

Remoción de metales pesados en aguas de desecho por sorción sobre cerámicos preparados a partir de lodos residuales

Adriana Isabel Arenas Arenas

Trabajo de grado para obtener el título de Magister en Química Ambiental

Directora:

Ángela Marcela Montaña Angarita

PhD Química

Codirectora:

Claudia Paulina González Cuervo

PhD Ciencias-Física.

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ciencias

Escuela de Química

Magister en Química Ambiental

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

A Dios.

A mi familia; por su comprensión cuando estuve ausente.

A mi madre y hermano, por su gran apoyo, fortaleza y amor.

A las docentes; Angela Montaña y Claudia Paulina González, por su gran apoyo, comprensión y constante ayuda.

Al laboratorio de química ambiental y al grupo de investigación LQOBio y a mis compañeros del grupo de investigación, por ese trabajo en equipo, compañía y amistad.

A los laboratorios Microscopia Electrónica y al laboratorio de Difracción de Rayos X de la UIS

Al laboratorio de consultas industriales de la Escuela de química.

A la escuela de Química, a la Especialización y Maestría en química ambiental

Contenido

	Pág.
Introducción	15
1. Marco de referencia	17
1.1 Antecedentes	17
1.2 Antecedentes legales	19
1.2.1 Constitución política de Colombia.....	20
1.2.2 Decreto ley 2811 de 1974.	20
2. Marco teorico	21
2.1 Medio ambiente	21
2.2 Gestión ambiental	22
2.2.1 Impactos al ambiente.	22
2.2.2 Impactos a la salud.....	22
2.2.3 Impactos al medio ambiente.	23
2.3 Gestión integral de residuos.....	25
2.4 Tratamiento de residuos.....	25
2.4.1 Residuos peligrosos.	25
2.5 Adsorción como alternativa de tratamiento de residuos	25
2.5.1 Adsorción física o fisisorción.	26
2.5.2 Adsorción química o quimisorción.....	26

2.5.3 Mecanismos de adsorción.	26
2.6 Materiales adsorbentes utilizados para el tratamiento de residuos	27
2.6.1 Las arcillas.	27
2.6.2 La bentonita.	28
2.7 Generación de residuos	29
3. Propuesta y plan de trabajo	30
3.1 Hipótesis	30
3.2 Objetivos	31
3.2.1 Objetivo General.	31
3.2.2 Objetivos Específicos.....	31
4. Metodología	32
4.1 Adecuación de los materiales cerámicos.	32
4.2 Caracterización de los sistemas Cerámicos	32
4.3 Ensayos de sorción de metales en soluciones preparadas en el laboratorio, sobre el material cerámico.	33
4.3.1 Ensayos de sorción.....	33
4.3.1.1 Ensayos de cadmio (II).	33
4.3.1.1.1 Primer ensayo.....	34
4.3.1.1.2 Segundo ensayo.	34
4.3.1.1.3. Tercer ensayo:	35
4.3.1.1.4 Cuarto ensayo.....	35
4.3.1.2 Ensayos de remoción de Cromo.	36
4.3.1.2.1. Primer ensayo, para cromo total.	36

4.3.1.2.2 Segundo ensayo, para cromo.	36
4.4 Recolección y caracterización de los residuos líquidos objetos de estudio.	36
4.4.1 Quinto ensayo: Muestra problema o muestra RESPEL.	37
4.5 Técnicas de Caracterización.	37
4.5.1 Difracción de rayos X de muestras policristalinas.	38
4.5.2 Absorción atómica (A.A).	38
5. Resultados y discusión.	39
5.1 Resultados ensayos de sorción.	39
5.1.1 Resultados para pruebas de sorción de cadmio.	39
5.1.1.1 Resultados ensayo 1.	40
5.1.1.2 Resultados ensayo 2.	41
5.1.1.3 Resultados ensayo 3.	44
5.1.1.4 Resultados Prueba 4.	46
5.2 Resultados pruebas con cromo.	47
5.2.1 Resultados prueba No.1 Cromo.	48
5.2.2 Resultados ensayos de cromo a diferentes concentraciones con el cerámico L4.	51
5.3 Resultados muestras RESPEL.	53
5.3.1 Resultados pruebas de sorción en muestras RESPEL con el cerámico L1, para la muestra problema denominada M1 para determinación de cadmio (II).	53
5.3.2 Prueba mezcla de cationes.	55
6. Conclusiones.	58
7. Recomendaciones.	61
Referencias Bibliográficas.	62

Apéndices.....	68
----------------	----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1: Distribución de intoxicaciones agudas según sustancia tóxica causal.	23
Figura 2: Cantidad total de residuos químicos generados año, en la UIS	30
Figura 3: Curva de calibración del cadmio	40
Figura 4: Tiempos de sorción Vs porcentaje de remoción para los Cerámicos L1 y L4	43
Figura 5: Resultados de sorción a diferentes concentraciones de cadmio (II)	45
Figura 6: Resultados a diferentes concentraciones de cadmio (II)	46
Figura 7: Curva de calibración del cromo	48
Figura 8: Resultados ensayos de remoción de cromo a diferentes tiempos con el cerámico L1	49
Figura 9: Resultados ensayos a diferentes tiempos cerámico L4	50
Figura:10 Resultados de los ensayos de remoción a diferentes concentraciones de cromo con el cerámico L4	52

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Caracterización de residuos químicos generados en la UIS	29
Tabla 2: Datos para la curva calibración del cadmio	39
Tabla 3: Resultados pruebas de potencial de sorción de 7 sistemas cerámicos.....	41
Tabla 4: Resultados de los ensayos de sorción de cadmio (II), en cerámico nombrado como L1	41
Tabla 5: Resultados de los ensayos de sorción de cadmio en cerámico nombrado como L4.....	42
Tabla 6: Resultados a diferentes concentraciones de cadmio (II) con L1	44
Tabla 7: Capacidad de sorción a variando la cantidad de material cerámico adsorbente.....	46
Tabla 9: Curva calibración del cromo.....	47
Tabla 10: Ensayos de remoción de cromo con el cerámico L1	49
Tabla 11: Ensayos de remoción de cromo con el cerámico L4	50
Tabla 12: Resultados ensayos de remoción a diferentes concentraciones de cromo con el cerámico L4	52
Tabla 13: Pruebas de sorción del cromo en muestras reales con el cerámico L4, para la muestra problema denominada M2.....	53
Tabla 14: Ensayos de la muestra problema M1, con diferentes cantidades de cerámico L1.....	54
Tabla 15: Ensayo muestra M1 con lodo y arcilla	54
Tabla 16: Resultados pruebas de sorción en muestra MCd, con el cerámico L1 y L4.....	55
Tabla 17: Resultados pruebas de sorción en muestra MCr, con el cerámico L1 y L4.....	56

Tabla 18: Concentración de cada metal en la mezcla según curva de calibración.	56
---	----

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Difractograma de la muestra L1	68
Apéndice B: Fases mineralógicas de la muestra L1	69
Apéndice C: Difractograma de la muestra L1 impregnada de Cd	70
Apéndice D: Fases mineralógicas de la muestra L1 impregnada de Cd	71
Apéndice E: Difractograma de la muestra L1 impregnada de muestra problema	72
Apéndice F: Fases mineralógicas de la muestra L1 impregnada de muestra problema.	73
Apéndice G: Difractograma de la muestra L4	74
Apéndice H: Fases mineralógicas de la muestra L4	75
Apéndice I. Difractograma de la muestra L4 impregnada con Cr	76
Apéndice J: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con Cr	77
Apéndice K: Difractograma de la muestra L4 impregnada con muestra problema	78
Apéndice L: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con muestra problema	79

Resumen

Título: Remoción de metales pesados en aguas de desecho por sorción sobre cerámicos preparados a partir de lodos residuales*

Autor: Adriana Isabel Arenas Arenas**

Palabras clave: Material sorbente, Ensayos de sorción, Remoción de contaminantes, Metales pesados, Cadmio y Cromo

Descripción:

En Colombia, 2015 se generaron 406.078 toneladas de residuos peligrosos. Teniendo en cuenta los impactos causados por estos residuos sobre los recursos naturales, surge la gestión integral de los residuos, la cual tiene por objeto mitigar los impactos al medio ambiente, mediante actividades como tratamiento y disposición final segura de residuos peligrosos. La Universidad Industrial de Santander -UIS- desecha toda clase de residuos, donde los Respel corresponden al 27%, del total de residuos generados diariamente. Conscientes del impacto y los altos costos financieros que acarrea su disposición final segura, se desarrolló este proyecto de investigación; logrando la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales, generados en los laboratorios de la universidad, mediante la utilización de 7 sistemas cerámicos, (elaborados previamente), mezcla de lodos provenientes de una PTAP y arcilla. El material cerámico se probó como material sorbente en residuos de metales pesados con cadmio y cromo, logrando una eficiencia de remoción para estos metales del 98%. Teniendo en cuenta parámetros como concentración del metal, tiempo de sorción, cantidad del material cerámico y pH. Utilizando diferentes técnicas de análisis como: DRX; A.A; logrando así comprobar la eficiencia del material para remoción de contaminantes en aguas residuales.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Maestría en química Ambiental Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita, PhD Química. Codirectora: Claudia Paulina González Cuervo, PhD Ciencias-Física.

Summary

Title: Removal of heavy metals in waste water on ceramics prepared from waste sludge *

Author: Adriana Isabel Arenas Arenas **

Keywords: Sorbent material, Sorption tests, Pollutant removal, Heavy metals, Cadmium and Chrome

Description

In Colombia, 2015, 406,078 tons of hazardous waste were generated. Taking into account the impacts caused by this waste on natural resources, the integral management of the waste arises, which aims to mitigate the impacts to the environment, through activities such as treatment and safe final disposal of hazardous waste. The Industrial University of Santander -UIS- discards all kinds of waste, where Respel corresponds to 27%, of the total waste generated daily. Aware of the impact and high financial costs of its safe final disposition, this research project was developed; achieving the removal of heavy metals present in wastewater, generated in the laboratories of the university, through the use of 7 ceramic systems, (previously prepared), mixing sludge from a PTAP and clay. The ceramic material was tested as a sorbent material in heavy metal residues with cadmium and chromium, achieving a removal efficiency for these metals of 98%. Taking into account parameters such as metal concentration, sorption time, amount of ceramic material and pH. Using different analysis techniques such as: DRX; A.A; thus managing to verify the efficiency of the material for removal of contaminants in wastewater.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ciencias. Escuela de Química. Maestría en química Ambiental Directora: Ángela Marcela Montaña Angarita, PhD Química. Codirectora: Claudia Paulina González Cuervo, PhD Ciencias-Física.

Introducción

En Colombia existe un evidente aumento en la tasa de contaminación de las vertientes hídricas, de las cuales no existen hoy en día cifras actualizadas que brinden información real de la composición y la cantidad de residuos que terminan en lagunas, lagos, ciénagas y ríos.

La tasa de contaminación del agua puede ser estimada en 2000 millones de metros cúbicos diarios. Esto hace evidente la crisis de estos recursos para los próximos años, lo que podría comprometer el cumplimiento de uno de los objetivos de Desarrollo del Milenio de la Organización de Naciones Unidas. (ONU-DAES 2005-2015, n.d.). En septiembre de 2015, la Asamblea general de la ONU, acordó como objetivo: “asegurar la disponibilidad y la gestión sostenible de agua y saneamiento para todos”, otorgándole al agua un carácter prioritario.(Reyes, Vegara, Torres, Diaz, & Gozanlez, 2016).

A su vez, la contaminación por presencia de lodos residuales genera un aumento de la concentración de iones de Al y Si proveniente de los coagulantes utilizados en los procesos de floculación, coagulación y sedimentación. Durante la potabilización del agua para el consumo humano, las plantas de tratamiento de agua potable (PTAP) agregan coagulantes al agua que captan de los ríos, para ayudar a la desestabilización y formación de “flocks” que permiten una rápida sedimentación del material suspendido que no ha quedado en los filtros. Los coagulantes de mayor uso a nivel mundial son aquellos a base de aluminio; la química de las especies formadas depende de la concentración de aluminio en solución, el número de ligandos a los que esté enlazado y los aniones presentes. Una vez agregado el coagulante, comienza la formación de complejos (en el caso del sulfato de aluminio moléculas de agua unidas generalmente a hidróxido de aluminio) y la

sedimentación se inicia, generando un aumento considerable de lodo con alto contenido de óxidos de aluminio, silicio, hierro, magnesio entre otros, los cuales son minerales naturales, que al estar presentes en el lodo resultante permiten considerarlo como una mezcla arcillosa natural.

Este proyecto propone la remoción de metales pesados presentes en aguas residuales, mediante la utilización de un material cerámico, fabricado según el procedimiento estandarizado en el laboratorio LQOBio (Baron G; Montano A; Gonzalez C, 2018), elaborado con mezcla de lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable y bentonita. El material cerámico será probado como sorbente en residuos acuosos generados en los laboratorios de la escuela de química de la Universidad Industrial de Santander, los cuales según cifras del Programa de Gestión de Residuos el 80% corresponden a soluciones acuosas con metales pesados. Todos estos residuos en este momento no reciben ninguna clase de tratamiento, solo se rotulan, envasan y entregan a una empresa gestora, para su disposición final.

El desarrollo de este libro se desarrolló mediante 6 capítulos, desarrollados de la siguiente forma: El capítulo 1, encontraremos los antecedentes sobre estudios realizados con diferentes materiales sorbetes, desarrollados para el tratamiento de residuos líquidos, específicamente metales en solución y el marco legal aplicable a esta tesis. En el capítulo 2, encontraremos el marco teórico enfocado hacia la gestión ambiental, impactos ambientales, tratamiento de residuos e información sobre los materiales utilizados para el desarrollo de este trabajo. En el capítulo 3, se plantea el plan de trabajo, en este capítulo encontraremos la hipótesis y los objetivos planteados para el desarrollo de este proyecto. En el capítulo 4, se desarrolla la metodología propuesta mediante ensayos para los metales de interés, cadmio y cromo, tratados con 7 clases de materiales cerámicos, desarrollados previamente por el grupo de investigación LQOBio. En el capítulo 5, se muestran los resultados y sus análisis, cada uno con sus respectivas tablas y gráficos, elaborados

para cada ensayo. Finalmente, en el capítulo 6, se anexan los reportes de difracción de DRX, las conclusiones, recomendaciones resultados de este trabajo y la bibliografía utilizada para la elaboración de este documento.

1. Marco de referencia

1.1 Antecedentes

En Colombia, 2015 se generaron 406.078 toneladas de residuos peligrosos y en total en el mundo en ese mismo año se generaron 5.180.401 .604 toneladas de Respel. (IDEAM, 2017; Santos, Murillo, Botero, Franco, & Rodriguez, 2016).

Estudios de toxicidad y bioacumulación de cadmio en pasto llanero en Colombia, demuestran que este metal está presente en grandes cantidades en el suelo absorbiéndose en esta planta un 23% en la raíz y un 77 % en las hojas y el tallo, siendo la vía principal de ingresar a la cadena alimenticia cuando son consumidos y bioacumulados por animales domésticos.(Arroyave Q., Araque M., & Pelaez J., 2010)

Igualmente, otros estudios demuestran que la leche de bovinos que pastorean en pastos o forrajes, contaminados por metales pesados (Hg, As, Cd y Pb), presentaban concentraciones de dichos elementos en la leche y carne. (Reyes et al., 2016)

Estudios en suelos agrícolas en la región del Ariari Meta, Colombia, encontraron grandes concentraciones de cadmio, cromo y otros metales pesados en matrices de suelo y plantas,

provenientes en su mayoría de fertilizantes y plaguicidas. (Juan D. Mahecha-Pulido, Juan M. Trujillo-González, & Marco A. Torres-Mora., 2015).

Estudios en agua y suelo en una población en dos poblaciones de la India (Varanasi y Rewa), encontraron que las concentraciones de metales pesados como cromo, cadmio y otros metales tóxicos sobrepasaban los límites seguros para ingesta en humanos, en verduras cultivadas y regadas con agua proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales, siendo esto un alto riesgo para la salud de las personas que viven en estas zonas y se alimentan con estos vegetales.(Chauhan & Chauhan, 2014; Singh, Sharma, Agrawal, & Marshall, 2010)

En Colombia, estudios previos realizados en la Cuenca alta del Rio Bogotá, encontraron altas concentraciones de cadmio y otros metales tóxicos, en vegetales cultivados en este sector, en el año 1995, los cuales superaban los límites establecidos por la organización mundial de la salud (OMS), permisibles en productos alimenticios. En esta misma cuenca, posteriormente se realizó un estudio de impacto ambiental, donde se encontraron grandes concentraciones de cadmio en aguas, lodos y sedimentos, provenientes de actividades como la ganadería, agricultura, e industrias, las cuales descargan los residuos, sin ningún tipo de tratamiento.(Acosta De armas & Montilla Peña, 2011; González Galeano & Mejía C, 2000).

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y a raíz de la problemática que abordan los efluentes provenientes de las industrias y empresas prestadoras de servicios, y la amenaza de estos a los ecosistemas y a la salud humana, se ha utilizado una gran variedad de métodos para la eliminación de estos contaminantes, de las aguas residuales antes de ser vertidos al alcantarillado o a los efluentes de agua. Estos métodos incluyen el tratamiento biológico, la coagulación, la flotación, la oxidación, la hiperfiltración. y la adsorción, es esta última objeto de estudio de este trabajo, en el cual suelen ser predominantes aquellas sustancias materiales altamente absorbentes

como el uso de biomasa (adsorción de metales pesados), proveniente del aprovechamiento del material vegetal, como cascaras de naranja (Acosta Rodriguez, González Sanchez, Moctezuma Zárate, Cárdenas González, & Martinez Juárez, 2012; Roca Gracia, 2019); cascarilla de arroz (Eggs, Salvarezza, Azario, Fernández, & del García, 2012); bagazo de caña (Lajos, Omar, Garcia, Rodríguez, & Curvelo Sanchez, 2009)(Bermejo Campos, 2016); bagazo de yuca (Albis Arrieta, Ortiz Toro, & Martínez De la Rosa, 2017), carbón activado (Basso, E.G. Cerella, & A.L. Cukierman, n.d.; Daniel et al., 2006; Gelvez, Laverde, & Ecalante, 2008).

Igualmente, se está investigando el uso de materiales con alta porosidad para la remoción de cromo hexavalente (Albis Arrieta et al., 2017; Arriagada Hernan; Garcia Rafael; Cid Ruby, 2010; Benavides, Vivas, & Sarria, 2007) y cadmio (Basso et al., n.d.; Bermejo Campos, 2016; Gaitan & Rodriguez, 2004; Of, Through, Adsorbents, In, & Bed, n.d.), utilizando como material adsorbente las arcillas (Baròn, Montano, & González, 2018; Carriazo, Barrera, & Saavedra, 2005; Of et al., n.d.; Shakoor et al., 2019), las bentonitas (Vieira, Neto, Gimenes, & da Silva, 2010), y las zeolitas, materiales altamente absorbentes y de gran uso para la encapsulación y adsorción de metales pesados.(Arriagada Hernan; Garcia Rafael; Cid Ruby, 2010; Rodríguez-Fuentes & Rodríguez, 2002; Wang, Li, & Zhu, 2007)

1.2 Antecedentes legales

Las disposiciones legales vigentes aplicables al proyecto son según:

1.2.1 Constitución política de Colombia. Los artículos:

- *Artículo 8:* Es obligación del Estado y de las personas proteger las riquezas culturales y naturales de la Nación.
- *Artículo 58:* La propiedad es una función social que implica obligaciones. Como tal le es inherente una función ecológica.
- *Título II Capítulo III Artículo 78 al 82:* Derechos colectivos y del ambiente, su regulación y protección por parte del estado.
- *Artículo 332:* El estado es propietario del subsuelo y de los recursos naturales no renovables, sin perjuicio de los derechos adquiridos y perfeccionados con arreglo a las leyes preexistentes.

1.2.2 Decreto ley 2811 de 1974. Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente.

- *Ley 99 de 1993:* Por la cual se crea el MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental –SINA y se dictan otras disposiciones.
- *Decreto 4741 de 2005:* El presente decreto tiene por objeto prevenir la generación de residuos o desechos peligrosos, así como regular el manejo de los residuos o desechos generados, con el fin de proteger la salud humana y el ambiente.
- *Artículo 2o. alcance:* Las disposiciones del presente decreto se aplican en el territorio nacional a las personas que generen, gestionen o manejen residuos o desechos peligrosos.

- *Resolución 0631 de 2015:* esta resolución tiene por objeto dictar las regulaciones de carácter general tendientes a controlar y reducir la contaminación hídrica en el territorio nacional.
- *Artículo 1. Objeto y alcance:* Esta resolución establece los parámetros, valores y límites máximos que deberán cumplir quienes realizan vertimientos al alcantarillado público y a los cuerpos de aguas superficiales.

2. Marco teorico

2.1 Medio ambiente

El medio ambiente es el conjunto de elementos abióticos (energía solar, suelo, agua y aire) y bióticos (organismos vivos) que integran la delgada capa de la Tierra llamada biosfera, sustento y hogar de los seres vivos. Nuestro planeta constituye un conjunto medioambiental, en el que todos los elementos interaccionan entre sí, incluido el hombre.

La contaminación está ampliamente ligada con la actividad humana siendo los principales contaminantes: Vertidos de aguas residuales urbanas a los medios acuáticos, vertidos industriales generados por el refinamiento del petróleo, la industria de la metalurgia, las industrias de papel, las químicas y farmacéuticas.(Guerra Moya, n.d.; Pollutions, 2017)

Recurso hídrico: El agua es un recurso básico para el ser humano; sin embargo, el acceso a ella continúa siendo una gran dificultad para muchas comunidades de países en desarrollo. Los vertimientos generados por las actividades industriales y fuentes domésticas, aportan

contaminantes como: disolventes, pesticidas, herbicidas, petróleo, PCBs, sustancias químicas entre estas encontramos los metales y sus compuestos.(Ambiente, n.d.; WWF, 2019)

Recurso suelo: El suelo también se ve afectado por excesivas concentraciones de metales en el suelo podrían impactar la calidad de los alimentos, la seguridad de la producción de cultivos y la salud del medio ambiente, ya que estos se mueven a través de la cadena alimenticia vía consumo de plantas por animales y estos a su vez por humanos. (Puga, Sosa, Lebgue, & Quintana, 2006).

2.2 Gestión ambiental

La gestión ambiental es un proceso que está orientado a resolver, mitigar y/o prevenir los impactos al medio ambiente, con el propósito de lograr un desarrollo sostenible.(Red de Desarrollo Sostenible, 2002)

2.2.1 Impactos al ambiente. Los residuos peligrosos causan un gran impacto a la salud y al medio ambiente, gracias a sus características de toxicidad y acumulación en el ambiente

2.2.2 Impactos a la salud. Los residuos peligrosos causan grandes afectaciones a la salud de las personas, según estudios demostraron que la acumulación del cadmio en las arterias son un factor de riesgo de desarrollar enfermedad coronaria, pues produce estrés oxidativo, hipertensión arterial y arterosclerosis. (Ujueta et al., 2018). Igualmente análisis realizados en cabello de humanos, relacionaron las cantidades de metales contaminantes disponibles en estas fibras, con las condiciones patológicas presentadas por el paciente con niveles, en este caso altos de cadmio y su afectación a diferentes órganos del cuerpo como el sistema renal, pulmonar óseo, arterial

(Calderón, 2012). En un estudio realizado en trabajadores involucrados en el proceso productivo del cuero, y población cercana a las curtiembres, expuestos a vapores de cromo, presentaban niveles considerables de cromo en orina, siendo esta una de las causas de alteraciones de Salud de esta población expuesta a las actividades de Curtiembres en Bogotá, Colombia.(Cuberos, Rodríguez, & Prieto, 2009).

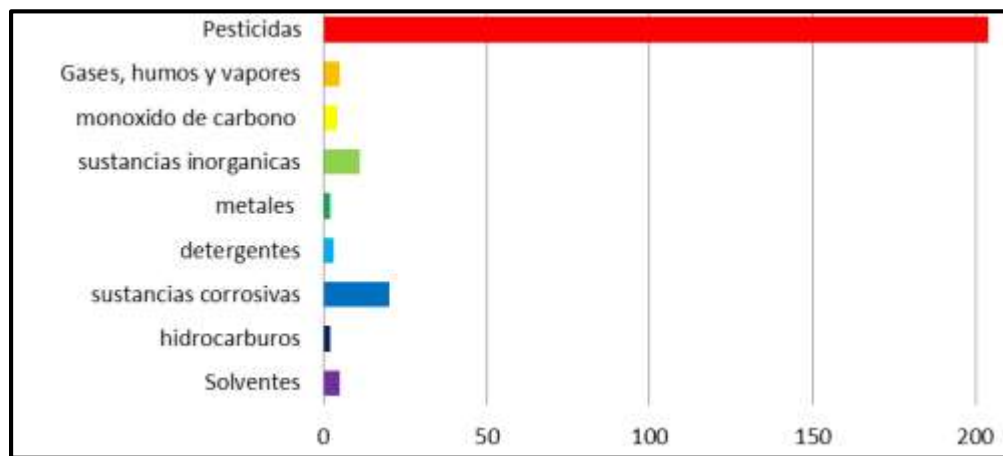


Figura 1: Distribución de intoxicaciones agudas según sustancia tóxica causal (Santos C, Uribe, Carreño S, & Bonilla M, 2012)

Según **Figura 1** datos recolectados en el sistema de Vigilancia Epidemiológica, en Colombia en el 2010, se notificaron 364 intoxicaciones agudas por sustancias tóxicas. (Santos C, Uribe, Carreño S, & Bonilla M, 2012)

2.2.3 Impactos al medio ambiente. La contaminación del aire, agua y suelo por metales pesados y metaloides es una de las más severas que comprometen la seguridad alimentaria y la salud pública a nivel global.

Los metales y sus compuestos, de mayor riesgo para la salud, son los compuestos organometálicos que pueden formarse cuando los metales del agua reaccionan con los compuestos orgánicos del agua. Los ejemplos comunes incluyen Hg, Pb, Cd, As y Cr, los cuales causan envenenamiento del agua. (Morales, Díaz Baéz, Pica Granados, Forget, & Feola, 2004)

El cadmio, es un metal relativamente escaso, ya que ocupa el puesto 67 del orden de abundancia relativa de los elementos en la naturaleza, y no se considera un elemento esencial, ni para los animales ni para las plantas, puesto que no cumple ningún papel o función biológica en el organismo, y por el contrario se considera altamente toxico tanto para las plantas como para los animales. (Acosta De armas & Montilla Peña, 2011)

El Cromo: El Cr (III) es menos tóxico que el Cr (VI), pero se oxida fácilmente a este que es carcinogénico. El Cr^{+3} es un elemento esencial para los mamíferos, participa en el metabolismo de lípidos y proteínas, pero por ser muy móvil puede difundir a través de la membrana celular sufriendo oxidación o unión a otra molécula biológica con efectos tóxicos.(Arriagada Hernan; Garcia Rafael;Cid Ruby, 2010)

Los metales pesados pueden: (Acosta De armas & Montilla Peña, 2011)

- Quedar retenidos en el suelo, ya sea disueltos en la solución del suelo o bien fijados por procesos de adsorción, complejación y precipitación.
- Ser absorbidos por las plantas y así incorporarse a las cadenas tróficas, pueden pasar a la atmósfera por volatilización.
- Movilizarse a las aguas superficiales o subterráneas

2.3 Gestión integral de residuos

La gestión integral de los residuos en general comprende actividades como recolección, almacenamiento, clasificación, separación, tratamiento y/o aprovechamiento y disposición final segura. (Loayza Pérez Jorge E, 2007)

2.4 Tratamiento de residuos

2.4.1 Residuos peligrosos. De acuerdo con el decreto 4741 de 30 de diciembre de 2005 del Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, un residuo o desecho peligroso es aquel que, por sus características *corrosivas, infecciosas, reactivas, explosivas, tóxicas o inflamables* puede presentar un riesgo para la salud humana y el medio ambiente. (Ministerio de Ambiente, 2005)

Los tratamientos de residuos son empleados para disminuir su peligrosidad, pueden ser físicos, químicos, biológicos, térmicos o avanzados. (Loayza Pérez Jorge E, 2007)

2.5 Adsorción como alternativa de tratamiento de residuos

La adsorción es una operación de separación en la que se busca la separación de un componente (adsorbible) disuelto en una corriente, gas o líquida, por retención sobre un sólido (adsorbente). En el momento en el que el soluto pasa a estar retenido sobre la superficie del adsorbente se denomina adsorbato. La adsorción es, por tanto, un fenómeno superficial que implica el aumento

de la concentración de un determinado compuesto sobre la superficie de un sólido. La adsorción se puede clasificar en dos tipos generales:(Mestanza M, Rodriguez A, 2012)

2.5.1 Adsorción física o fisisorción. Las interacciones que se establecen entre la superficie del sólido y el adsorbato son de naturaleza física, fundamentalmente fuerzas de Van der Waals. No se produce, por tanto, compartición ni transferencia de electrones, manteniéndose la individualidad del sólido y del adsorbato.

2.5.2 Adsorción química o quimisorción. Las fuerzas que se establecen son verdaderos enlaces químicos, perdiéndose la individualidad de las moléculas y resultando un fenómeno irreversible. No ocurre sobre toda la superficie del sólido, si no solamente sobre los centros activos.

2.5.3 Mecanismos de adsorción. La adsorción es una operación de transferencia de masa muy usada en la práctica para remover contaminantes. Las arcillas y zeolitas son adsorbentes muy usados para la remoción de metales pesados, por su elevada capacidad de adsorción e intercambio de iones, baja permeabilidad, capacidad de hinchamiento, estabilidad química y física y elevada área superficial. El grado de remoción de metales no es solo una función de la capacidad de intercambio catiónico de las arcillas, la adsorción de iones implica varios procesos que incluyen la formación de complejos superficiales, intercambio de iones y precipitación superficial. La adsorción de los aniones metálicos puede ocurrir en diferentes sitios de las partículas de arcillas, y el lugar puede variar según cada metal para cada ion metálico el sitio de preferencia de adsorción puede depender de factores como fuerza iónica, el pH y los aniones presentes en la solución, concentraciones del adsorbente y del adsorbato. (Carbonel Ramos, 2018)

2.6 Materiales adsorbentes utilizados para el tratamiento de residuos

El proceso de adsorción es una técnica adecuada para eliminación de contaminantes inorgánicos y orgánicos de las aguas residuales. Debido a las ventajas significativas como bajo costo, disponibilidad, rentabilidad, facilidad de operación, eficiencia y efectividad que otras técnicas. Los absorbentes más comúnmente utilizados son las arcillas y las zeolitas.

La capacidad de intercambio iónico en arcillas, minerales feldespatoideos y zeolitas, ha sido fundamental en el tratamiento de las aguas residuales contaminadas, durante los últimos años.

Las zeolitas pueden ser sintéticas y naturales, estas últimas se forman en variedad de entornos geológicos, y son formados por variedad de entornos precursores como la ceniza de volcánica, arcilla, feldspatos, sílice biogénica y formas de cuarzo, las más abundantes son: modernita, clinoptilolita, erionita, chabazita, phillipsita y analcita. Las arcillas pueden ser usadas para tratamiento de aguas residuales gracias a su capacidad de intercambio iónico. (Arriagada Hernan; Garcia Rafael; Cid Ruby, 2010).

2.6.1 Las arcillas. Se encuentran naturalmente en la superficie de la tierra, compuestas principalmente de sílice, alúmina, agua y roca erosionada.(Uddin, 2017). Poseen grano fino y es un eficaz adsorbente para trazas pequeñas de iones metálicos presentes en solución, Desde el punto de vista mineralógico, engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades fisicoquímicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a 2 mm). Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños; incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldspatos, etc.), pueden ser considerados partículas arcillosas

cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan los 2 mm. (Bravo & Ri Risio, 2004)

La capacidad de absorción de las arcillas está directamente relacionada con las características texturales (área específica y porosidad) y existen dos tipos de procesos que difícilmente se dan en forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato)

2.6.2 La bentonita. Es una roca compuesta esencialmente por minerales del grupo de las *esmeclitas*, los criterios de clasificación utilizados por la industria se basan en su comportamiento y propiedades fisicoquímicas; la clasificación industrial más aceptada establece tipos de bentonitas en función de su capacidad de hinchamiento en agua. (Echavarria, Moreno, Ramírez, Tamayo, & Saldarriaga, 1998)

Una propiedad fundamental de las *esmeclitas* (grupo a la cual pertenecen las bentonitas). Es la capacidad intercambio iónico, en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC), se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes: (Bravo & Ri Risio, 2004)

- Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.
- Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.
- Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

2.7 Generación de residuos

La Universidad Industrial de Santander (UIS), debido a sus actividades misionales genera todo tipo de residuos, dentro de los cuales tenemos residuos peligrosos (químicos), ordinarios (reciclables y no reciclables) y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs).

La gestión actual de estos residuos en la universidad es el almacenamiento y entrega a una empresa gestora, sin ningún tipo de tratamiento preliminar para eliminar su toxicidad. Asumiendo altos costos financieros, generando responsabilidad compartida, en cuanto a la gestión final de los mismos.

El costo anual de esta gestión (recolección interna, almacenamiento temporal y disposición final), es de aproximadamente 70 millones de pesos y de 15 millones en envases y etiquetas. (PGIR UIS 2013-2015). Ver **Tabla 1** y **Figura 2**

Tabla 1:

Caracterización de residuos químicos generados en la UIS tomado de (PGIR UIS, 2012)

Tipo de Material	Cantidad Mensual (Kg)*
Químicos líquidos	839
Químicos sólidos	274
Pilas	3,3
Batería	7,6
Fluorescentes	14,3
Tóner	12,3
EPPS	0,5
Material Impregnado	124

Según los datos de la **Tabla 1** el 70% de los residuos peligrosos que se generan en la universidad son soluciones acuosas con metales.

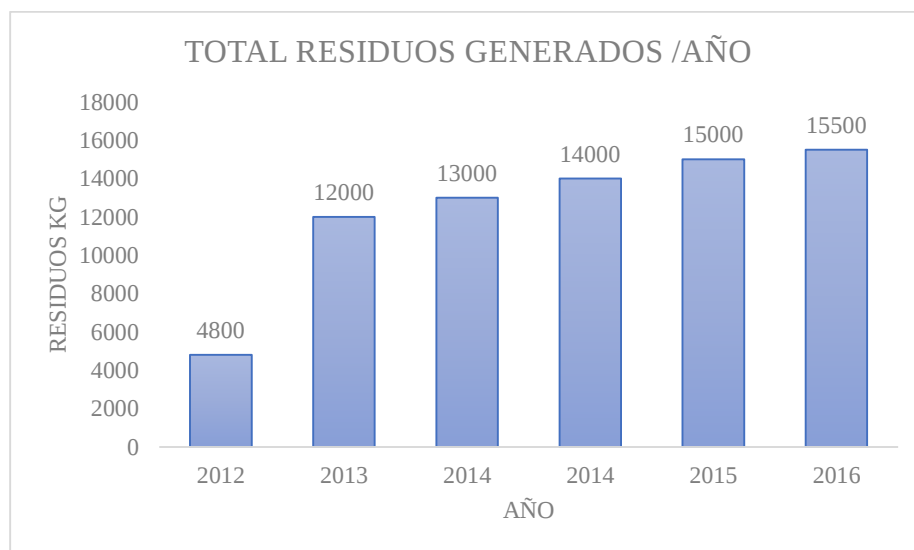


Figura 2: Cantidad total de residuos químicos generados año, en la UIS fuente Informe anual pgr UIS. 2012-2016

3. Propuesta y plan de trabajo

3.1 Hipótesis

Los lodos residuales, usados como aditivos en la preparación de cerámicos absorbentes, pueden ser eficientes para la sorción de cationes metálicos en aguas de desecho de procesos analíticos e industriales

3.2 Objetivos

3.2.1 Objetivo General. Remover cationes metálicos de aguas residuales mediante sorción sobre un material cerámico, fabricado a partir de lodos provenientes de una planta de tratamiento de agua potable.

3.2.2 Objetivos Específicos.

- Caracterizar en términos estructurales y de composición, materiales cerámicos previamente elaborados en el laboratorio de química ambiental, para determinar su potencial como materiales sorbentes.
- Evaluar la capacidad de remoción de metales pesados en soluciones patrón de cromo y cadmio, con los materiales cerámicos previamente caracterizados, para evaluar el potencial de sorción de los cationes, cadmio (II) y cromo total.
- Evaluar el potencial de remoción del material cerámico en los residuos tóxicos, soluciones reales, generadas en el Laboratorio de Consultas Industriales de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, con el objetivo de mitigar el impacto ambiental generado.

4. Metodología

Se utilizó un material cerámico, desarrollado previamente en el laboratorio LQOBio de la Universidad Industrial de Santander, proporcionado por la autoras (Baron G; Montano A; Gonzalez C, 2018). Los cuales han sido denominados como: L1, L3, L4, L6, L7, L10 y L11

4.1 Adecuación de los materiales cerámicos.

Los sistemas cerámicos, fueron tratados mediante molienda, trituración y tamizado, hasta obtener un material particulado, de tamaño de 2 micras.

4.2 Caracterización de los sistemas Cerámicos

Los sistemas cerámicos ya sinterizados se caracterizaron en términos de su composición y morfología, para ello se utilizó difracción de rayos X, DRX para muestras policristalinas, con la cual se conocieron las fases mineralógicas cristalinas que estaban presentes en la muestra. Estos análisis se realizaron, antes y después de los ensayos de sorción. Ver anexos resultados DRX, ver Apéndice A. Difractograma de la muestra L1, Apéndice B: Fases mineralógicas de la muestra L1, Apéndice C: Difractograma de la muestra L1 impregnada de Cd, Apéndice D: Fases mineralógicas de la muestra L1 impregnada de Cd, Apéndice E: Difractograma de la muestra L1 impregnada de muestra problema, Apéndice F: Fases mineralógicas de la muestra L1 impregnada de muestra

problema., Apéndice G: Difractograma de la muestra L4, Apéndice H: Fases mineralógicas de la muestra L4, Apéndice I. Difractograma de la muestra L4 impregnada con Cr, Apéndice J: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con Cr, Apéndice K: Difractograma de la muestra L4 impregnada con muestra problema y Apéndice L: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con muestra problema

4.3 Ensayos de sorción de metales en soluciones preparadas en el laboratorio, sobre el material cerámico.

4.3.1 Ensayos de sorción. Para los ensayos de remoción se utilizaron como variables: la concentración de la solución problema, el tiempo de contacto y la cantidad de material sorbente, con el objetivo de escoger el material cerámico con mejor potencial de sorción, a un tiempo específico y una determinada concentración. El cerámico utilizado en estos ensayos, fue una mezcla en diferentes proporciones de arcilla, lodo arcilloso (proveniente de una planta de agua potable) y un material aditivo, altamente absorbente. Se prepararon siete mezclas, las cuales se sometieron a diferentes ratas de calentamiento, hasta lograr un material estable en su estructura y composición morfológica, con alta resistencia mecánica y resistencia al ataque ácido, altamente absorbente.

4.3.1.1 Ensayos de cadmio (II). Se preparó un patrón de 1000 mg/L Cd, para esto se pesó 1 gramo de sulfato de cadmio octahidratado, el cual se disolvió en 1000 mL de agua acidulada dentro de un balón aforado de 1000 mL. (Linares, Velázquez, & Vargas, 2017)

Se preparó la curva de calibración, según procedimiento del IDEAM para análisis de metales por A.A. (Gaitan & Rodriguez, 2004). De esta solución madre se tomaron 7 alícuotas, para preparar la curva de calibración y la solución problema. Posterior a esto se hizo ajuste de pH: 4-5, según Carbonel, 2018, este valor es el óptimo para sorción de metales en arcillas, a la solución problema para iniciar los ensayos de sorción del metal con el material cerámico. (Vieira et al., 2010) La longitud de onda utilizada para el análisis de cadmio por A.A. fue 228 nm, según manual del equipo y el rango de linealidad para estas concentraciones.

Para este primer análisis, se realizaron ensayos con los 7 tipos de materiales cerámicos, cada uno con diferente composición en cuanto a porcentaje de lodo (proveniente de PTAP), bentonita y arcilla, (Baron G; Montano A; Gonzalez C, 2018) .

4.3.1.1.1 Primer ensayo. En este ensayo la variable a evaluar fue el tipo de material sorbente.

Se hicieron ensayos de remoción del material contaminante a pH: 4-5(Carbonel Ramos, 2018), colocando 25 ml de solución con concentración conocida de 2 ppm de cadmio, en 0.05 gr de cada material cerámico, L1, L3, L4, L6, L7, L10 y L11. Utilizando como tiempo de sorción para este análisis 24 horas. Transcurrido el tiempo indicado anteriormente, cada solución se filtró con papel franja negra y se ajustó el pH a 2.0 (Gaitan & Rodriguez, 2004), con una gota de solución de HNO_3 al 65%. La solución se reservó para su posterior análisis por AA.

4.3.1.1.2 Segundo ensayo. En este ensayo la variable a evaluar fue el tiempo de sorción.

Con los resultados obtenidos en el anterior ensayo, se escogieron los dos materiales con mejor potencial de sorción, L1 y L4. Se realizaron ensayos a diferentes tiempos, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20 y 24 horas. El pH para los ensayos de sorción fue de 4.5-5, la concentración de cadmio

en la solución fue de 2 ppm en un volumen de solución de 25 ml. La cantidad de material sorbente usado fue de 0.05 gramos. Transcurridos los tiempos indicados para cada ensayo, cada solución se filtró con papel franja negra y se ajustó el pH a 2.0 con una gota de solución de HNO_3 al 65%. La solución se reservó para su posterior análisis por AA, y el material sólido se analizó por DRX para el cerámico L1

4.3.1.1.3. Tercer ensayo: En este ensayo la variable a evaluar fue la concentración de cadmio en la solución.

Se prepararon diferentes soluciones de concentración conocida de cadmio (II), las cuales fueron utilizadas como solución problema, estas fueron: 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, y 2.5 ppm de cadmio (II).

En esta prueba se utilizaron los resultados obtenidos en los ensayos 1 y 2. Se realizaron las pruebas de sorción tomando 25 ml de la solución problema y se pesaron 0.05 gr del material absorbente, escogido en los ensayos anteriores, se dejó constante el pH y se tomó el mejor tiempo obtenido en el anterior ensayo. En este ensayo se pudo observar la variación del porcentaje de sorción, a medida que variaba la concentración.

4.3.1.1.4 Cuarto ensayo. En este ensayo la variable a evaluar fue la cantidad de material sorbente.

Se pesaron 0.01, 0.02, 0.03, 0.05, 0.10 y 0.20 gr de material sorbente y se colocó en contacto con la solución problema, dejando constante el pH: 4-5, concentración de la solución problema (escogida en la etapa 3), volumen solución problema 25 ml, tiempo (escogido en la etapa 2), mejor material cerámico (escogido en la etapa 1).

4.3.1.2 Ensayos de remoción de Cromo. El procedimiento seguido para evaluar las mejores condiciones de sorción de cadmio (II), se repitió para ensayos de remoción de Cromo total.

Partiendo de un patrón de certificado marca Merck de Nitrato de Cromo de 1000 ppm. Variando los tiempos de sorción cada 3 horas, iniciado desde 6 hasta 24 horas. La longitud de onda escogida para la lectura de cromo total por A.A, fue de 425 nm, según las especificaciones del equipo para el rango de concentraciones trabajadas. La curva de calibración se preparó utilizando patrones de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 y 3.0 ppm de cromo (Gaitan & Rodriguez, 2004; Linares et al., 2017).

4.3.1.2.1. Primer ensayo, para cromo total. Para este metal se evaluaron tiempos de sorción y concentración de la muestra. Para los ensayos se utilizaron dos materiales cerámicos L1 y L4, los cuales se escogieron teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos para cadmio (II), los cuales presentaron mejores porcentajes de sorción. Este ensayo se realizó utilizando una solución con concentración conocida de 2 ppm de cromo, cantidad de material cerámico de 0.05 g y un volumen de 25 ml de la muestra. Dejando el pH 4-5

4.3.1.2.2 Segundo ensayo, para cromo. Se realizó un posterior ensayo con solo el cerámico L4, variando la concentración del Cadmio (II), desde 0.5, 1, 1.5, 2,2.5 hasta 3 ppm, utilizando 0.05 gr de material sorbente, pH 4-5 y 25 ml de solución, los resultados de este ensayo se analizaron por DRX para el cerámico L4.

4.4 Recolección y caracterización de los residuos líquidos objetos de estudio.

Los residuos líquidos peligrosos, fueron suministrados por el laboratorio de Consultas Industriales, adscrito a la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander. A dichos residuos se les evaluaron interferencias (Co, Fe, y Ni), pH y se evaluó previamente la concentración de los metales objeto de estudio (Cadmio (II) y Cromo total).

4.4.1 Quinto ensayo: Muestra problema o muestra RESPEL. Las soluciones utilizadas para este ensayo fueron suministradas por el laboratorio de consultas industriales, estos residuos provienen de los análisis de A.A. del laboratorio.

En este análisis a las muestras denominadas como: M1 y M2 se les ajustó el pH, con NaOH 5M. Se pesaron 0.05 gr del material cerámico L1 y L 4 respectivamente y se adicionaron 25 mL de la solución desconocida M1 y M2, respectivamente. Las muestras se dejaron en reposo durante 18 horas (tiempo con mejor remoción, según ensayos anteriores). Posteriormente se filtraron las muestras y a cada solución se le ajustó el pH a 2.0, con una gota de solución de HNO₃ al 65%, para eliminar interferencias (Gaitan & Rodriguez, 2004). La solución se preservó para análisis de la concentración de cromo y cadmio por A.A. y el material solido se analizó por DRX.

4.5 Técnicas de Caracterización.

A estos materiales cerámicos nombrados como L1 y L4, se les evaluó su composición morfológica y estructural antes de los ensayos de sorción y después de los ensayos de sorción por DRX. *Los resultados de estos ensayos se incluyen como anexo en este documento.*

4.5.1 Difracción de rayos X de muestras policristalinas. Los análisis de difracción fueron tomados a los cerámicos s, así como al sistema cerámico luego de la remoción del contaminante. Para ello se utilizó un difractómetro de polvo marca Bruker modelo D8 ADVANCE con geometría DaVinci, usando un portamuestras de polimetilmetacrilato (PMMA), una radiación de cobre ($\text{Cu K}\alpha \lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) y un detector lineal LynxEye; los datos se registrarán con un paso de $0,02035^\circ$ (2θ) entre $3,5^\circ - 70,0^\circ$ (2θ), operando con un voltaje de 40 kV y una corriente de 40 mA. Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará (PTG).

Los patrones de difracción obtenidos fueron visualizados mediante el programa POWDER X, con el cual se realizó el refinamiento del perfil, seguido a esto se llevó el perfil refinado al programa DIFFRAC.EVA el cual realiza un proceso de búsqueda de fases cristalinas basado en la superposición de perfiles indexados en la base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).

4.5.2 Absorción atómica (A.A). La espectroscopia de absorción atómica de llama se utilizó para determinar la concentración de iones metálicos en solución, antes y después de los ensayos de sorción. En este equipo pueden determinarse fácilmente en niveles de mg/L (ppm) del metal a analizar. En la práctica, la técnica se basa en una fuente de átomos elementales o iones que están electrónicamente excitados por la luz monocromática, la absorción que se produce se mide por el instrumento.(Orozco, 2016) Este equipo se encuentra en el Laboratorio de Análisis Instrumental de la Escuela de Química de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en la sede central.

5. Resultados y discusión

5.1 Resultados ensayos de sorción

5.1.1 Resultados para pruebas de sorción de cadmio. Curva de calibración del cadmio

Se preparó una curva de calibración de cadmio partiendo de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 hasta 3,0 ppm

Tabla 2.

Datos para la curva calibración del cadmio

Concentración	Absorbancia
0,0	0,006
0,5	0,042
1,0	0,075
1,5	0,107
2,0	0,139
2,5	0,170
3,0	0,200

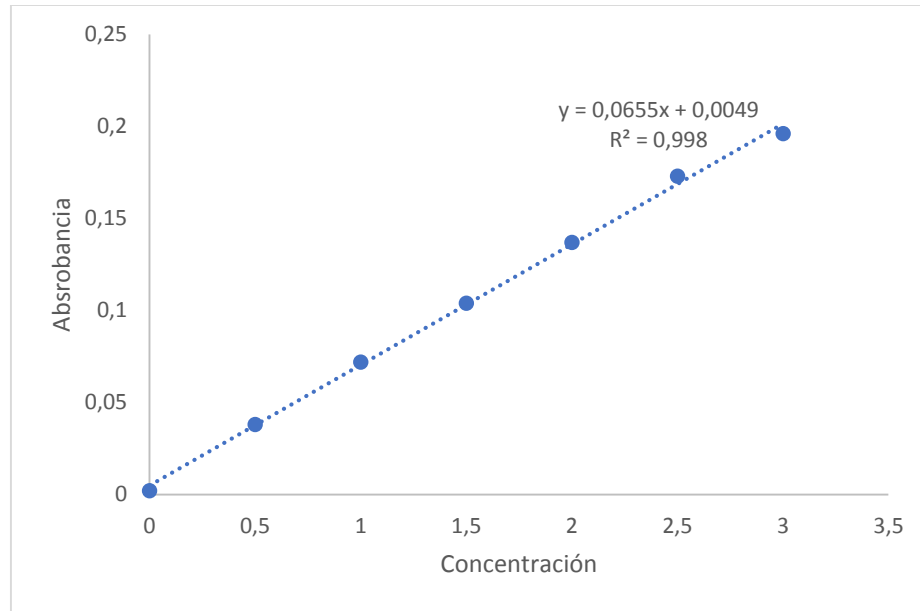


Figura 3: Curva de calibración del cadmio

La ecuación de la curva fue

$$y = 0.0655x + 0.0049 \quad (1)$$

Para calcular la concentración se utilizó la ecuación de la curva de calibración, la cual fue:

$$C = \frac{A - 0.0049}{0.0655} \quad (2)$$

Para calcular la concentración absorbida se utilizó la fórmula:

$$C_{abs} = C_i - C_f \quad (3)$$

Para calcular el porcentaje de remoción se utilizó la fórmula

$$\%Remoción = \frac{(C_i - C_f) * 100}{C_i} \quad (4)$$

(Javadian, Ghorbani, Tayebi, & Asl, 2015)

5.1.1.1 Resultados ensayo 1. El resultado del primer ensayo se puede observar en la **Tabla 3** en este ensayo se utilizaron 7 sistemas cerámicos, preparados previamente en el laboratorio.

Tabla 3.

Resultados pruebas de potencial de sorción de 7 sistemas cerámicos

Cerámico	Porcentaje de remoción%
L1	96,0
L3	89,0
L4	97,0
L6	82,0
L7	94,0
L10	78,0
L11	95,0

Según los resultados obtenidos y reportados en la **Tabla 3**, en esta prueba los cerámicos nombrados como L1 y L4, obtuvieron mejores porcentajes de remoción, los cuales fueron: para L1 fue de **95.64%** y para L4 fue de **96.74%**.

5.1.1.2 Resultados ensayo 2. Los resultados de este ensayo se pueden observar en las **Tabla 4.**, **Tabla 5** y **Figura 4**. En las cuales se pueden analizar los tiempos de sorción para los cerámicos L1 y L4, cada dos horas hasta 24 horas.

Tabla 4:

Resultados de los ensayos de sorción de cadmio (II), en cerámico nombrado como L1

Tiempo de contacto (horas)	Porcentaje de remoción
1	97,2
2	95,0
4	97,0
6	82,2

Tiempo de contacto (horas)	Porcentaje de remoción
8	78,0
10	92,7
12	97,0
14	87,0
16	98,0
18	97,0
20	95,0
22	93,4
24	86,7
26	93,4
28	89,7

Tabla 5:

Resultados de los ensayos de sorción de cadmio en cerámico nombrado como L4

Tiempo horas	Porcentaje de remoción
1	99.0
2	90.0
4	90,4
6	91,2
8	86,7
10	81.0
12	89.0
14	80.0
20	95.0
22	97,2
24	88,2
26	67,8

Tiempo horas	Porcentaje de remoción
28	96,5

Según los resultados obtenidos en las **Tabla 4,Tabla 5** y **Figura 5**, el cerámico L1, obtuvo mejores porcentajes de sorción para el cadmio (II).

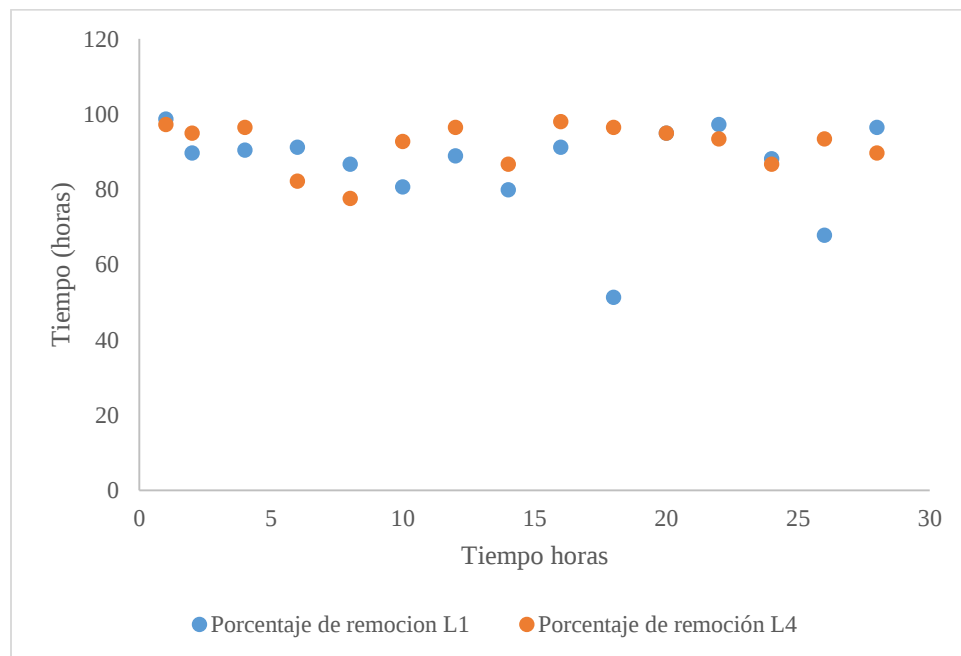


Figura 4: Tiempos de sorción Vs porcentaje de remoción para los Cerámicos L1 y L4

5.1.1.3 Resultados ensayo 3

Tabla 6.

Resultados a diferentes concentraciones de cadmio (II) con L1

Concentración Cd (II)	Porcentaje de remoción
0,5 ppm	83,8
1,5 ppm	61,9
2,0 ppm	68,2
2,5 ppm	84,7
3,0 ppm	15,4
Arcilla 2,0 ppm	-43,50
Lodo 2,0 ppm	-72,03

Según los resultados tabulados en la **Tabla 6** y **Figura 5**, se puede observar que la concentración en la que se obtuvo mejor porcentaje de remoción fue para 2.5 ppm de cadmio, con un porcentaje de remoción de **84.7 %**, para la concentración de 3 ppm disminuyó el porcentaje de remoción, lo cual indica que para esta concentración la cantidad de material sorbente agregado debe ser mayor a 0.05 gr.

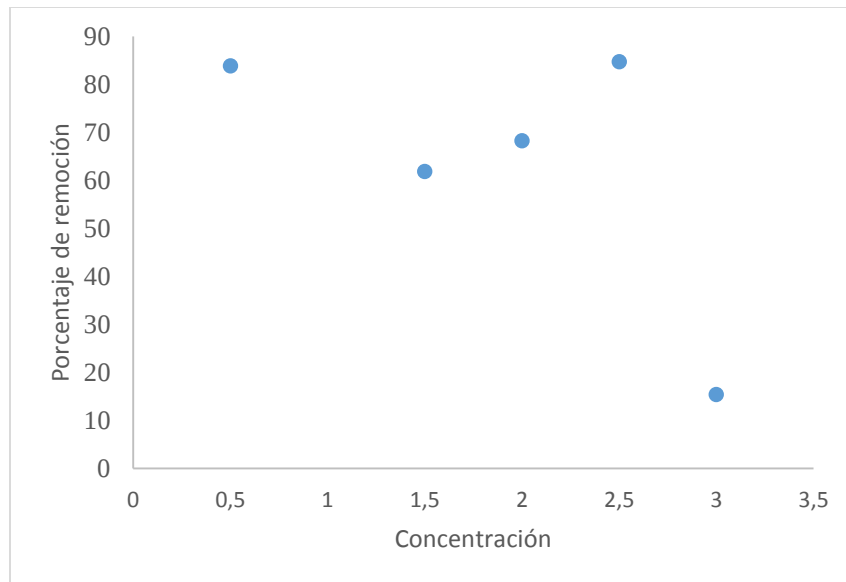


Figura 5: Resultados de sorción a diferentes concentraciones de cadmio (II)

Igualmente se realizaron dos ensayos, con cada uno de los componentes de los cerámicos por aparte para revisar su potencial de sorción, reportados en la **Tabla 6**, según los resultados obtenidos cada uno presenta un porcentaje de sorción por debajo de material cerámico, elaborado con ambos componentes en diferentes proporciones y utilizado en estas pruebas, estos son: Arcilla sinterizada 43% y lodo sinterizado 72%, para una muestra de cadmio de concentración de 2 ppm. Sin embargo, podemos observar que el lodo sinterizado, presenta un gran potencial de sorción respecto a la arcilla.

5.1.1.4 Resultados Prueba 4.

Tabla 7.

Capacidad de sorción a variando la cantidad de material cerámico adsorbente

g de material sorbente L1	Porcentaje de remoción
0,01	97,5
0,03	98.0
0,05	100,0
0,1	99,1
0,2	99,7

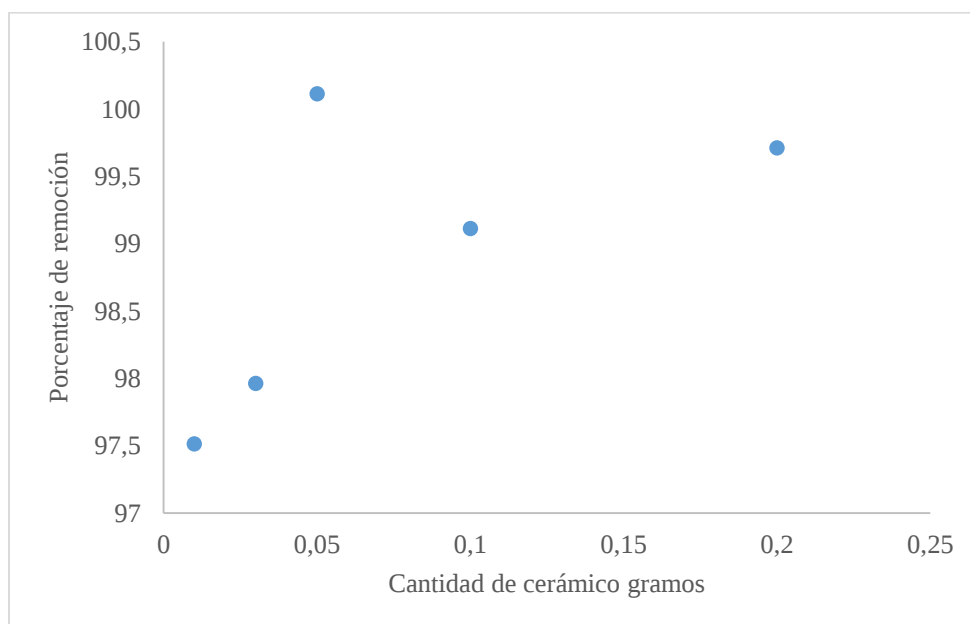


Figura 6: Resultados a diferentes cantidades del material cerámico

Según los resultados obtenidos en este ensayo, reportados en la **Figura 6** y **Tabla 7**, se puede observar que el mejor porcentaje de sorción, para una muestra de cadmio de concentración de 2

ppm, se obtuvo con una cantidad de 0.05 gr de material cerámico L1. Fue de **100 %**, para 0.05 gr, igualmente para 0.2 gr se obtuvo un alto porcentaje de sorción del **99.7%**.

5.2 Resultados pruebas con cromo

Curva de calibración del cromo

Se preparó una curva de calibración de cromo partiendo de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 hasta 3 ppm

Tabla 8.

Curva calibración del cromo

Concentración	Absorbancia
0,0	0
0,5	0,002
1,0	0,004
1,5	0,006
2,0	0,009
2,5	0,011
3,0	0,013

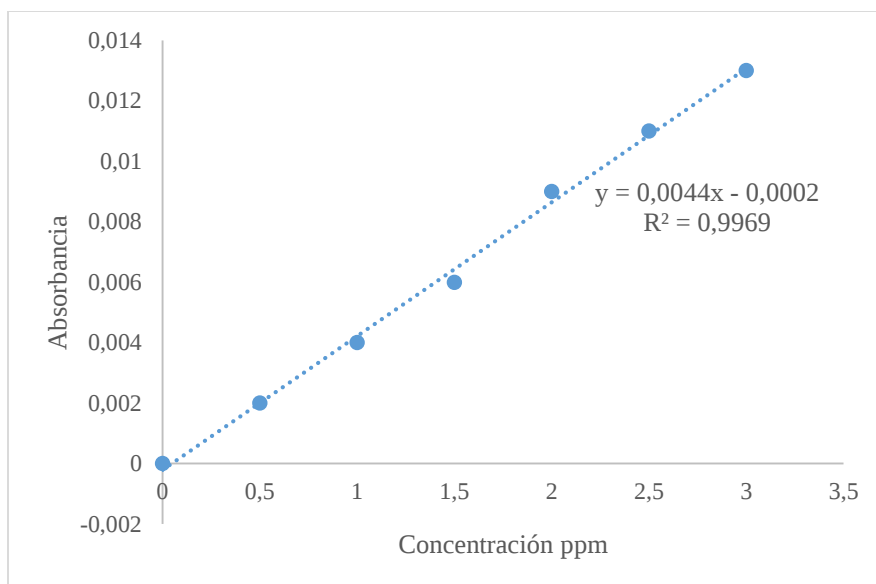


Figura 7. Curva de calibración del cromo

La ecuación de la curva fue

$$y = 0.0044x - 0.0002 \quad (5)$$

Para calcular la concentración se utilizó la ecuación de la curva de calibración, la cual fue:

$$C = \frac{(A - 0.0002)}{0.0044} \quad (6)$$

Para calcular la concentración absorbida se utilizó la fórmula 3 y para calcular el porcentaje de remoción se utilizó la fórmula 4.

5.2.1 Resultados prueba No.1 Cromo. Resultados ensayos de sorción con los cerámicos L1 y L4, a diferentes tiempos de sorción a una concentración de 2 ppm de cromo.

Tabla 9.

Ensayos de remoción de cromo con el cerámico L1

Tiempo horas	Porcentaje de remoción
6	98,0
9	98,0
12	98,0
15	98,0
18	98,0
21	98,0
24	98,0

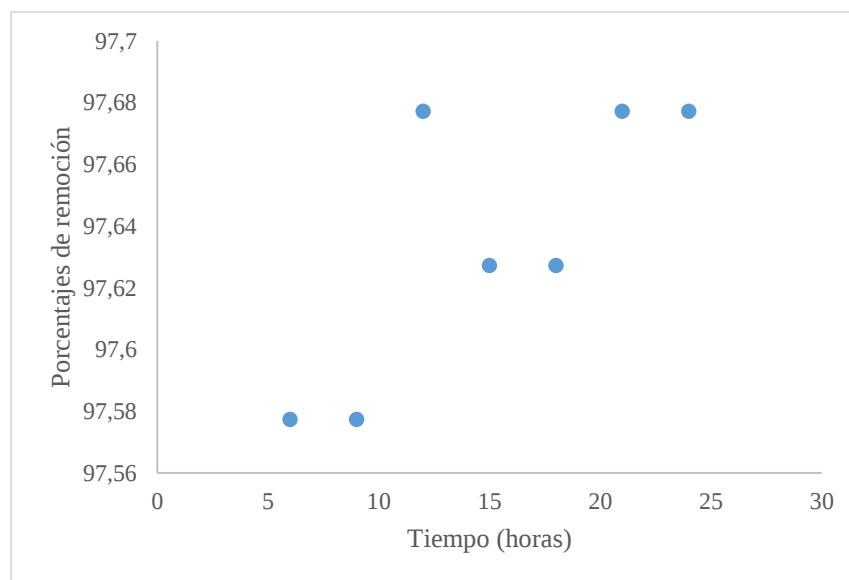
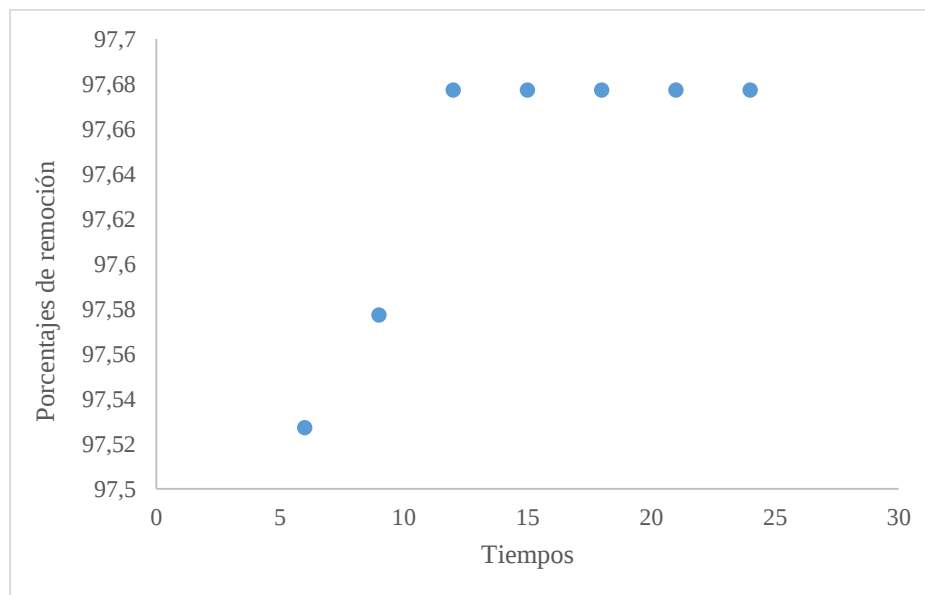
*Figura 8: Resultados ensayos de remoción de cromo a diferentes tiempos con el cerámico L1*

Tabla 10.

Ensayos de remoción de cromo con el cerámico L4

Tiempo horas	Porcentaje de remoción
6	98,0
9	98,0
12	98,0
15	98,0
18	98,0
21	98,0
24	98,0

*Figura 9. Resultados ensayos a diferentes tiempos cerámico L4*

Según los resultados reprotados en las **Figura 8**, **Figura 9** y **Tabla 9**,

Tabla 10. Se obtuvieron para ambos materiales L1 y L4, altos porcentajes de remoción para cromo total. Sin embargo se escogio el material L4, para los ensayos de sorción del cromo, por su estabilidad durante los ensayos de sorción, después entrar en contacto con la solución, desde las 15 horas en adelante permaneció estable el porcentaje de remoción, con un 97 % hasta las 24 h. Mientras que el cerámico L1, presento variaciones en el tiempo con respecto al porcentaje de remoción.

5.2.2 Resultados ensayos de cromo a diferentes concentraciones con el cerámico L4. Se escogio el cerámico L4, como material óptimo para realizar los ensayos de sorción del cromo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la

Tabla 10 y Figura 9 del ensayo anterior.

Tabla 11.

Resultados ensayos de remoción a diferentes concentraciones de cromo con el cerámico L4

Concentración inicial	Porcentaje de remoción
0,5	96.0
1,0	87.0
1,5	99.0
2,0	93,3
2,5	95.0
3,0	96.0

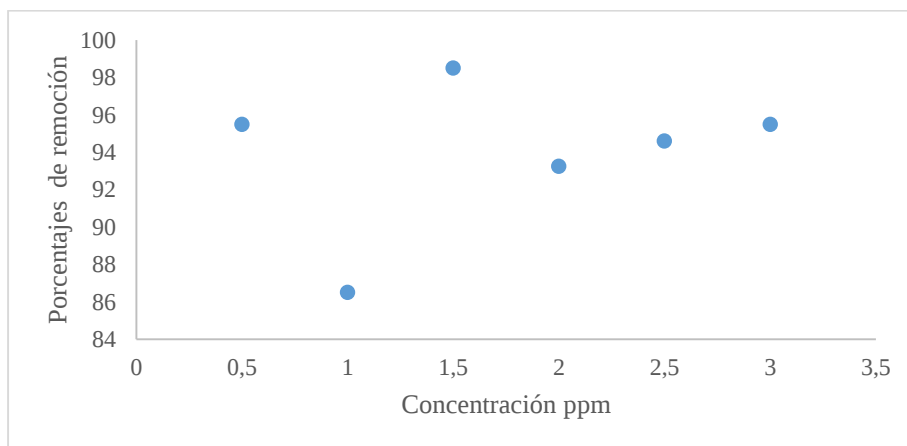


Figura 10. Resultados de los ensayos de remoción a diferentes concentraciones de cromo con el cerámico L4

Según los resultados reportados en la **Tabla 11** y la **Figura 10**. Resultados de los ensayos de remoción a diferentes concentraciones de cromo con el cerámico L4, se observa que a medida que aumenta la concentración aumenta el porcentaje de absorción del cromo total con el material cerámico L4. Si embargo el mejor porcentaje de remoción se obtuvo a una concentración de 1.5 ppm de cromo total con un porcentaje de sorción del 99%.

5.3 Resultados muestras RESPEL.

Para estos ensayos se ajustó el pH de la muestra problema de 1 a pH 4.5-5 en ambas soluciones, con solución 5 M de NaOH

Tabla 12.

Pruebas de sorción del cromo en muestras respel con el cerámico L4, para la muestra problema denominada M2

Concetración inicial	Concentración absorbida	Porcentaje de remoción
4.0*	3,9	98,2

Se calculó la concentración inicial en la muestra M2, utilizando la absorbancia de la muestra original M2* y los calculos de los valores de la concentración absorbida y porcentaje de remoción, fueron los resultados obtenidos por la muestra tratada con el material cerámico L4 a pH: 4-5, la cual fue de nuevo acidificada para su lectura por A.A. y DRX. Según resultados obtenidos en la **Tabla 12**, el potencial de remoción para la muestra M2 para cromo total, tratada con el ceramico L4, fue del 98.2 % .

5.3.1 Resultados pruebas de sorción en muestras RESPEL con el cerámico L1, para la muestra problema denominada M1para determinación de cadmio (II).

Tabla 13.

Ensayos de la muestra problema M1, con diferentes cantidades de cerámico L1

Cantidad de cerámico L1(g)	Porcentaje de remoción
0,01	94,0
0,03	99,0
0,05	99,2
0,10	99,0
0,20	98,1

Según los resultados mostrados en la **Tabla 13**, se pudo observar que para la cantidad de 0.05 g de material cerámico L1, se obtuvo el mejor porcentaje de remoción para cadmio(II) en la solución problema M1. Este valor fue: 99.6%, lo cual confirma que 0.05 gr es la cantidad optima a usar para estos ensayos de remoción de Cadmio (II)

Tabla 14:

Ensayo muestra M1 con lodo y arcilla

Cantidad material 0.05 gramos	Porcentaje de remoción
Lodo	97,4
Arcilla	98,0

Igualmente se realizaron ensayos con arcilla sinterizada y el lodo sinterizado ver resultados **Tabla 14**, los cuales hacen parte del material cerámico utilizado, después de las pruebas se pudieron observar porcentajes altos de remoción para este metal los cuales fueron del 97% y 98% , respectivamente.

5.3.2 Prueba mezcla de cationes. Se evaluó el comportamiento de sorción de los materiales, L1 y L4, en muestras conocidas mezclando igual proporción 1:1, solución de 2 ppm de cadmio y 2 ppm de cromo, las muestras se ajustaron a un pH 6.5. Se tomaron 25 ml de esta solución y se colocaron en contacto con 0.05 gramos de material absorbente de L1 y L4, respectivamente. Se realizaron dos pruebas utilizando una con agitación a 200 rpm y otra sin agitación para cada material cerámico L1 y L4.

Tabla 15.

Resultados pruebas de sorción en muestra MCd, con el cerámico L1 y L4

Muestra cadmio	Porcentaje de remoción
MCd L1	99,1
MCd L4	98,3
MCd L1*	99,1
MCd L4 *	100,0

MCd* sin agitación

Tabla 16:

Resultados pruebas de sorción en muestra MCr, con el cerámico L1 y L4

Muestra de cromo	Porcentaje de remoción
Mcr L1	99,0
Mcr L4	99.0
Mcr L1 *	99.0
Mcr L4 *	99.0

Mcr* Sin agitación

Tabla 17.

Concentración de cada metal en la mezcla según curva de calibración.

Concentración de cadmio	0,12 ppm
mezcla	
Concentración de cromo	0,47 ppm

Según los resultados obtenidos para este último ensayo reportados en las **Tabla 15**,

Tabla 16, y **Tabla 17**, podemos analizar que ensayos de remoción hechos con pH 6.5 cercanos a 7, son igual de eficientes en sus porcentajes de remoción que a pH con valores de 4-5, valor utilizado en los ensayos de remoción de este estudio. El objetivo de utilizar valores cercanos a 7 en las aguas a tratar, es de eliminar el impacto al medio ambiente por el vertimiento de residuos a pH ácidos. Igualmente se pudo comprobar que la agitación es un parámetro que **no** afecta el porcentaje de remoción para estos cationes.

6. Conclusiones

- El uso de materiales cerámicos, compuestos por lodos arcillosos, permitió la remoción de cationes metálicos, en este caso cromo total y cadmio (II), con resultados por encima del 98% en soluciones de concentración conocida, preparadas en laboratorio.
- El uso de materiales cerámicos para la remoción de cationes metálicos en aguas de desecho, provenientes de análisis de A. A. del laboratorio de permitió adsorción de 98 % para cromo total y de 99% para cadmio.
- Durante los ensayos de sorción de cadmio (II) y cromo total, se pudo comprobar que a valores de pH por encima de 6, mejoraba el potencial de sorción de los cationes en solución. Específicamente, e pueden trabajar soluciones de pH 6.5, lo cual permitiría mitigar el impacto de los vertimientos.
- Se puede concluir que una baja cantidad de material cerámico 0.05 gramos, con un volumen de solución problema de 25 ml, tiempos mayores a 18 horas se mejora el potencial de sorción del cadmio (II) y el cromo total en solución, logrando porcentajes de remoción por encima del 98 %.
- Igualmente según resultados obtenidos en el último ensayo, la agitación no es una variable importante pues no afecta los porcentajes de remoción.
- La utilización de un material cerámico, elaborado con una mezcla de lodo arcilloso (proveniente de una planta de agua potable), arcilla roja y bentonita, se pudo demostrar que es altamente eficiente, para la remoción de metales tóxicos. Su implementación puede ser un

gran aporte para el medio ambiente, logrando la descontaminación de residuos tóxicos con metales pesados, provenientes de los laboratorios de la universidad industrial de santander.

- Según los resultados de DRX podemos concluir que los difractogramas de los cerámicos L1 Anexo A:Difractograma de la muestra L1,Anexo B: Fases mineralógicas de la muestra L1 y el difractograma de la mezcla L4, Anexo G:Difractograma de la muestra L4,Anexo H: Fases mineralógicas de la muestra L4, que en ambos materiales se muestran las fases cristalinas provenientes directamente de la mezcla de bentonita, arcilla y del lodo que se utilizo. Igualmente como se puede observar en Anexo C: Difractograma de la muestra L1 impregnada de Cd, Anexo D: Fases mineralogicas de la muestra L1 impregnada de Cd, Anexo G:Difractograma de la muestra L4,Anexo I:Difractograma de la muestra L4 impregnada con Cr y Anexo J: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con Cr , no se observa un corrimiento de los picos, ni se observa la aparición de nuevas fases cristalinas, lo cual indica que mantiene la estructura cristalina y posiblemente el atomo de cadmio o el atomo de cromo, estan adsorbidos, sobre la superficie del material cerámico o interlaminarmente, más no dentro de la estructura cristalina del material. Mientras que para los ceramicos impregnados con la muestra problema Anexo E: Difractograma de la muestra L1 impregnada de muestra problema,Anexo F: Fases mineralogicas de la muestra L1 impregnada de muestra problema.Anexo K:Difractograma de la muestra L4 impregnada con muestra problema,Anexo L: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con muestra problema, se observa la aparición de una nueva fase cristalina correspondiente al nitrito, lo cual indica la formación de esta sal, producto posiblemente de la adición del acido nitrico en la muestra problema, durante su tratamiento en el laboratorio para analisis de metales por A:A. En este difractograma no se alcanzan a observar las fases cristalinas

provenientes del lodo, de la bentonita y de la arcillas. Siembargo mediante su analisis mineraologico se observó la paricion de estos picos, .pero con una intesidad muy minima con respecto a la sal proveniente del acido nitrico.

7. Recomendaciones

Como caracterización complementaria se recomienda realizar un estudio de fluorescencia de rayos X, con el cual se podría llegar a confirmar la presencia de metales en los sistemas cerámicos.

Referencias Bibliográficas

- Acosta De armas, M. Ma., & Montilla Peña, J. X. (2011). *Evaluación de la contaminación por cadmio y plomo en agua, suelo, y sedimento y analisis de impactos ambientales en la subcuenca del rio balsillas afluente del rio bogotá. maria margarita acosta de armas joanna Ximena Montilla Peña Proyecto de grado para* (universidad de la Salle, Bogotá, Colombia). Retrieved from http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/14892/T41.11_A72e.pdf
- Acosta Rodriguez, I., González Sanchez, H. M., Moctezuma Zárate, M. de G., Cárdenas González, J. F., & Martinez Juárez, V. M. (2012). Remoción de Cromo (VI) en solución por la cáscara de naranja (*Citrus sinensis* Osbeck). *Tlatemoani, Revista de Academica de Investigación*, 9(9).
- Albis Arrieta, A. R., Ortiz Toro, J. D., & Martínez De la Rosa, J. E. (2017). Remoción de cromo hexavalente de soluciones acuosas usando cáscara de yuca (*Manihot esculenta*): Experimentos en columna. *Inge Cuc*, 13(1), 42–52. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.13.1.2017.04>
- Ambiente, M. del M. (n.d.). Recurso Hídrico. Retrieved from <http://www.minambiente.gov.co/index.php/gestion-integral-del-recurso-hidrico/administracion-del-recurso-hidrico>
- Arriagada Hernan; Garcia Rafael; Cid Ruby. (2010). *Retención de Cromo y Mercurio con Zeolitas naturales y sintéticas*.
- Arroyave Q., C., Araque M., P., & Pelaez J., C. A. (2010). Evaluación de la bioacumulación y toxicidad de cadmio y mercurio en pasto llanero (*Brachiaria dictyoneura*). *Vitae*, 17(1), 45–49.
- Baròn, G. C., Montano, A. M., & Gonzàlez, C. P. (2018). *Síntesis y Caracterización de MAteriales Ceràmicos a partir de Lodos Residuales del Tratamiento de Agua Potable*. Indsutrial de Santander.

- Basso, M. C., E.G. Cerella, & A.L. Cukierman. (n.d.). *Remoción de Cadmio (II) de soluciones acuosas mediante carbón activado preparado a partir de caña*. Buenos Aires.
- Benavides, A. C. M. adrymera@hotmail.co., Vivas, B. A., & Sarria, M. F. O. (2007). Alternativa para la segregación de residuos químicos generados en el Labora...: EBSCOhost. [https://doi.org/*UNIVERSITIES & colleges *OPERATIONS research *ENGINEERING laboratories *CHEMICAL laboratories *PUBLIC health research *BIBLIOGRAPHICAL services *RECYCLING \(Waste, etc.\)](https://doi.org/*UNIVERSITIES & colleges *OPERATIONS research *ENGINEERING laboratories *CHEMICAL laboratories *PUBLIC health research *BIBLIOGRAPHICAL services *RECYCLING (Waste, etc.))
- Bermejo Campos, D. F. (2016). *Remoción De Plomo Y Cadmio Presente En Aguas Residuales Mineras Mediante Biosorción En Columnas Con Bagazo De Caña Y Cáscara De Cacao*. 110. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25710/1/Tesis.pdf>
- Bravo, N. P., & Ri Risio, C. D. (2004). *Utilización de adsorbentes para la eliminación de contaminantes en aguas y efluentes líquidos*. Universidad de Belgrano.
- Calderón, J. (2012). *Pruebas minerales cabello*. 7,8. Retrieved from <https://www.laboratoriocalderon.com/wp-content/uploads/2016/01/EJEMPLO-INFORME-MINERALES-CABELLO.pdf>
- Carbonel Ramos, D. (2018). Adsorción de Cadmio, Cobre y Plomo en Bentonita, Caolín y Zeolita Naturales y Modificadas: Una Revisión de los Parámetros de Operación, Isotermas y Cinética. *Ingeniería*, 23(3), 252–273. <https://doi.org/10.14483/23448393.13418>
- Carriazo, J., Barrera, M., & Saavedra, M. (2005). Empleo de dos arcillas naturales Colombianas en la eliminación de iones metálicos en solución acuosa. *Scientia et Technica*, XI, 6.
- Chauhan, G., & Chauhan, P. U. K. (2014). Risk Assessment of Heavy Metal Toxicity Through Contaminated Vegetables From Waste. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, (02), 444–460.
- Cuberos, E., Rodriguez, A. I., & Prieto, E. (2009). Chromium levels and their relationship with alterations in the health of tannery workers living and working in Bogotá, Colombia. *Revista de Salud Publica*, 11(2), 278–289. <https://doi.org/10.1590/S0124-00642009000200012>

- Daniel, E., Toriz, R., Jesús, F. De, Córdova, C., Química, I., & Químicas, F. D. C. (2006). *Remoción de metales pesados con carbón activado como soporte de biomasa*. IX(31), 59–64.
- Echavarria, A., Moreno, M., Ramírez, C., Tamayo, C., & Saldarriaga, C. (1998). Uso de bentonita en aguas residuales de curtiembres para la remoción de cr(iii). *Revista Colombiana de Química*; Vol. 27, Núm. 1 (1998); 83-88 0120-2804, (1), 83–88. Retrieved from <http://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/16996>
- Eggs, N., Salvarezza, S., Azario, R., Fernández, N., & del García, M. C. (2012). Adsorción De Cromo Hexavalente En La Cáscara De Arroz Modificada Químicamente. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 3(3), 141–151. Retrieved from http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/141
- Gaitan, M. E., & Rodriguez, C. H. (2004). Determinación de metales pesados totales con digestión ácida y solubles lectura directa por espectrofotometría de absorción atómica. In *IDEAM, Subdirección de hidrología, grupo de fisicoquímica ambiental*.
- Gelvez, G. A., Laverde, D. A., & Ecalante, H. (2008). Remoción de metales pesados de drenajes ácidos de minas de carbón usando bacterias sulfato reductoras. *Revista ION*, 21, núm. 1(0120-100X), 71–78. <https://doi.org/0120-100>
- González Galeano, S., & Mejía C, L. (2000). *Contaminación con cadmio y arsénico en suelos y hortalizas de un sector de la cuenca del río Bogotá* (Vol. 25). Retrieved from <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=CO1999000870>
- Guerra Moya, E. J. (n.d.). *El medio ambiente y el ser Humano*. Retrieved from <https://www.monografias.com/trabajos82/medio-ambiente-y-ser-humano/medio-ambiente-y-ser-humano.shtml>
- IDEAM. (2017). *Desechos peligrosos en colombia 2016*.
- Javadian, H., Ghorbani, F., Tayebi, H. allah, & Asl, S. M. H. (2015). Study of the adsorption of Cd (II) from aqueous solution using zeolite-based geopolymer, synthesized from coal fly ash; kinetic, isotherm and thermodynamic studies. *Arabian Journal of Chemistry*, 8(6), 837–849. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.02.018>

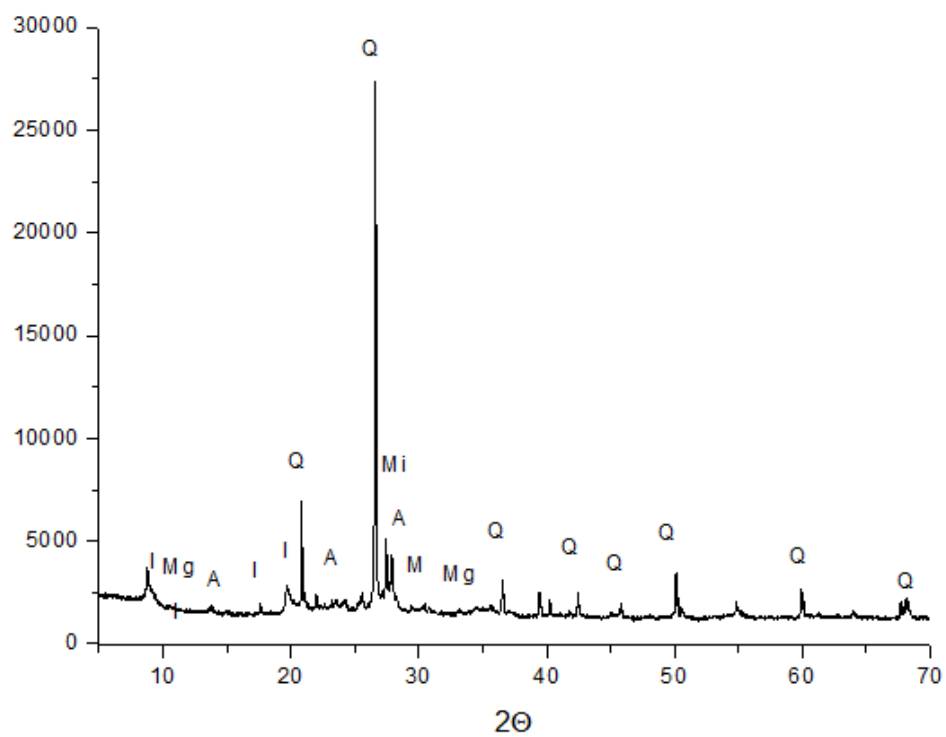
- Juan D. Mahecha-Pulido, Juan M. Trujillo-González, & Marco A. Torres-Mora. (2015). Contenido de metales pesados en suelos agrícolas de la región del Ariari, Departamento del Meta. *Orinoquia-Universidad de Los Llanos-Villavicencio Meta.Colombia*, 19(1), 118–122. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092015000100011
- Lajos, Y., Omar, J., Garcia, P., Rodríguez, J. M., & Curvelo Sanchez, E. (2009). *Título: Caracterización física y química del sorbente ceniza de bagazo de caña y su utilización en la eliminación de iones Cromo (III)*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas.
- Linares, G., Velázquez, C., & Vargas, N. (2017). instructivo para lavado de material de plástico y vidrio. In *IDEAM* (Vol. 13). Colomiba.
- Loayza Pérez Jorge E. (2007). GESTIÓN INTEGRAL DE RESIDUOS QUÍMICOS PELIGROSOS. *Revista Sociedad de Quimica*, 4, 259–260.
- Mestanza M, Rodriguez A, G. J. (2012). *Estudio de materiales Adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorantes* (Complutense Madrid). Retrieved from <https://eprints.ucm.es/15692/1/T33799.pdf>
- Ministerio de Ambiente, V. y desarrollo T. *Decreto 4741 de 2005*. , 2005 § (2005).
- Morales, G., Díaz Baéz, C., Pica Granados, Y., Forget, G., & Feola, G. (2004). ENSAYOS TOXICOLOGICOS Y METODOS DE EVALUACION DE CALIDAD DE AGUAS. In G. Castillo (Ed.), *ENSAYO* (Vol. 2, pp. 13–198). Argentina.
- Of, R., Through, C., Adsorbents, C., In, P., & Bed, F. (n.d.). *Remoción de cadmio mediante adsorbentes cerámicos empacados en columnas de lecho fijo*.
- ONU-DAES 2005-2015. (n.d.). <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/>.
- Orozco, D. S. (2016). *Analisis fisicoquímico de muestras ambientales, materias primas y alimentos e identificación de metales por espectroscopia de absorción atómica*. Cartagena.

- Pollutions, C. E. (2017). La contaminación del agua. Retrieved from <https://www.environmentalpollutioncenters.org/water/>
- Puga, S., Sosa, M., Lebgue, T., & Quintana, C. (2006). Contaminación por metales pesados en suelo provocada por la industria minera. *Ecología Aplicada*, 5(1995).
- Red de Desarrollo Sostenible. (2002). Difundido en Internet por la RED DE DESARROLLO SOSTENIBLE. In *Gestión Ambiental*. Retrieved from <https://www.rds.org.co/es/recursos/gestion-ambiental>
- Reyes, Y., Vegara, I., Torres, O., Diaz, M., & Gozanlez, E. (2016). Resolutions Adopted at the General Session of the VIII All India Pediatric Conference at Vellore on the 21st December, 1956. *The Indian Journal of Pediatrics*, 24(1), 14. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>
- Roca Gracià, A. A. (2019). *Estudio comparativo del poder biosorbente de la càscara de naranja y hojas de Neem para la remociòn de colorantes en soluciones acuosas*. Universidad De Guayaquil.
- Rodríguez-Fuentes, G., & Rodríguez, I. (2002). *Eliminacion de metales toxicos mediante zeolitas naturales* (Vol. 3).
- Santos C, J. M., Uribe, J. G., Carreño S, A., & Bonilla M, M. (2012). *Diganostico Nacional de Salud Ambiental, República de Colombia Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible*. Colombia.
- Santos, J., Murillo, G., Botero, C., Franco, O., & Rodriguez, R. (2016). Informe nacional: Generación y manejo de residuos o desechos peligrosos Colombia 2014-2015. IDEAM. In Ministerio del Medio Ambiente (Ed.), *Informe Anual*. Retrieved from <http://www.andi.com.co/Ambiental/Documents/Informe Nacional de Residuos Peligrosos 2014 2015.pdf>
- Shakoor, M. B., Niazi, N. K., Bibi, I., Shahid, M., Saqib, Z. A., Nawaz, M. F., ... Rinklebe, J. (2019). Exploring the arsenic removal potential of various biosorbents from water. *Environment International*, 123, 567–579. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.12.049>

- Singh, A., Sharma, R. K., Agrawal, M., & Marshall, F. M. (2010). Risk assessment of heavy metal toxicity. *Tropical Ecology*, 51, 375–387. Retrieved from [http://www.environmentportal.in/files/Risk assessment of heavy metal toxicity.pdf](http://www.environmentportal.in/files/Risk%20assessment%20of%20heavy%20metal%20toxicity.pdf)
- Uddin, M. K. (2017). A review on the adsorption of heavy metals by clay minerals , with special focus on the past decade. *Chemical Engineering Journal*, 308, 438–462. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.09.029>
- Ujueta, F., Arenas, I. A., Diaz, D., Yates, T., Beasley, R., Navas-Acien, A., & Lamas, G. A. (2018). Cadmium level and severity of peripheral artery disease in patients with coronary artery disease. *European Journal of Preventive Cardiology*, 2–4. <https://doi.org/10.1177/2047487318796585>
- Vieira, M. G. A., Neto, A. F. A., Gimenes, M. L., & da Silva, M. G. C. (2010). Sorption kinetics and equilibrium for the removal of nickel ions from aqueous phase on calcined Bofe bentonite clay. *Journal of Hazardous Materials*, 177(1–3), 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.12.040>
- Wang, S., Li, L., & Zhu, Z. H. (2007). Solid-state conversion of fly ash to effective adsorbents for Cu removal from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 139(2), 254–259. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.06.018>
- WWF. (2019). Que es la contaminación del agua. Retrieved from https://wwf.panda.org/knowledge_hub/teacher_resources/webfieldtrips/water_pollution/

Apéndices

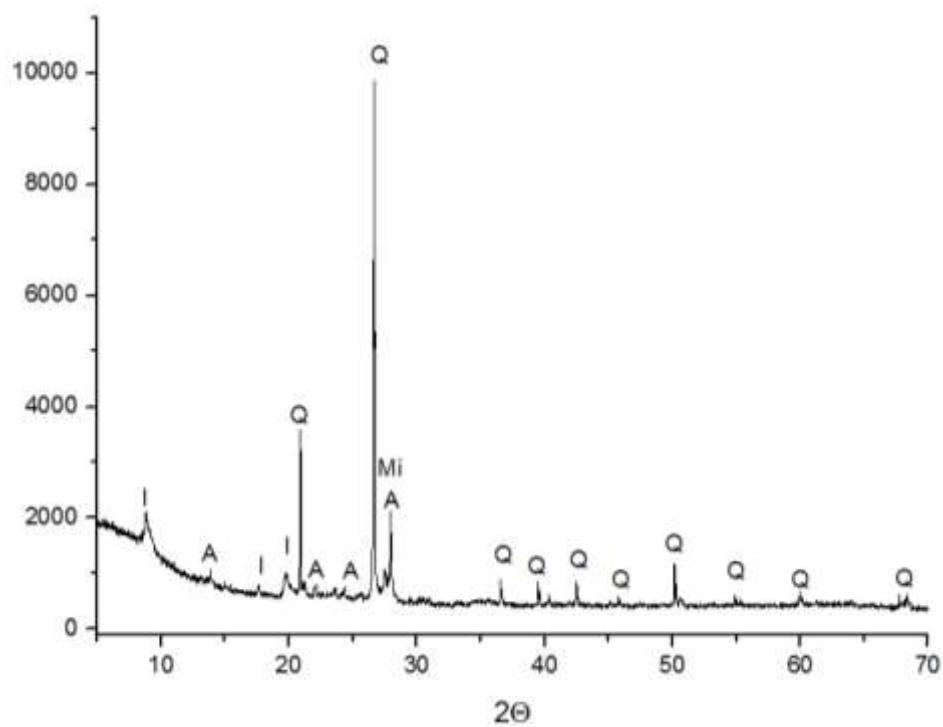
Apéndice A. Difractograma de la muestra L1



Apéndice B: Fases mineralógicas de la muestra L1

PDF	Nombre	Representación
46-10 45	Cuarzo	Q
36-03 64	Hematita	H
83-14 66	Albite	A
31-09 68	Ilita	I
03-00 39	Magnesiohornblenda	Mg
71-10 60	Magnesiohornblenda	Mg
19-09 26	Microclina	Mi

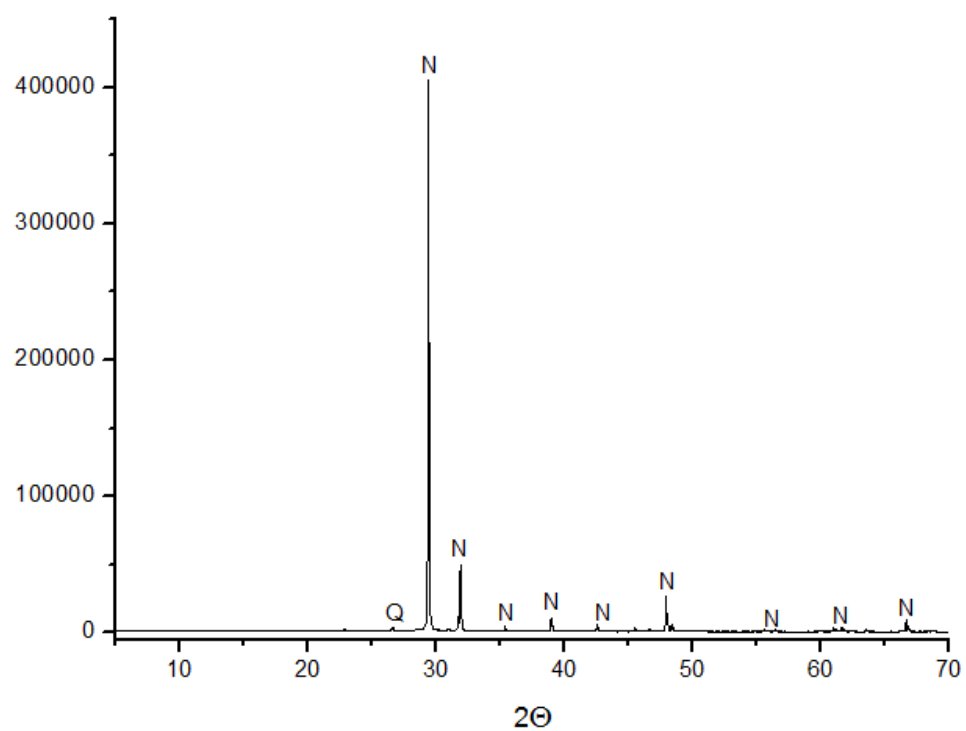
Apéndice C: Difractograma de la muestra L1 impregnada de Cd



Apéndice D: Fases mineralógicas de la muestra L1 impregnada de Cd

PDF	Nombre	Representación
46-10 45	Cuarzo	Q
83-14 66	Albita	A
31-09 68	Ilita	I
19-09 26	Microclina	Mi

Apéndice E: Difractograma de la muestra L1 impregnada de muestra problema

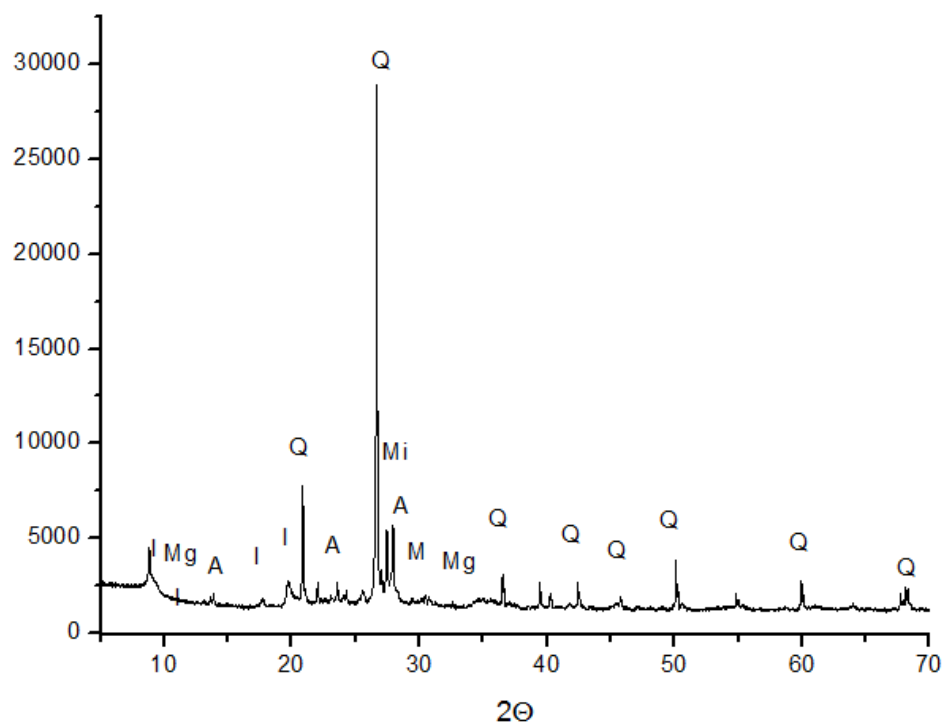


Apéndice F: Fases mineralógicas de la muestra L1 impregnada de muestra problema.

PDF	Nombre	Representación
46-10 45	Cuarzo	Q
36-14 74	Nitratina	N
83-14 66	Albita*	
31-09 68	Ilita*	
07-02 11	Clorato de potasio*	
70-25 09	Halite*	
39-01 65	Fosfato de cadmio*	

* Las fases mineralógicas anteriormente descritas no se alcanzan a observar al momento de graficar, sin embargo al realizar la búsqueda de superposición de fases indexadas se pueden encontrar estas fases.

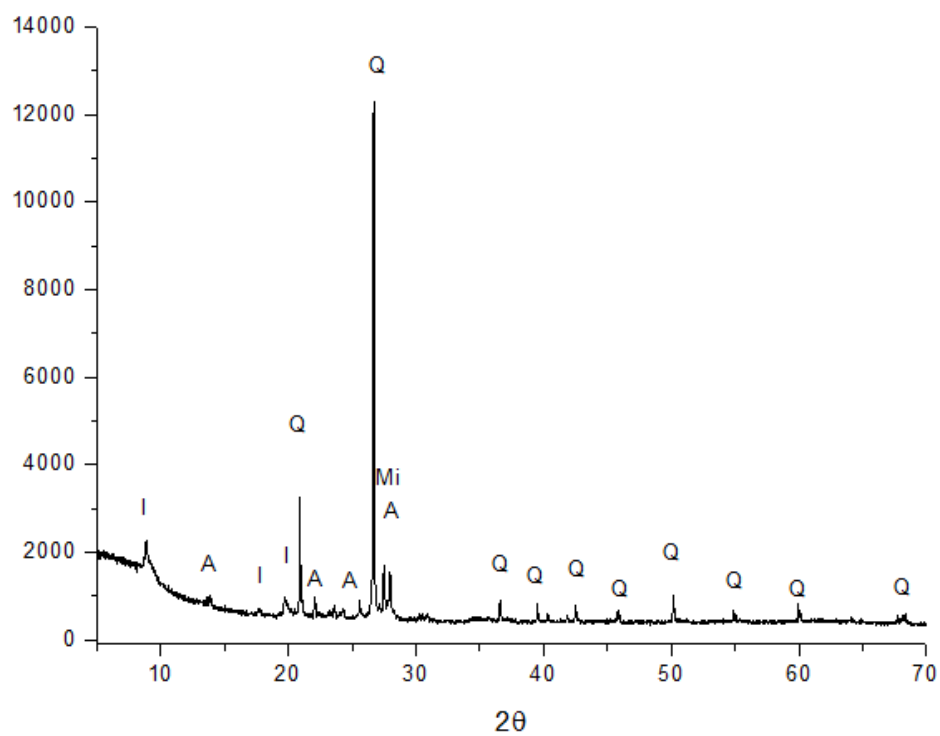
Apéndice G: Difractograma de la muestra L4



Apéndice H: Fases mineralógicas de la muestra L4

PDF	Nombre	Representación
46-10 45	Cuarzo	Q
83-14 66	Albita	A
31-09 68	Ilita	I
03-00 39	Magnesiohornblenda	Mg
71-10 60	Magnesiohornblenda	Mg
19-09 26	Microclina	Mi

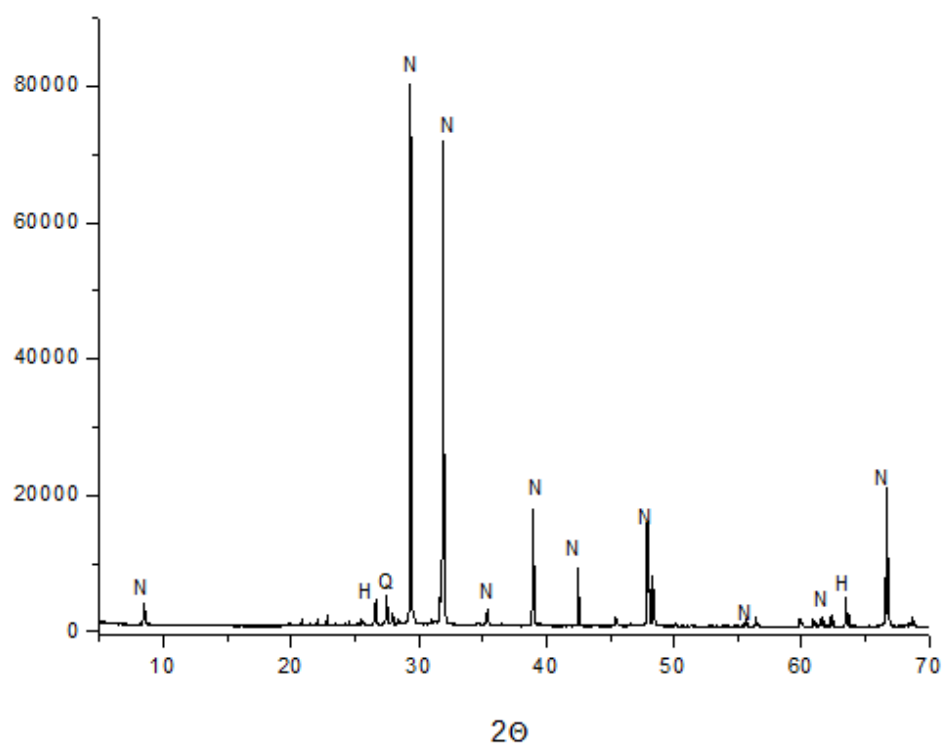
Apéndice I. Difractograma de la muestra L4 impregnada con Cr



Apéndice J: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con Cr

PDF	Nombre	Representación
46-10 45	Cuarzo	Q
83-14 66	Albite	A
31-09 68	Ilita	I
19-09 26	Microclina	Mi

Apéndice K: Difractograma de la muestra L4 impregnada con muestra problema



Apéndice L: Fases mineralógicas de la muestra L4 impregnada con muestra problema

PDF	Nombre	Representación
46-10 45	Cuarzo	Q
36-14 74	Nitratina	N
36-03 64	Hematite	H
31-09 68	Ilita*	
83-14 66	Albite*	

* Las fases mineralógicas anteriormente descritas no se alcanzan a observar al momento de graficar, sin embargo al realizar la búsqueda de superposición de fases indexadas se pueden encontrar estas fases.