

Prueba 3

- Con ayuda de una jarra plástica se tomaron 2 litros de cada botellón obtenidos en la prueba N° 2 y se unificaron las muestras en 1 caneca obteniendo un valor final de 10 litros.
- Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 100 ml de muestra y se añadieron 3,15 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.
- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 5,1 U pH y 42°C, respectivamente.
- Debido a que no se logró la neutralización, se subió el pH añadiendo 0,2 g de NaOH.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 7,76; por lo que se concluye con un volumen final de 100 ml y 3,2 g de NaOH.
- Se deja sedimentar la muestra durante 4 horas.
- Se procedió a filtrar con papel filtro y se colocó la muestra filtrada en frasco PVC.

- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: El procedimiento realizado cumple con todos los metales analizados excepto Mercurio, por lo que se realiza una nueva prueba.

Prueba 4

- Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 100 ml de muestra y se añadieron 3,3 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.
- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 11,6 U pH y 47°C, respectivamente.
- Para bajar el pH, se añadieron 4,8 ml de ácido.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 8,47; por lo que se concluye con un volumen final de 104,8 ml y 3,3 g de NaOH.
- Se deja sedimentar la muestra durante 4 horas.
- Se procedió a filtrar con papel filtro y se colocó la muestra filtrada en frasco PVC.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: El procedimiento realizado cumple con todos los metales analizados excepto Mercurio, por lo que se realiza una nueva prueba.

Prueba 5

- A la caneca inicial se le añade con ayuda de una jarra plástica 20 litros nuevos de residuo ácido obtenidos de 3 canecas al azar almacenadas en el área de desechos.
- Se colocaron 100 ml desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 500 ml de muestra y se añadieron 15,7 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.

- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 5,0 U pH y 43°C, respectivamente.
- Debido a que no se logró la neutralización, se subió el pH añadiendo 1 g de NaOH.
- Se mide nuevamente el pH y se obtiene un valor de 6,40; debido a que se desea trabajar con pH de 8 a 9, se añade 0,7 g de NaOH.
- Se mide el pH y se obtiene un valor de 10,29 por lo que se procedió a bajarlo añadiendo 10 ml de residuo ácido.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 8,37; por lo que se concluye con un volumen final de 510 ml y 17,4 g de NaOH.
- Se deja sedimentar la muestra durante 4 horas.
- Se procedió a filtrar con papel filtro y se colocó 250 ml de muestra filtrada en frasco PVC y 250 ml en un vaso de precipitación.
- Se elaboró un filtro de carbón activado constituido de abajo hacia arriba de algodón, grava gruesa, grava fina, arena gruesa, arena fina y carbón activado granular.
- Se procedió a filtrar la muestra por el filtro de carbón activado y se colocó en frasco PVC.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: El procedimiento realizado cumple con todos los metales analizados excepto Mercurio, por lo que se realiza una nueva prueba.

Prueba 6

- Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 500 ml de muestra y se añadieron 17,1 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.
- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 6,01 U pH y 41°C, respectivamente.

- Se subió el pH añadiendo 0,2 g de NaOH.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 8,54; por lo que se concluye con un volumen final de 500 ml y 17,3 g de NaOH.
- Se deja sedimentar la muestra durante 4 horas.
- Se procedió a filtrar con papel filtro y se colocó 250 ml de muestra filtrada en frasco PVC y 250 ml en un vaso de precipitación.
- Se elaboró un filtro de carbón activado constituido de abajo hacia arriba de algodón, grava gruesa, carbón activado granular, arena gruesa, arena fina y carbón activado granular.
- Se procedió a filtrar la muestra del vaso de precipitación por el filtro de carbón activado y se colocó en frasco PVC.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: El procedimiento realizado cumple con todos los metales analizados excepto Mercurio, por lo que se realiza una nueva prueba.

Prueba 7

- Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 500 ml de muestra y se añadieron 17,3 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.
- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 10,76 U pH y 43°C, respectivamente.
- Se bajó el pH añadiendo 10 ml de residuo ácido.
- Se midió nuevamente el pH y se obtuvo un valor de 8,70; por lo que se concluye con un volumen final de 510 ml y 17,3 g de NaOH.
- Se deja sedimentar la muestra durante 4 horas.

- Se procedió a filtrar con papel filtro y se colocó 250 ml de muestra filtrada en frasco PVC y 250 ml en un vaso de precipitación.
- En el vaso de precipitación se colocó 2 g de carbón activado en polvo y con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 5 minutos.
- Se procedió a filtrar la muestra del vaso de precipitación con papel filtro y se colocó en frasco PVC.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: El procedimiento realizado cumple con todos los metales analizados excepto Mercurio, por lo que se realiza una nueva prueba.

Prueba 8

- Se colocaron 100 ml de desecho en un frasco PVC para obtener el blanco.
- En un vaso de precipitación se colocaron 500 ml de muestra y se añadieron 17,3 g de NaOH pesados previamente en la balanza analítica.
- Con una varilla de agitación se agitó la muestra durante 1 minuto y se midieron los valores de pH y Temperatura, dando como resultados 10,95 U pH y 41°C, respectivamente.
- Debido a que en esta prueba se decidió trabajar con $\text{pH} > 10$ se concluye con un volumen final de 500 ml y 17,3 g de NaOH.
- Se deja sedimentar la muestra durante 30 minutos y se procedió a filtrar con papel filtro.
- Se desea bajar el pH a 7, por lo que se colocó a la muestra filtrada 16 gotas de H_2SO_4 0,5 N y con esto se obtuvo un pH de 10,80, entonces se añaden 10 gotas más y dio un pH de 10,77.
- Al no bajar el pH con H_2SO_4 0,5 N se procedió a añadir 10 gotas de H_2SO_4 1:1 obteniendo un pH de 9,87, entonces se añaden 5 gotas más obteniendo un pH de 7,96,

finalmente se añade 1 gota más y se obtiene un pH de 7,96; por lo que se concluye con un volumen final de 500 ml de muestra filtrada y 16 gotas de H₂SO₄ 1:1.

- Una vez obtenido el pH deseado, se separó los 500 ml de muestra en dos vasos de precipitación.
- En el vaso de precipitación 1 se colocaron 150 ml de muestra, se añadió 2 gramos de carbón activado en polvo y se procedió a agitar la muestra con el agitador automático por 15 minutos.
- Después de los 15 minutos se procedió a filtrar la muestra con papel filtro y se colocó en frasco PVC.
- En el vaso de precipitación 2 se colocaron 260 ml de muestra, se añadió 0,0026 gramos de sulfuro de sodio y se agitó con la varilla de agitación por 1 minuto.
- Posteriormente se colocó 3,5 gramos de carbón activado en polvo y se procedió a agitar la muestra con el agitador automático por 15 minutos.
- Después de los 15 minutos se procedió a filtrar la muestra con papel filtro y se colocó en frasco PVC.
- Se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.

Resultados: Las dos muestras cumplen con todos los metales analizados, por lo que se descarta el uso de Sulfuro de Sodio y se procede a la elaboración del prototipo de reactor químico aplicando el procedimiento del vaso de precipitación N° 1.

Caracterización química de los residuos líquidos peligrosos

Resultados obtenidos de metales pesados, pH, temperatura y reactivos químicos utilizados.

Los resultados de los metales pesados, pH, Temperatura y reactivos químicos empleados en los ensayos realizados en el laboratorio se resumen en la tabla 2:

Tabla 2

Resultados obtenidos en los ensayos de neutralización-precipitación

Nº de prueba		1		2		3		4						
Fecha de análisis		17/09/2021		16/11/2021		14/12/2021		29/12/2021						
Parámetros analizados	⁽¹⁾ Límite máximo permisible	Unidad	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra 2	Blanco 1 V= 100 ml	Blanco 2 V= 100 ml	Blanco 3 V= 100 ml	Blanco 4 V= 100 ml	Blanco 5 V= 100 ml	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Blanco V= 100 ml	Muestra 1
				NaOH: 36,84 g V: 650 ml pH: 6,10 Tº: 45 °C	NaOH: 34,4 g V: 555 ml pH: 8,20 Tº: 44,5 °C							NaOH: 3,2 g V: 100 ml pH: 7,76 Tº: 42 °C		NaOH: 3,3 g V: 104,8 ml pH: 8,47 Tº: 47 °C
Plata	0,5	mg/l	<0,010	<0,010	<0,010	0,282	0,066	0,094	1,37	0,093	3,34	0,243	3,21	0,054
Aluminio	5,0	mg/l	60,01	0,140	0,169	19,134	14,353	41,976	30,731	14,853	23,16	0,375	52,17	0,149
Arsénico	0,1	mg/l	0,057	<0,008	0,022	0,074	0,099	0,071	0,052	0,028	0,042	<0,008	0,053	0,018
Bario	No aplica	mg/l	0,151	<0,008	<0,008	0,249	0,232	0,346	0,162	0,151	0,300	0,010	0,305	<0,008
Berilio	No aplica	mg/l	0,013	<0,004	<0,004	0,031	0,028	0,022	0,031	0,031	0,025	<0,004	0,026	<0,004
Calcio	No aplica	mg/l	47,68	8,53	6,32	66,77	54,33	37,95	28,26	25,74	62,60	3,23	37,13	6,21
Cadmio	0,02	mg/l	0,058	<0,001	<0,001	0,031	0,073	0,051	0,057	0,054	0,042	<0,001	0,044	<0,001
Cobalto	0,5	mg/l	0,044	<0,004	<0,004	0,034	0,052	0,054	0,049	0,044	0,043	<0,004	0,042	<0,004
Cromo	No aplica	mg/l	18,73	0,043	0,041	0,940	114,047	106,508	35,443	0,090	33,770	<0,020	0,322	<0,020
Cobre	1,0	mg/l	16,810	3,655	3,175	0,077	0,204	5,718	0,202	0,131	1,361	0,165	1,43	0,187
Hierro	25	mg/l	586,52	<0,10	0,11	3,29	229,44	224,940	96,99	3,10	109,43	<0,10	157,09	<0,10
Litio	No aplica	mg/l	0,046	0,057	0,055	0,054	0,061	0,109	0,074	0,070	0,083	0,077	0,083	0,081
Magnesio	No aplica	mg/l	145,58	140,98	58,64	50,85	28,39	67,08	49,13	12,92	-	-	-	-
Manganeso	10,0	mg/l	97,04	7,04	0,257	292,259	216,796	136,269	211,206	265,915	232,84	1,62	241,91	0,302
Molibdeno	No aplica	mg/l	0,016	<0,008	<0,008	0,055	0,026	0,763	0,013	0,016	0,123	0,040	0,117	0,048
Níquel	2,0	mg/l	0,167	0,020	<0,010	0,064	0,225	0,135	0,089	0,045	0,102	<0,010	0,095	<0,010
Plomo	0,5	mg/l	0,053	<0,001	<0,001	0,082	0,112	0,078	0,073	0,118	0,089	<0,001	0,082	<0,001
Antimonio	No aplica	mg/l	<0,008	<0,008	<0,008	0,035	0,054	<0,008	<0,008	<0,008	0,038	0,023	0,048	0,016
Selenio	0,5	mg/l	13,06	5,60	6,52	0,186	0,147	3,130	0,016	0,191	0,707	0,133	0,741	0,147
Estroncio	No aplica	mg/l	0,245	0,035	0,016	0,165	0,391	0,248	0,247	0,126	0,373	0,013	0,193	0,021
Talio	No aplica	mg/l	0,164	<0,050	<0,050	0,397	0,343	0,245	0,355	0,438	0,263	<0,050	0,251	<0,050
Vanadio	No aplica	mg/l	0,139	<0,010	<0,010	0,083	0,063	0,178	0,226	0,070	0,116	0,034	0,122	0,028
Zinc	2,0	mg/l	1,16	<0,010	<0,010	0,358	1,400	3,021	0,529	0,249	1,08	<0,010	0,850	<0,010
Mercurio	0,01	mg/l	0,0259	0,0119	0,0096	1,8375	0,3945	0,06625	3,3825	0,0431	2,7025	0,639	2,250	0,2005

Nota. Los valores marcados de rojo indican que están fuera de cumplimiento.

⁽¹⁾ Ordenanza Metropolitana 138, Tabla No. A1. Límites máximos permisibles para alcantarillado.

Nº de prueba		5					6			7			8		
Fecha de análisis		07/02/2022					09/02/2022			04/03/2022			15/03/2022		
Parámetros analizados	⁽¹⁾ Límite máximo permisible	Unidad	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra	Blanco V= 100 ml	Muestra 1	Muestra 2	
				NaOH: 17,4 g V: 510 ml pH: 8,37 Tº: 43 °C	carbón activado (Filtro de 1 capa)		NaOH: 17,3 g V: 500 ml pH: 8,54 Tº: 41 °C	carbón activado (Filtro de doble capa)		NaOH: 17,3 g V: 510 ml pH: 8,70 Tº: 43 °C	carbón activado V: 250 ml Carbón activado: 2g		Carbón activado: 2 g V: 150 ml pH: 7,6 Tº: 41 °C	Carbón activado: 3,5 g V: 260 ml pH: 7,6 Na2S: 0,0026 g Tº: 41 °C	
Plata	0,5	mg/l	1,76	0,505	0,138	0,740	0,372	0,252	0,773	0,623	0,091	1,85	<0,010	<0,010	
Aluminio	5,0	mg/l	40,99	0,102	0,051	43,940	0,084	0,056	46,39	0,324	0,339	47,26	0,850	0,919	
Arsénico	0,1	mg/l	0,126	0,047	0,053	0,127	0,061	0,058	0,132	0,044	0,046	0,138	0,037	0,040	
Bario	NO APLICA	mg/l	0,423	<0,008	0,167	0,202	0,010	0,033	0,144	<0,008	0,018	0,470	<0,008	<0,008	
Berilio	NO APLICA	mg/l	0,025	<0,004	<0,004	0,024	<0,004	<0,004	0,025	<0,004	<0,004	0,021	<0,004	<0,004	
Calcio	NO APLICA	mg/l	47,69	3,61	44,63	49,09	3,68	12,22	55,88	3,21	5,93	51,36	12,12	12,15	
Cadmio	0,02	mg/l	0,042	0,001	<0,001	0,041	<0,001	<0,001	0,045	<0,001	<0,001	0,043	<0,001	<0,001	
Cobalto	0,5	mg/l	0,055	<0,004	<0,004	0,053	<0,004	<0,004	0,060	<0,004	<0,004	0,049	<0,004	<0,004	
Cromo total	NO APLICA	mg/l	50,04	0,025	<0,020	57,396	0,023	<0,020	56,750	<0,020	<0,020	48,110	<0,020	<0,020	
Cobre	1,0	mg/l	0,808	0,081	0,058	0,811	0,061	0,051	0,855	0,127	0,003	0,816	<0,001	<0,001	
Hierro	25	mg/l	170,30	<0,10	<0,10	177,18	<0,10	<0,10	193,73	<0,10	<0,10	187,73	<0,10	<0,10	
Litio	NO APLICA	mg/l	0,096	0,088	0,091	0,101	0,095	0,096	0,100	0,073	0,075	0,097	0,075	0,075	
Magnesio	NO APLICA	mg/l	69,81	43,16	65,67	75,97	46,92	53,16	79,57	12,70	13,54	76,51	5,78	5,74	
Manganeso	10,0	mg/l	105,85	1,04	0,04	204,51	0,843	0,056	221,59	0,225	0,125	195,21	0,024	0,024	
Molibdeno	NO APLICA	mg/l	4,33	0,987	0,930	5,829	1,42	1,44	6,23	3,97	4,30	5,58	3,75	3,91	
Níquel	2,0	mg/l	0,093	0,012	<0,010	0,091	<0,010	<0,010	0,092	<0,010	<0,010	0,077	<0,010	<0,010	
Plomo	0,5	mg/l	0,075	<0,001	<0,001	0,067	<0,001	<0,001	0,065	<0,001	<0,001	0,079	<0,001	<0,001	
Antimonio	NO APLICA	mg/l	0,042	<0,008	0,021	0,042	<0,008	<0,008	0,023	0,013	<0,008	<0,008	<0,008	<0,008	
Selenio	0,5	mg/l	0,445	0,116	0,099	0,355	0,111	0,112	0,308	0,118	0,108	0,355	0,058	0,111	
Estroncio	NO APLICA	mg/l	0,267	0,014	0,325	0,268	0,013	0,099	0,284	<0,008	0,019	0,273	0,056	0,047	
Talio	NO APLICA	mg/l	0,190	<0,050	<0,050	0,184	<0,050	<0,050	0,194	<0,050	<0,050	0,148	<0,050	<0,050	
Vanadio	NO APLICA	mg/l	0,314	0,021	0,028	0,362	0,083	0,085	0,395	0,106	0,102	0,354	0,068	0,067	
Zinc	2,0	mg/l	0,696	<0,010	<0,010	0,688	<0,010	<0,010	0,773	<0,010	<0,010	0,580	<0,010	<0,010	
Mercurio	0,01	mg/l	1,23	1,15	0,271	1,163	0,938	0,673	1,23	1,08	0,065	2,04	0,005	0,005	

Nota. Los valores marcados de rojo indican que están fuera de cumplimiento.

⁽¹⁾ Ordenanza Metropolitana 138, Tabla No. A1. Límites máximos permisibles para alcantarillado.

Capítulo IV

Diseño y construcción del prototipo del reactor químico

Construcción del de reactor químico

El equipo que se construyó fue diseñado con el objetivo de demostrar la validez de los ensayos realizados a nivel de laboratorio independientemente de la cantidad de litros que se vayan a tratar, por tanto, el dimensionamiento de este se lo realizó para 20 litros cuyos cálculos se presentan más adelante. Se escogió un reactor tipo batch debido a que este diseño trabaja con volúmenes constantes y en condiciones isotérmicas, por tanto, cumple con las características de estas aguas residuales, mientras que para la selección de los materiales se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

- Calidad del material
- Costo del material
- Disponibilidad de equipos en el mercado

Diseño del reactor

A nivel de laboratorio a pequeña escala se trabaja normalmente con volúmenes entre 0.01 y 0.3 litros. No se encuentran provistos con un dispositivo de agitación debido a la dificultad de ubicarlo en un volumen tan pequeño. Para equipos de laboratorio a mediana escala se usan volúmenes de 0.25 a 5 litros. La velocidad de agitación puede ir de 0 a 2000 revoluciones por minuto. Para usos de mayor volumen o para diseñar plantas piloto se usan reactores de 5 a 20 litros para grandes volúmenes y de 30 a 250 litros para plantas piloto, la agitación en estos equipos puede ir de 0 a 2400 revoluciones por minuto (Coronel, 2014).

Los materiales de construcción de los reactores a pequeña y mediana escala pueden ser de vidrio o metal; mientras que para mayores volúmenes se usa solamente recipientes de metal (Coronel, 2014).

De acuerdo con lo expuesto, debido a que el laboratorio en estudio genera a la semana aproximadamente de 25 litros de residuos peligrosos, se debe considerar que se trata de una planta piloto, por lo que para los cálculos del reactor se consideró un volumen de 20 litros que se refiere a grandes volúmenes, ya que el objetivo es que este prototipo sirva de referencia para la construcción de un reactor de mayor volumen según los litros que genera el laboratorio.

En ese sentido, para realizar la descarga de los lodos por gravedad se diseñó un reactor tipo cono mediante los siguientes cálculos (Castillo V. , 2013):

Se determinó primero el volumen del cilindro:

$$V_c = 3.1416 \times r^2 \times h$$

Donde:

V_c= volumen del cilindro

r= radio del cilindro = 15 cm

h= altura del cilindro = 27 cm

$$V_c = 3,1416 \times (1,5 \text{ dm})^2 \times 2,7 \text{ dm}$$

$$V_c = 19,08 \text{ dm}^3 = 19,08 \text{ litros}$$

Seguido, se realizó el cálculo del volumen del cono de la siguiente manera:

$$V_c = \frac{3,1416 \times r^2 \times h}{3}$$

Donde:

V_c= volumen del cono

r= radio del cono = 15 cm

h= altura del cono = 3 cm

$$V_c = \frac{3,1416 \times (1,5 \text{ dm})^2 \times 0,3 \text{ dm}}{3}$$

$$V_c = 0,71 \text{ dm}^3 = 0,71 \text{ litros}$$

Sumando el volumen del cilindro y el volumen del cono, nos da un volumen final de:

$$V_f = 19,08 \text{ litros} + 0,71 \text{ litros} = 19,79 \text{ litros}$$

$$\mathbf{V_f = 20 \text{ litros}}$$

Por otro lado, la longitud del reactor debería ser 30 cm considerando las alturas del cilindro y del cono, sin embargo, a este volumen se debe incrementar un volumen extra de seguridad, el cual es un factor de seguridad por nivel de llenado.

“Este factor de seguridad significa que el reactor debe trabajar a un volumen menor al volumen máximo del recipiente por ejemplo al 80% de su capacidad máxima, por lo que se debe aumentar un 20% al volumen total” (Coronel, 2014), de acuerdo a lo expuesto, el volumen de seguridad calculado es el siguiente:

$$\text{Volúmen de seguridad} = V_f \times 0,2$$

$$\text{Volúmen de seguridad} = 20 \text{ litros} \times 0,2$$

$$\mathbf{\text{Volúmen de seguridad} = 4 \text{ litros}}$$

Por lo cual se debe aumentar la altura del recipiente despejando h de la fórmula del volumen del cilindro:

$$h = \frac{V_c}{3,1416 \times r^2}$$

De esta manera, la altura de seguridad del recipiente es:

$$h = \frac{4 \text{ dm}^3}{3,1416 \times (1,5 \text{ dm})^2}$$

$$\mathbf{h = 0,56 \text{ dm} = 5,6 \text{ cm}}$$

Por tanto, la altura final del reactor es la siguiente:

$$\mathbf{h_{final} = 30 \text{ cm} + 5,6 \text{ cm} = 36 \text{ cm}}$$

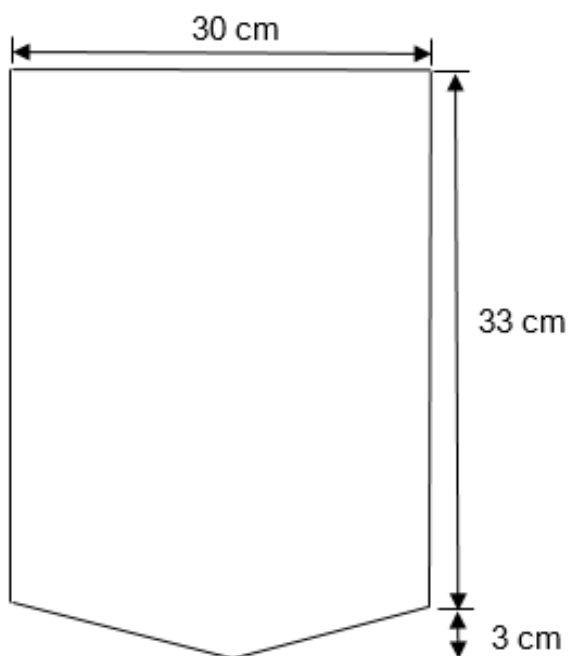
Cabe mencionar que este valor no considera la altura de la tapa, puesto que el prototipo se lo diseñó sin tapa, solamente con aberturas para ingreso de muestras y medición constante de pH y temperatura.

De acuerdo a lo expuesto, el reactor construido tiene las siguientes dimensiones:

- Altura: 36 cm
- Diámetro: 30 cm
- Capacidad: 20 litros

Figura 4

Dimensiones del reactor químico



Nota. La figura muestra las dimensiones del prototipo del reactor químico para tratar 20 litros de desecho.

Diseño del agitador

“La agitación se refiere principalmente al movimiento que se genera en un material de una manera específica, principalmente con un equipo que genera movimiento circulatorio dentro de algún tipo de contenedor o estanque el cual puede ser cerrado o abierto” (Castillo V. , 2013).

En la agitación se busca minimizar puntos muertos dentro del recipiente, es decir puntos en los cuales ciertas partes del fluido no se pongan en contacto con el resto. También se

debe seleccionar el rodete adecuado y calcular la potencia del motor del agitador para que este proporcione un correcto mezclado dentro del reactor (Coronel, 2014).

“Los tres principales tipos de impulsores son de palas, turbinas y hélices. Si bien existen otros tipos, los mencionados solucionan entre un 95 y 100% de todos los problemas de agitación” (Castillo V. , 2013).

Los impulsores de pala por lo general son agitadores de palas planas que giran sobre un eje vertical y cumplen eficazmente problemas sencillos de agitación. Son frecuentes los agitadores de dos y cuatro palas. Los impulsores de hélice trabajan a altas velocidades y se utiliza para líquidos de baja viscosidad. Mientras que los impulsores de turbina giran medias y altas velocidades sobre un eje montado centralmente en el estanque. Se consideran velocidades medias de 100 a 300 rpm y elevadas de 300 a 1000 rpm (Castillo V. , 2013).

Como se mencionó anteriormente, la agitación para plantas piloto puede ir de 0 a 2400 revoluciones por minuto, por lo que la mejor opción es un impulsor de turbina en donde existen 4 tipos de hojas según Castillo V., (2013):

- 1. Turbina tipo hojas planas:** Esta variante de impulsor de turbina produce un flujo radial que se desplaza hacia las paredes del estanque. Su diseño es versátil y simple y se utiliza para fluidos cuya viscosidad alcanza hasta los 0.11 Pa·s. El comportamiento del fluido que mueve es el más predecible de los agitadores.
- 2. Turbina tipo hojas inclinadas:** Este tipo de impulsor combina flujo radial con flujo axial, se utiliza especialmente para homogeneizar y mejorar la transferencia de calor con las paredes o serpentines dispuestos en el interior del estanque.
- 3. Turbina tipo hojas curvas:** Son especialmente útiles para dispersar materiales fibrosos y poseen un torque inicial menor que las hojas rectas.
- 4. Turbina tipo hojas planas y disco:** Este tipo de impulsor produce corrientes radiales y axiales. El disco que posee produce un efecto estabilizante. Se encuentra

también con hojas curvas y su diámetro cubre entre un 30 y un 50 % del diámetro del estanque.

Conforme lo expuesto, se define utilizar un impulsor de turbina del tipo hojas planas y disco de 6 palas, ya que este tipo de impulsor trabaja principalmente para fluidos de baja viscosidad y para velocidades que pueden ser medias o altas y resulta más económico y fácil de construir que un agitador de hélice o de turbina con palas inclinadas.

En ese sentido, a continuación, se muestran los cálculos del diseño del agitador que fueron realizados considerando el recipiente como un cilindro, es decir sin el cono, puesto que la altura del cono es prácticamente despreciable.

(Castillo V. , 2013):

Diámetro del impulsor:

$$Da = \frac{Dt}{3}$$

Donde:

Dt: diámetro del tanque

$$Da = \frac{30 \text{ cm}}{3}$$

$$Da = 10 \text{ cm}$$

Altura del impulsor:

$$E = \frac{Dt}{3}$$

$$E = \frac{30 \text{ cm}}{3}$$

$$E = 10 \text{ cm}$$

Ancho de las paletas impulsoras:

$$W = \frac{Da}{5}$$

$$W = \frac{10 \text{ cm}}{5}$$

$$W = 2 \text{ cm}$$

Longitud de las paletas impulsoras:

$$L = \frac{Da}{4}$$

$$L = \frac{10 \text{ cm}}{4}$$

$$L = 2,5 \text{ cm}$$

Altura óptima del líquido:

$$H = 1 \times Dt$$

$$H = 1 \times 30 \text{ cm}$$

$$H = 30 \text{ cm}$$

La altura óptima indica que a los 30 cm el líquido se mezcla perfectamente, es decir el agitador es más eficiente a esta altura.

Volumen óptimo de agitación:

$$V_c = \frac{3,1416 \times Di^2 \times H}{4}$$

$$V_c = \frac{3,1416 \times (30 \text{ cm})^2 \times 30 \text{ cm}}{4}$$

$$V_c = 21205,8 \text{ cm}^3$$

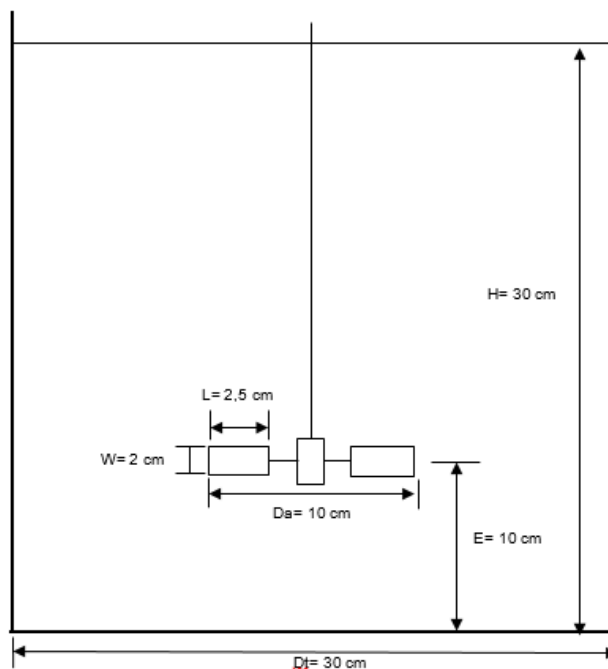
$$V_c = 21,20 \text{ L}$$

A los 30 cm equivale un volumen óptimo de agitación de 21 litros, es decir a este volumen la agitación será óptima

A continuación, se muestra el diagrama del agitador:

Figura 5

Dimensiones del agitador



Nota. La figura muestra las dimensiones del agitador para tratar 20 litros de desecho.

Potencia del motor

Para que el proceso de agitación sea eficaz, el volumen del fluido agitado debe ser capaz de llegar hasta las partes más lejanas del estanque, donde la velocidad de circulación no es el único factor importante, sino que la turbulencia del fluido puede llegar a determinar la eficacia de la operación. La turbulencia es una consecuencia de que las corrientes estén adecuadamente dirigidas y que logren generar grandes gradientes de velocidad en el líquido. Todos estos parámetros consumen energía y por lo tanto es de gran importancia conocer la potencia consumida con el fin de cumplir a cabalidad los objetivos deseados (Castillo V. , 2013).

“Se puede conocer la potencia consumida por el agitador a través de números adimensionales, relacionando por medio de gráficos el número de Reynolds y el número de potencia” (Castillo V. , 2013).

Así mismo, para calcular la potencia del motor se debe tener en cuenta la viscosidad y densidad del fluido a mezclar, sin embargo, estos parámetros pueden cambiar a lo largo

que ocurra la reacción química dentro del reactor, por lo que al terminar el proceso la viscosidad y densidad final será distinta (Coronel, 2014).

Es por tal motivo que el cálculo de la potencia del motor se lo realizó para un rango de densidades y viscosidades de la siguiente manera

(Coronel, 2014):

Número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

Donde:

Da= Diámetro del agitador

N= Velocidad de rotación

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad del fluido

El valor del número de Reynolds define si el carácter del fluido es turbulento o laminar. Además, se considera que el paso entre el régimen laminar y el turbulento no es inmediato, pasando por una zona de transición, por lo que se define de la siguiente manera:

Régimen laminar: $Re \leq 2000$

Régimen transitorio: 2000 a 4000

Régimen turbulento: $Re \geq 4000$

Número de potencia:

$$N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times Da^5}$$

Donde:

Da= Diámetro del agitador

N= Velocidad de rotación

ρ = Densidad del fluido

P= Potencia del agitador

Para el cálculo del número de Reynolds se tomó un rango de velocidades de agitación desde 0.1 revoluciones por segundo (6 RPM) hasta 100 revoluciones por segundo (6000 RPM). Mientras que los valores de viscosidades y densidades se usó las propiedades del Hidróxido de Sodio debido a que es el principal reactivo químico para utilizar.

De esta manera se obtuvieron los siguientes resultados:

Datos:

Da= 10 cm = 0,1 m

N= 0,1 rps

ρ = 1100 kg/m³

μ = 0,001 kg/m.s

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{(0,1m)^2 \times 0,1s^{-1} \times 1100 \frac{kg}{m^3}}{0,001 \frac{kg}{m \times s}}$$

$$N_{Re} = 1100$$

Tabla 3

Relación de Reynolds en función de la velocidad de agitación

Re	N
1100	0,1
2200	0,2
3300	0,3
4400	0,4
5500	0,5
11000	1

Re	N
22000	2
33000	3
44000	4
55000	5
66000	6
77000	7
88000	8
99000	9
110000	10
1100000	100

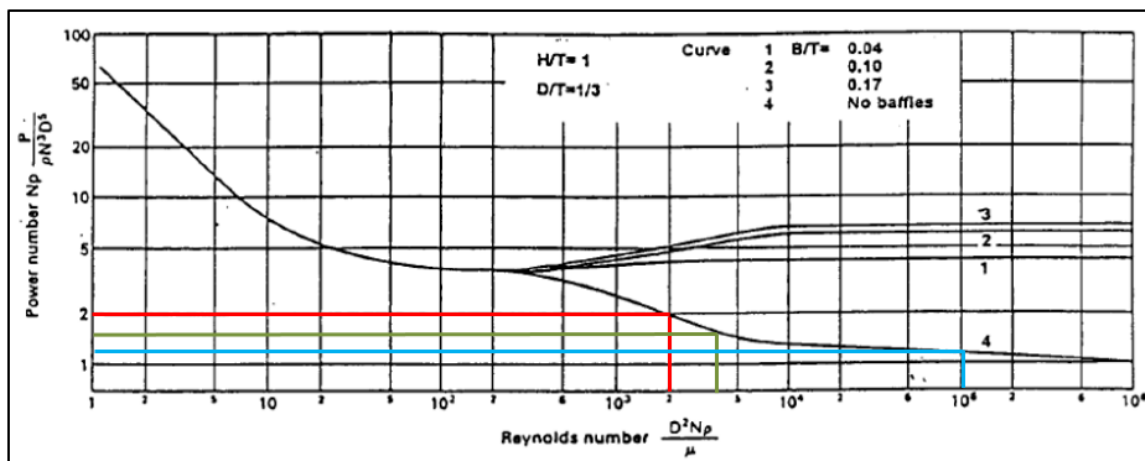
Nota. Esta tabla muestra los números de Reynolds calculados de acuerdo a un rango de velocidades en rps.

Como se puede observar en la tabla 3, el flujo laminar termina a $N= 0,2$; flujo de transición termina a $N= 0,4$ y flujo turbulento los valores mayores a $0,4$ rps.

Con los números de Reynolds obtenidos para flujo laminar, de transición y turbulento, se procede a calcular el número de potencia mediante la siguiente figura:

Figura 6

Número de potencia para tres valores de Reynolds



Nota. Interpolación realizada por el autor. Grafica tomada de *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK*. Coronel, 2014.

Utilizando la figura 6 se determina el número de potencia (N_p) mediante la interpolación con el número de Reynolds calculado. Como se puede observar la curva número 4 corresponde a un recipiente sin deflectores, por tanto, para un número de Reynolds de 2000 aproximadamente, se obtiene un número de potencia (N_p) de 2, para un Reynolds de 4000, $N_p = 1.6$ y para un Reynolds de 100000 un $N_p = 1.3$.

De esta manera se obtiene la potencia requerida para cada número de Reynolds mediante la siguiente fórmula:

$$N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times Da^5}$$

$$P = N_p \times \rho \times N^3 \times Da^5$$

Para Re= 2000

$$P = 2 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (0,2^{s^{-1}})^3 \times (0,1m)^5$$

$$P = 0,000176 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 0,000176 W$$

$$P = 0,00000236 HP$$

Para Re= 4000

$$P = 1,6 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (0,4^{s^{-1}})^3 \times (0,1m)^5$$

$$P = 0,00113 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 0,00113 W$$

$$P = 0,0000152 HP$$

Para Re= 100000

$$P = 1,3 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (10^{s^{-1}})^3 \times (0,1m)^5$$

$$P = 14,4 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 14,3 W$$

$$P = 0,019 HP$$

La potencia requerida para el tipo de fluido que se va a tratar es muy baja, puesto que se requiere menos de 1 HP considerando un flujo muy turbulento. Si bien es cierto, la velocidad máxima que se ha establecido para los cálculos es de 100 RPS (6000 RPM), se debe considerar que no es recomendable trabajar al máximo. Así mismo, como se mencionó anteriormente, la agitación para plantas pilotos puede ir de 0 a 2400 revoluciones por minuto, por lo que se utilizó un motor eléctrico de 100 Watts de potencia y mediante pruebas con agua dentro del reactor se determinó una velocidad óptima de 700 RPM.

Con estos datos se procede a calcular la viscosidad máxima a la que puede funcionar el motor seleccionado considerando un número de Reynolds de flujo turbulento, mediante el siguiente cálculo:

$$\mu = \frac{P}{N_{re} \times N_p \times N^2 \times Da^3}$$

$$\mu = \frac{100 W}{4000 \times 1,6 \times (11,67 s^{-1})^2 \times (0,1m)^3}$$

$$\mu = 0,115 \frac{kg}{m \times s}$$

$$\mu = 115 \text{ Centipoise}$$

La viscosidad máxima aproximada a la que puede funcionar el motor es de 0,115 kg/m.s, considerando que la viscosidad del Hidróxido de Sodio es de 0,001 kg/m.s, se concluye que las características del motor seleccionado son correctas.

Selección del material de construcción

Para la fabricación de equipos normalmente se usa aceros inoxidable de la serie 300, estos aceros tienen muy buenas propiedades, las cuales son: alta resistencia a la corrosión, son fáciles de soldar, resistentes a altas temperaturas alrededor de 840 °C a 925 °C (Coronel, 2014).

En el mercado ecuatoriano se encuentran principalmente dos tipos de aceros de la serie 300: AISI 304 y AISI 316, en donde el más común es el 304, sin embargo, una opción más económica es el acero galvanizado que también es resistente a la corrosión y oxidación, pero su tiempo de vida útil es menor. Para realizar las pruebas en el presente estudio se seleccionó acero galvanizado.

Capítulo V

Ensayos de neutralización y precipitación en el reactor químico

Equipos, materiales y reactivos químicos

Equipos de protección personal:

- Mandil
- Mascarilla
- Guantes de nitrilo
- Gafas de seguridad

Equipos de laboratorio:

- ICP OES
- Multiparámetro
- Termómetro
- Reactor químico
- Balanza analítica
- Estufa

Materiales:

- Canecas plásticas
- Jarra plástica
- Papel filtro
- Frascos de PVC
- Embudo

- Espátula
- Carbón activado en polvo

Reactivos químicos:

- Hidróxido de sodio
- Ácido sulfúrico 1:1

Procedimiento para la toma de muestras y pruebas de neutralización-precipitación

Para la toma de muestras y los ensayos de neutralización-precipitación dentro del reactor se realizó el siguiente procedimiento:

- Se tomó una caneca del área de desechos.
- En un frasco PVC se colocaron 100 ml de muestra para obtener el blanco.
- Con ayuda de una jarra plástica se colocaron 20 litros de desecho dentro del reactor químico.
- Se agitó la muestra durante 10 minutos para homogeneizarla.
- Se añadieron 0,45 kg de NaOH y se agitó la muestra durante 30 minutos, dando como resultado 10,8 U pH y 53 °C.

Cabe mencionar que las sondas de pH y Temperatura se encontraron sumergidas dentro del reactor durante todo el tratamiento, por lo que se obtuvieron datos en tiempo real. En ese sentido, la aplicación de NaOH se dio progresivamente hasta alcanzar el pH deseado. De esta manera evitando añadir más concentración de desecho o reactivo como sucedía en las prácticas de laboratorio.

- Se procedió a abrir la llave que se encuentra en la parte inferior del reactor para filtrar la muestra con papel filtro.
- Una vez filtrada la muestra después de 12 horas, se volvió a añadir dentro del reactor para la segunda parte del tratamiento.
- Se añadieron 17 ml de H₂SO₄ 1:1 y se agitó durante 10 minutos obteniendo un pH de 7,8.

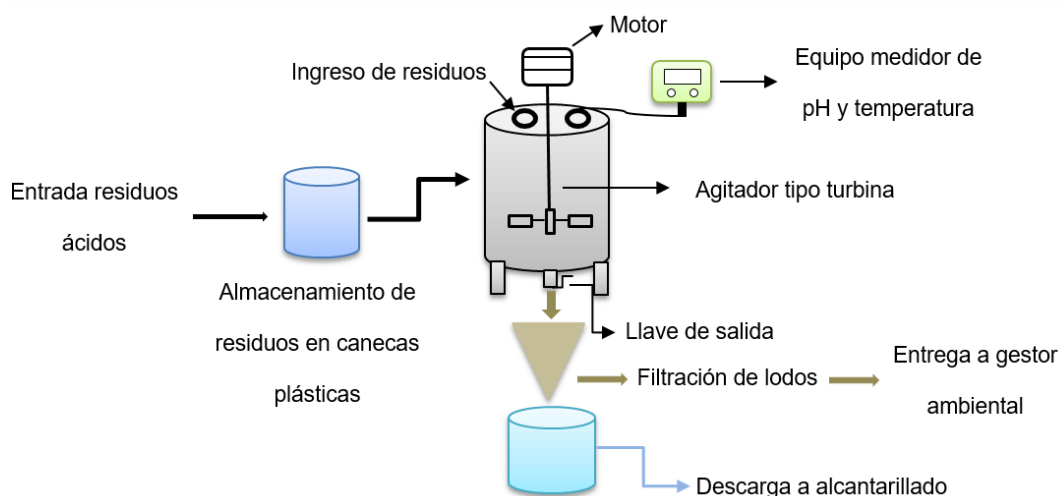
- Una vez obtenido el pH deseado, se colocaron 0,17 kg de carbón activado en polvo y se procedió a agitar la muestra por 30 minutos.
- Se procedió a abrir la llave que se encuentra en la parte inferior del reactor para filtrar la muestra con papel filtro.
- Se colocó la muestra en frasco PVC y se procedió a llenar la cadena de custodia para el ingreso de las muestras al sistema del laboratorio y su posterior análisis de metales pesados.
- Los filtros con los lodos se secaron en la estufa para su posterior pesaje en la balanza analítica.

Diseño general de la planta piloto

La figura 7 muestra el diseño del reactor químico construido con el proceso desde la entrada de los residuos ácidos hasta la descarga final agua tratada.

Figura 7

Diseño del reactor químico de 20 litros



Nota. La figura muestra el sistema de tratamiento establecido para tratar 20 litros de desecho.

Resultados obtenidos mediante el tratamiento de neutralización - precipitación

Evaluación de metales pesados y porcentaje de remoción

En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de la prueba realizada en el reactor.

Tabla 4

Comparación de resultados con normativa ambiental y porcentaje de remoción de contaminantes

Parámetros analizados	⁽¹⁾ Límite máximo permisible	Unidad	Blanco V= 100 ml	Muestra tratada NaOH: 0,45 kg H2SO4: 17 ml Carbón activado: 0,17 kg V: 20 L pH: 7,8 Tº: 53 ºC	Porcentaje de remoción (%)
Plata	0,5	mg/l	0,201	<0,010	95,02
Aluminio	5,0	mg/l	56,331	15,12	73,16
Arsénico	0,1	mg/l	0,243	0,029	88,07
Bario	No aplica	mg/l	0,312	0,023	92,63
Berilio	No aplica	mg/l	0,032	<0,004	87,50
Calcio	No aplica	mg/l	60,64	5,06	91,66
Cadmio	0,02	mg/l	0,043	0,014	67,44
Cobalto	0,5	mg/l	0,057	<0,004	92,98
Cromo total	No aplica	mg/l	28,12	0,168	99,40
Cobre	1,0	mg/l	1,167	0,005	99,57
Hierro	25	mg/l	139,61	<0,10	99,93
Litio	No aplica	mg/l	0,116	0,082	29,31
Magnesio	No aplica	mg/l	117,25	<1,00	99,15
Manganeso	10,0	mg/l	174,5	<0,010	99,99
Molibdeno	No aplica	mg/l	4,8	0,010	99,79
Níquel	2,0	mg/l	0,163	<0,010	93,87
Plomo	0,5	mg/l	0,081	<0,001	98,77
Antimonio	No aplica	mg/l	0,035	0,018	48,57
Selenio	0,5	mg/l	0,913	0,008	99,12
Estroncio	No aplica	mg/l	0,353	0,067	81,02
Talio	No aplica	mg/l	0,188	<0,050	73,40
Vanadio	No aplica	mg/l	0,302	0,050	83,44
Zinc	2,0	mg/l	0,496	0,04	91,94
Mercurio	0,01	mg/l	0,186	<0,002	98,92

Nota. Los valores marcados de rojo indican que están fuera de cumplimiento.

⁽¹⁾ Ordenanza Metropolitana 138, Tabla No. A1. Límites máximos permisibles para alcantarillado.

Los resultados obtenidos del ensayo realizado en el reactor químico demuestran que los metales cumplen con la normativa ambiental excepto Aluminio. Durante las pruebas realizadas a nivel de laboratorio, este metal siempre tuvo una remoción mayor al 90% por lo que la alta concentración obtenida en esta ocasión se debe al material del reactor que es acero galvanizado con recubrimiento de aluminio, por lo que se debe cambiar el material del equipo mas no el procedimiento de neutralización determinado.

Por otro lado, en la tabla 4 también se puede observar que más del 50% de metales presentan un porcentaje de remoción mayor del 90% lo que indica que el tratamiento es eficiente.

Evaluación del peso final del lodo filtrado

El lodo resultante del proceso de neutralización-precipitación filtró en 12 horas, mientras que el lodo generado de la aplicación de carbón activado filtró en 9 horas. Estos residuos fueron secados en la estufa para eliminar el contenido de humedad y obtener valores reales. Posteriormente fueron pesados en la balanza analítica dando como resultado lo siguiente:

- Lodo proceso con NaOH: 0,082 kg
- Lodo proceso con carbón activado: 0,043 kg
- **Lodo total: 0,13 kg/20 litros**

Capítulo VI

Diseño del Sistema de Tratamiento Físico-químico para ALS Ecuador

Análisis del costo de tratamiento por litro

En el presente proyecto se realizó la prueba con 20 litros de residuos peligrosos generando un lodo final de 0,13 kg que debe ser entregado al gestor ambiental para su disposición final.

Los insumos utilizados con sus respectivos costos se detallan en la tabla 5:

Tabla 5

Costo aproximado del tratamiento por litro de desecho

Materiales	Costo de materiales (\$)	Cantidad usada para tratar 20 litros	Costo estimado para tratar 20 litros (\$)	Costo de gestor ambiental para tratar 0,13 kg de lodo (\$)	Costo de gestor ambiental para tratar 20 litros (\$)	Costo final aproximado para tratar 20 litros de desecho incluido lodo (\$)	Costo final aproximado para tratar 1 litro de desecho incluido lodo (\$)	Ahorro en 1 litro de muestra tratada (\$)
Hidróxido de Sodio	\$0,68/Kg	0,45 kg	0,31					
Ácido Sulfúrico 1:1	\$33/2,5 L	0,017 L	0,22	\$0,55/kg	\$0,55/L	2,3	0,12	0,43
Carbón activado en polvo	\$10/Kg	0,17 kg	1,7					
TOTAL (\$)			2,23	0,07	11	2,3	0,12	0,43

Nota. Esta tabla muestra el costo aproximado para tratar 1 litro de desecho con el procedimiento determinado y el ahorro generado.

Cálculo de las dimensiones de la planta de tratamiento

Parámetros de diseño

La propuesta de diseño se la ha realizado considerando los litros de residuos que genera el laboratorio aproximadamente al mes y el espacio físico disponible proponiendo que la empresa realice el tratamiento 1 vez al mes. En ese sentido, los cálculos se realizaron de la siguiente manera:

Volumen del cilindro:

Datos:

Vc= volumen del cilindro

r= radio del cilindro = 25 cm

h= altura del cilindro = 48 cm

$$Vc = 3.1416 \times r^2 \times h$$

$$V_c = 3,1416 \times (2,5 \text{ dm})^2 \times 4,8 \text{ dm}$$

$$V_c = 94 \text{ dm}^3 = 94 \text{ litros}$$

Volumen del cono:

Datos:

V_c = volumen del cono

r = radio del cono = 25 cm

h = altura del cono = 9 cm

$$V_c = \frac{3,1416 \times r^2 \times h}{3}$$

$$V_c = \frac{3,1416 \times (2,5 \text{ dm})^2 \times 0,9 \text{ dm}}{3}$$

$$V_c = 6 \text{ dm}^3 = 6 \text{ litros}$$

Volumen final:

$$V_f = 94 \text{ litros} + 6 \text{ litros}$$

$$V_f = 100 \text{ litros}$$

Volumen de seguridad:

$$\text{Volúmen de seguridad} = V_f \times 0,2$$

$$\text{Volúmen de seguridad} = 100 \text{ litros} \times 0,2$$

$$\text{Volúmen de seguridad} = 20 \text{ litros}$$

Altura de seguridad:

$$h = \frac{V_{\text{seguridad}}}{3,1416 \times r^2}$$

$$h = \frac{20 \text{ dm}^3}{3,1416 \times (2,5 \text{ dm})^2}$$

$$h = 1,0 \text{ dm} = 10 \text{ cm}$$

Altura final del reactor:

$$h_{\text{final}} = 57 \text{ cm} + 10 \text{ cm} = 67 \text{ cm}$$

Se debe tener en cuenta que la altura final no considera la altura de la tapa, ya que la misma al ser movable dependerá del diseño que escoja el laboratorio según los equipos de medición disponibles para la medición de pH y temperatura. Así mismo, el recipiente no debe ser completamente hermético, puesto que este diseño no considera un trabajo bajo presión, por tanto, al haber reacciones que liberen cierta cantidad de gases, pueden ser liberados por la abertura para ingreso de muestras.

Diámetro del impulsor:

$$Da = \frac{Dt}{3}$$

$$Da = \frac{50 \text{ cm}}{3}$$

$$Da = 17 \text{ cm}$$

Altura del impulsor:

$$E = \frac{Dt}{3}$$

$$E = \frac{50 \text{ cm}}{3}$$

$$E = 17 \text{ cm}$$

Ancho de las paletas impulsoras:

$$W = \frac{Da}{5}$$

$$W = \frac{17 \text{ cm}}{5}$$

$$W = 3,4 \text{ cm}$$

Longitud de las paletas impulsoras:

$$L = \frac{Da}{4}$$

$$L = \frac{17 \text{ cm}}{4}$$

$$L = 4,3 \text{ cm}$$

Altura optima del líquido:

$$H = 1 \times Dt$$

$$H = 1 \times 50 \text{ cm}$$

$$H = 50 \text{ cm}$$

Volumen óptimo de agitación:

$$V_c = \frac{3,1416 \times Di^2 \times H}{4}$$

$$V_c = \frac{3,1416 \times (50 \text{ cm})^2 \times 50 \text{ cm}}{4}$$

$$V_c = 98175 \text{ cm}^3$$

$$V_c = 98 \text{ L}$$

Calculo de la potencia:

Número de Reynolds:

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

Donde:

Da= Diámetro del agitador

N= Velocidad de rotación

ρ = Densidad del fluido

μ = Viscosidad del fluido

Número de potencia:

$$N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times Da^5}$$

Donde:

Da= Diámetro del agitador

N= Velocidad de rotación

ρ = Densidad del fluido

P= Potencia del agitador

Para el cálculo del número de Reynolds se tomó un rango de velocidades de agitación desde 0.1 revoluciones por segundo (6 RPM) hasta 100 revoluciones por segundo (6000 RPM). Mientras que los valores de viscosidades y densidades se usó las propiedades del Hidróxido de Sodio.

Datos:

Da= 17 cm = 0,17 m

N= 0,1 rps

ρ = 1100 kg/m³

μ = 0,001 kg/m.s

$$N_{Re} = \frac{Da^2 \times N \times \rho}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{(0,17m)^2 \times 0,1s^{-1} \times 1100 \frac{kg}{m^3}}{0,001 \frac{kg}{m \times s}}$$

$$N_{Re} = 3179$$

Tabla 6

Relación de Reynolds en función de la velocidad de agitación

Re	N
3179	0,1
6358	0,2
9537	0,3
12716	0,4
15895	0,5
32790	1
63580	2
95370	3
127160	4

Re	N
158950	5
190740	10
3179000	100

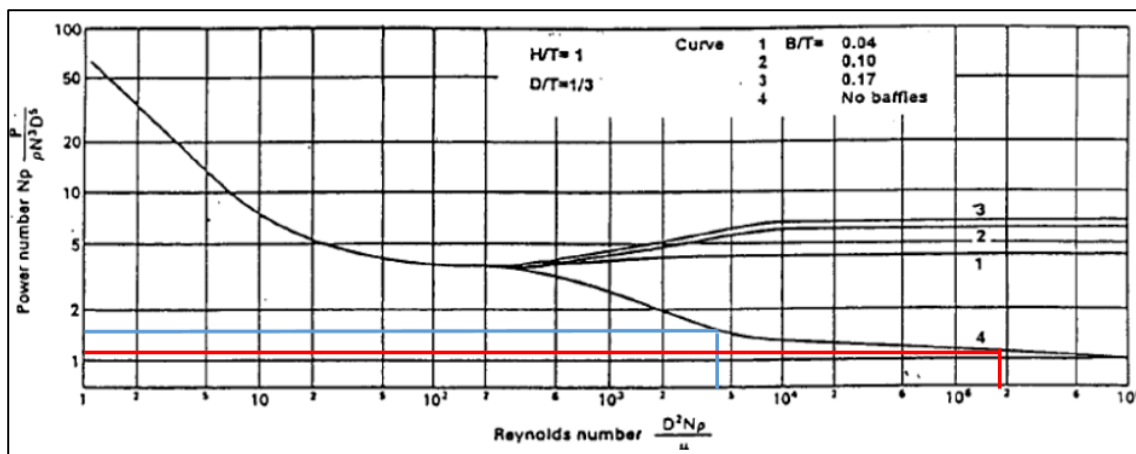
Nota. Esta tabla muestra los números de Reynolds calculados de acuerdo a un rango de velocidades en rps.

Como se puede observar en la tabla 6 no existe flujo laminar, rápidamente se presenta un flujo turbulento ya que el flujo de transición termina a $N = 0,1$ y flujo turbulento los valores mayores a $0,2$ rps.

Número de potencia:

Figura 8

Número de potencia para tres valores de Reynolds



Nota. Interpolación realizada por el autor. Grafica tomada de *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK*. Coronel, 2014.

Para un número de Reynolds de aproximadamente 4000, se obtiene un número de potencia (N_p) de 1.6 y para un Reynolds de 190000 un $N_p = 1.1$.

Potencia requerida para cada número de Reynolds:

$$N_p = \frac{P}{\rho \times N^3 \times Da^5}$$

$$P = N_p \times \rho \times N^3 \times Da^5$$

Para Re= 4000

$$P = 1,6 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (0,1^{s^{-1}})^3 \times (0,17m)^5$$

$$P = 0,00025 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 0,00025 W$$

$$P = 0,0000034 HP$$

Para Re= 190000

$$P = 1,1 \times 1100 \frac{kg}{m^3} \times (10^{s^{-1}})^3 \times (0,17m)^5$$

$$P = 171,80 \frac{kg \times m^2}{s^3}$$

$$P = 172 W$$

$$P = 0,23 HP$$

La potencia requerida para el tipo de fluido que se va a tratar debe ser de 172 Watts, considerando un flujo muy turbulento. Si bien es cierto, la velocidad máxima que se ha establecido para los cálculos es de 100 RPS (6000 RPM), se debe considerar que no es recomendable trabajar al máximo debido a que la velocidad máxima para la agitación de un reactor a mediana escala es de 2000 RPM.

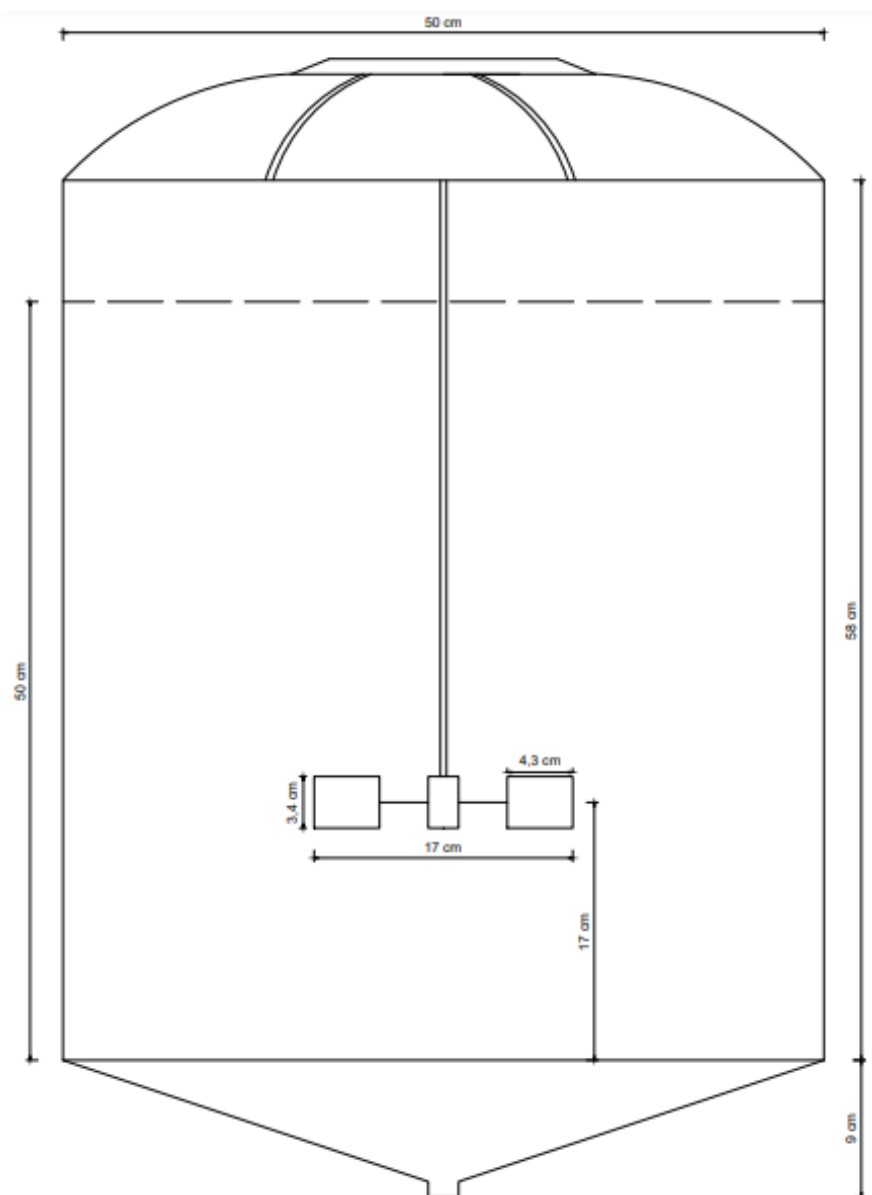
Condiciones de operación

El diseño establecido tiene como limitación la presión de operación debido a que el reactor no fue diseñado para que trabaje bajo presión, puesto que el recipiente no es completamente hermético; sin embargo, puede haber reacciones las cuales liberen cierta cantidad de gases, los cuales pueden ser liberados por la abertura para ingreso de muestras o por medio de una válvula de seguridad.

Propuesta arquitectónica

Figura 9

Dimensiones de la propuesta de reactor químico



Nota. El gráfico muestra las dimensiones que debe tener el reactor químico para tratar 100 litros de desecho.

Capítulo VII

Conclusiones

- Mediante diferentes pruebas realizadas a escala de laboratorio se definió el procedimiento de neutralización-precipitación necesario para precipitar todos los metales establecidos en la Ordenanza Metropolitana 138 del DMQ, descarga: Alcantarillado.
- No se puede establecer concentraciones fijas de hidróxido de sodio y ácido sulfúrico a utilizar, ya que si bien es cierto se está trabajando con residuos de pH ácidos, las concentraciones de iones de hidrogeno siempre serán distintas aunque sean del mismo tipo o tengan el mismo origen, por tal motivo es necesario realizar el procedimiento con lecturas de pH en tiempo continuo, puesto que de este parámetro depende el éxito del tratamiento.
- Se diseñó y construyó un reactor tipo batch de acero galvanizado con capacidad de 20 litros, agitación automática y un impulsor tipo turbina de 6 palas como planta piloto para poner en marcha el procedimiento definido.
- Se realizó una prueba de funcionamiento del reactor mediante una réplica de la última practica realizada en el laboratorio, en el cual se midieron valores de pH, temperatura, tiempo de agitación, concentraciones usadas de hidróxido de sodio, ácido sulfúrico, carbón activado, tiempo de filtración del lodo y peso final del lodo.
- Los resultados obtenidos en el ensayo realizado en el reactor fueron muy parecidos a los obtenidos en las prácticas de laboratorio a excepción del Aluminio, puesto que presentó una concentración de 15,12 mg/l encontrándose fuera de cumplimiento.
- La alta concentración de aluminio se debe al material del cual fue elaborado el reactor químico para la prueba piloto, ya que el acero galvanizado contiene recubrimiento de aluminio que fue desprendido durante el tratamiento.
- Se realizó la propuesta de diseño de un reactor químico para 100 litros de desechos ácidos planteando que el laboratorio realice el tratamiento 1 vez al mes.

- Con la implementación de este sistema de tratamiento, el laboratorio generaría un ahorro aproximado de \$0,43/litro considerando el costo para tratar desechos ácidos y lodos que el laboratorio paga al gestor ambiental con el que trabaja actualmente, por tanto, cada laboratorio que llegase a implementar este tratamiento debe presupuestar el costo de su tratamiento.

Recomendaciones

- Se recomienda la construcción del reactor en materiales que no tengan aleaciones para evitar desprendimiento de metales durante el tratamiento. El material más común y de fácil disponibilidad en el mercado es acero inoxidable AISI 304, sin embargo, otra opción más económica pero menos común es material PVC. Esto dependerá de la decisión del laboratorio.
- Se sugiere realizar ensayos a escala del laboratorio con diferentes concentraciones de carbón activado para determinar la concentración más baja y que cumpla el objetivo de remover el Mercurio, puesto que las pruebas se las realizó con la misma concentración de carbón.
- Se recomienda el uso de un carbón activado de uso industrial debido que son más baratos que el aplicado en los ensayos a escala de laboratorio y en el prototipo.
- La filtración de los lodos se la realizó en papel filtro, sin embargo, se recomienda realizar pruebas en filtros de tela, puede ser de hilo deshilachado para retener toda la cantidad de lodo sin peligro que se tapone el filtro.
- Si se desea acelerar el proceso de filtración del lodo, se recomienda realizar pruebas con coagulantes aniónicos, sin embargo, considerar que esto aumentará el costo final, por tal motivo se decidió realizar el tratamiento 1 vez al mes para evitar inconvenientes por acumulación de desechos.

Revisión bibliográfica

Altamirano, H., Gómez, A., & González, W. (2019). *Propuesta de un manual de procedimientos para la gestión de residuos químicos generados en las prácticas de laboratorio de los componentes de Química Orgánica I y II de la carrera de Farmacia de la Facultad de Ciencias Químicas, UNAN-León*. León, Nicaragua: UNAN-León.

Beleño, C. (2018). *Evaluación del efecto tóxico en el ambiente de residuos líquidos obtenidos en el laboratorio de aguas de ECOSAM S.A.S, aplicando el método de neutralización*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

Bernal, A. (2004). *Contribución al Sistema de Gestión Ambiental para el adecuado manejo de residuos sólidos químicos generados en el Campus de la Universidad Nacional - Sede Bogotá*. Arauca, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Berrio, L., Beltrán, O., Agudelo, E., & Cardona, S. (2012). *Sistemas de tratamiento para residuos líquidos generados en laboratorios de análisis químico*. Colombia: Gestión y Ambiente.

Bertini, L., & Salvador, D. (2009). *Gestión de residuos generados en Laboratorios de Enseñanza de Química en entidades universitarias con participación activa del alumnado*. Buenos Aires, Argentina.

Biosfera. (2016). *Biosfera Consultoría Medioambiental*. Obtenido de <http://www.biosfera.es/laboratorio/laboratorio-ambiental-y-biologico/>

Calvo, G., Mora, J., Quesada, J., & Quesada, H. (2010). *Aplicación de la tecnología de membranas en el tratamiento de algunos residuos líquidos altamente peligrosos*. Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Química.

Camargo, D., & Giraldo, A. (2017). *Rediseño e implementación de un modelo de gestión de los residuos líquidos generados en el laboratorio de aguas de la empresa Proactiva Aguas de Tunja S.A E.S.P del Municipio de Tunja (Boyacá)*. Boyacá, Colombia:

- Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente.

Carrión, V., & Cochachi, M. (2007). *Modificación del proceso de neutralización de los efluentes ácidos de la planta de ácido sulfúrico de la empresa DOE RUN Perú*. Huancayo, Perú: Universidad Nacional del Centro del Perú.

Castillo, A. (2016). *Plan de Gestión Integral de Residuos Peligrosos para la empresa Filtros y Lubricantes Dago*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ciencias Ambientales - Programa de Administración Ambiental.

Castillo, V. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos*. Chile: Universidad del Bío-Bío. Red de Bibliotecas.

Coronel, J. (2014). *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK*. Quito: Universidad Internacional SEK.

Covalada, M., & Hoyos, C. (2014). *Diseño y construcción de un prototipo de reactor tipo batch a escala de laboratorio para la producción de biodiesel a partir de aceites vegetales*. Montería - Córdoba, Colombia: Universidad de Córdoba.

Escobar, J., Aguila, I., & Gari, J. (2005). *Propuesta de programa para la gestión de residuos tóxicos generados por reactivos químicos caducos y ociosos en la UCLV*. Villa Clara, Cuba: Centro de Estudio de Química Aplicada. UCLV.

Estrada, J., & Villanueva, C. (2015). *Tratamiento de residuos peligrosos generados en laboratorios químicos*. Instituto de Investigación (RIIGEO).

Faz, Á., Acosta, J., & Zornoza, R. (2019). *LIBROETSIA*. Obtenido de http://ftp.murciaeduca.es/programas_educativos/Nuevo1/LIBROETSIA/3_analisis_de_residuos_ph.html

Flores, R., Valladares, P., & Villegas, W. (2013). *Propuesta de tratamiento y disposición final de los residuos químicos generados en el laboratorio de calidad de aguas*

del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. San Salvador: Universidad de El Salvador.

Hervas, L. (2000). *Técnicas de prevención de la generación de suelos contaminados: Tratamientos físicos - químicos. Procesos de carácter químico*. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente - Junta de Andalucía.

Jonhson, M. (2019). *Clasificación de residuos químicos peligrosos: Diseño de un manual de seguridad y buenas prácticas en Laboratorio de suelos de UACA*. Machala, Ecuador: Universidad Técnica de Machala.

Kaifer, J. (2006). *Tratamientos físico-químicos de residuos*. España: EOI.

Loayza, J. (2005). *Gestión de Residuos en los Laboratorios de Química*. Lima, Perú: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Mañuga, T., Gutiérrez, H., Rodríguez, J., & Villarreal, A. (2010). *Tratamiento de residuos de DQO generados en laboratorios de análisis ambientales*. Cali, Colombia: Ingeniería e Investigación .

Martínez, R., Certucha, M., Z. P., Gómez, A., & L., A. (2016). *Remoción de hierro y manganeso de un efluente contaminado utilizando una resina quelante*. Sonora, México: Universidad de Sonora.

Mera, A., Andrade, B., & Ortiz, M. (2007). *Alternativa para la segregación de residuos químicos generados en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad del Cauca*. Colombia: Universidad del Cauca.

Moyano, C. (2017). *Propuesta de recuperación de solventes provenientes de desechos de tintas flexográficas, con miras a la certificación ambiental ecuatoriana*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, Departamento de Posgrado.

Octave, L. (2004). *Ingeniería de las reacciones químicas* . México: REPLA S.A.

Ossa, K. (2007). *Elaboración del plan para la gestión de residuos químicos del laboratorio de análisis de aguas y alimentos de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira.

Paredes, U. (2012). *Propuesta de Manejo de los Residuos Químicos Líquidos Generados en los Laboratorios para Alimentos del Instituto Nacional de Pesca*. Guayaquil, Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.

Quintero, L. (2015). *Plan de Manejo Ambiental de desechos producidos en el Laboratorio de Análisis y Evaluación Ambiental AQLAB*. Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Ribeiro, M., Paim, T., & Rocha, S. (2008). *Utilización de hidróxido de magnesio en la precipitación de metales pesados*. Brasil: Revista de la Facultad de Ingeniería.

Salas, J., Quesada, H., & Harada, K. (2009). *Manejo de desechos peligrosos en los laboratorios del Instituto Tecnológico de Costa Rica (III Fase)*. Tecnología en Marcha.

Soriano, R. (2018). *Evaluación de la eficiencia en neutralización y remoción de metales pesados (Fe, Cu, Pb, Zn) del drenaje ácido de mina con lodos de baja densidad a nivel planta piloto de Cía. Minera Huancapeti – 2016*. Huaraz, Ancash, Perú: : Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”.

TULSMA. (2015). *Acuerdo Ministerial 061, Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria TULSMA, Registro Oficial 316 del 04 de mayo de 2015*. Quito, Ecuador: Ministerio del Ambiente.

Urgiléz, M. (2018). *Tratamiento de residuos líquidos generados en el Laboratorio de química orgánica con métodos de oxidación avanzada*. Chimborazo, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Vaca, L. (2012). *Elaboración del manual para el adecuado manejo de residuos químicos peligrosos en la Facultad de Ciencias Químicas*. Quito, Ecuador: Universidad Central del Ecuador.

Vega, A. (2016). *Propuesta de Modelo de Gestión Integral para residuos peligrosos en Laboratorios de Docencia: Caso del Laboratorio de Docencia de la Escuela de Ciencias Ambientales, Universidad Nacional*. Heredia, Costa Rica: Universidad Nacional.

