

**PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE CROMO EN
LODOS GALVÁNICOS DE INGENCROM LTDA. A NIVEL LABORATORIO**

JEIMY ALEJANDRA PÉREZ RINCÓN

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018**

**PROPUESTA PARA LA RECUPERACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE CROMO EN
LODOS GALVÁNICOS DE INGECROM LTDA. A NIVEL LABORATORIO**

JEIMY ALEJANDRA PÉREZ RINCÓN

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERA QUÍMICA**

Director:

**Arnoldo Muñoz Bello
Químico Industrial**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C.
2018**

Nota de aceptación

IQ. Oscar Lombana
Presidente del jurado

IQ. Nubia Liliana Becerra
Jurado

IQ. Edgar Fernando Moreno
Jurado

Bogotá D.C., febrero de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

DR. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

DR. LUIS JAIME POSADA GARCÍA – PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

ING. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Secretario General

DR. JUAN CARLOS POSADA GARCÍA – PEÑA

Decano Facultad de Ingeniería

ING. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería Química

ING. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

Dedico este trabajo que representa la culminación de un gran paso en mi vida a Dios y a mi maravillosa familia, mis padres y hermana por la confianza y el amor brindado, son el motor de mi vida. Los amo mucho.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por permitirme culminar una etapa más, por sus infinitas bendiciones y su presencia en cada paso de mi vida.

Agradezco a mis padres Rosalba Rincón y Jorge Pérez quienes me acompañaron siempre en este proceso tan importante para mi formación profesional y personal; infinitas gracias por su incondicional apoyo, por ser mi guía, por el amor, sabiduría y el gran esfuerzo para formarme como una mujer con valores y principios íntegros, por dedicarme su vida, y ser los promotores de mis sueños; a ellos todo mi amor y admiración; agradezco a mi hermana por alentarme en los momentos difíciles; a Mateo Muñoz por su compañía, amor, fortaleza y ser mi apoyo.

Mis sinceros agradecimientos a la empresa Ingecrom Ltda., especialmente al gerente general Arnoldo Muñoz y a la contadora Flor Alba Ramírez por abrirme las puertas de la empresa, brindarme la oportunidad y el apoyo para desarrollar mi proyecto de grado.

Especialmente agradezco a Arnoldo Muñoz Bello, Químico Industrial y Director de este Trabajo de grado, por compartir sus conocimientos, su orientación durante el proyecto y paciencia brindada; igualmente a su familia por el apoyo y acogimiento.

Al ingeniero Oscar Lombana, por su orientación y recomendaciones en el desarrollo de este trabajo de grado.

Al profesor Luis Gonzales por su tiempo y asesoría en la parte financiera del proyecto.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	18
INTRODUCCIÓN	19
OBJETIVOS	21
1. GENERALIDADES	22
1.1 INDUSTRIA GALVANICA	22
1.2 INGENIERIA LTDA.	22
1.3 CROMO DURO	23
1.4 MARCO LEGAL DEL PROCESO DE CROMO DURO	24
1.5 PROCESO DE CROMO DURO EN INGENIERIA LTDA.	25
1.5.1 Tratamiento de Alivio de Tensión	25
1.5.2 Alistamiento mecánico	25
1.5.3 Enganche	25
1.5.4 Limpieza	25
1.5.5 Electrodeposición	25
1.5.6 Deshidrogenación	26
1.5.7 Control final del proceso	26
1.6 DESPLAQUE	27
1.6.1 Inmersión en ácido clorhídrico (HCl) 4%	27
1.6.2 Electrólisis inversa en hidróxido de sodio (NaOH)	27
1.6.3 Electrólisis en solución de cromo con corriente inversa	28
1.7 RESIDUOS PELIGROSOS	28
1.7.1 Legislación ambiental aplicable	28
2. DIAGNÓSTICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE INGENIERIA LTDA.	30
2.1 AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO	30
2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES	31
2.2.1 Equipos involucrados	33

2.2.2	Proceso del tratamiento de aguas residuales	33
2.2.3	Balance de materia.	39
2.3	LODOS PROCEDENTES DE LA PTAR	40
2.3.1	Descripción de lodos	40
2.4	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL LODO	42
2.4.1	pH	42
2.4.2	% de humedad	42
3.	SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE RECUPERACIÓN DE CROMO PRESENTE EN LOS LODOS.	44
3.1	TRATAMIENTOS PARA RECUPERACIÓN DE METALES	44
3.1.1	Electrólisis	44
3.1.2	Oxidación química	45
3.2	MATRIZ DE SELECCIÓN PARA LA ALTERNATIVA DE RECUPERACIÓN	46
3.3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	51
3.3.1	Disolución de lodos	51
3.3.2	Oxidación de Cromo	53
3.4	DISEÑO DE EXPERIMENTOS	55
3.5	PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN	61
3.5.1	Resultados y análisis	62
4.	ELECTRÓLISIS DEL CROMO RECUPERADO	69
4.1	CARACTERÍSTICAS Y EMPLEO DE LA CELDA HULL	69
4.2	FORMACIÓN DEL DEPÓSITO POR VÍA ELECTROLÍTICA	71
4.3	DESARROLLO EXPERIMENTAL	71
4.3.1	Condiciones de la electrolisis	71
4.3.2.	Materiales y métodos	73
4.3.3	Resultados y análisis	74
5.	EVALUACIÓN FINANCIERA	78
5.1	INVERSIÓN TOTAL	78
5.1.1	inversión fija	78
5.1.2	Costos de operación	79

5.2 COSTOS DISPOSICIÓN DE LODO	81
5.3 EVALUACION DEL PROYECTO	82
5.3.1 valor presente (VP).	82
5.3.2 Costo anual uniforme equivalente.	84
6. CONCLUSIONES	86
7. RECOMENDACIONES	87
BIBLIOGRAFÍA	88
ANEXOS	91

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Ubicación de la empresa Ingecrom Ltda.	23
Figura 2. Diagrama del ciclo de proceso.	26
Figura 3. Diagrama de bloques del proceso.	32
Figura 4. Esquema tanque de tratamiento.	36
Figura 5. Esquema de la PTAR.	37
Figura 6. Esquema balance de materia.	39
Figura 7. Lodo vertido desde la tolva	41
Figura 8. Muestra de lodo almacenado	41
Figura 9. Fotografía disolución de una muestra de 4g de lodo	53
Figura 10. Oxidación de Cr^{+3}	55
Figura 11. Factores y niveles del diseño de experimento	56
Figura 12. Medidas marginales estimadas de respuesta	58
Figura 13. Normalidad	59
Figura 14. Prueba de independencia	60
Figura 15. Diagrama de flujo proceso de oxidación	62
Figura 16. Filtrado prueba 1	64
Figura 17. Filtrado prueba 2	65
Figura 18. Muestra de cromo oxidado	66
Figura 19. Recuperadores de cromo	67
Figura 20. Celda electrolítica	70
Figura 21. Celda Hull desde la superficie	70
Figura 22. Celda Hull con ánodo y cátodo	72
Figura 23. Electrólisis del cromo	74
Figura 24. Recubrimiento de cromo duro	75
Figura 25. Densidad de corriente del recubrimiento	76
Figura 26. Proyección de egresos a 5 años	83
Figura 27. Proyección a cinco años	84

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 1. Propiedades físicas del cromo depositado electrolíticamente	24
Tabla 2. Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y/o red de alcantarillado	31
Tabla 3. Equipos involucrados en la PTAR	33
Tabla 4. Dosis de sulfito de sodio para la reducción	34
Tabla 4. (Continuación)	35
Tabla 5. Informe de resultados de laboratorio.	38
Tabla 6. Cantidad de lodos producidos anualmente	42
Tabla 7. pH del lodo	42
Tabla 8. % de humedad del lodo	43
Tabla 9. Ponderado de criterios	46
Tabla 10. Evaluación variable eficiencia de recuperación	47
Tabla 11. Evaluación variable costos de operación	48
Tabla 12. Evaluación variable disponibilidad de equipos	48
Tabla 13. Evaluación variable facilidad de operación	49
Tabla 14. Evaluación variable tiempo de operación	49
Tabla 15. Matriz de selección de la mejor alternativa	50
Tabla 16. Medición de H ₂ SO ₄ .	52
Tabla 17. Diseño de experimentos para condiciones de oxidación	56
Tabla 18. Análisis de varianza	57
Tabla 19. Homogeneidad de varianza	60
Tabla 20. Volumen de (H₂O₂)	61
Tabla 21. Densidad de corriente	76
Tabla 22. Costo de equipos	79
Tabla 23. Costo total inversión fija (cifras en \$)	79
Tabla 24. Costos de materia prima	80
Tabla 25. Costos de energía eléctrica	80
Tabla 26. Costo total de operación	81
Tabla 27. Costo total del proyecto	81
Tabla 28. Costos y servicios (cifras en \$)	82
Tabla 29. Valores índice de precios al consumidor	82

LISTA DE REACCIONES

	pág.
Reacción 1. Inmersión en ácido clorhídrico	27
Reacción 2. Electrólisis inversa en NaOH.	28
Reacción 3. Reducción de cromo	45
Reacción 4. Descomposición del hidróxido de cromo.	51
Reacción 5. Formación de sulfato de cromo	52
Reacción 6. Descomposición de peróxido de hidrógeno	54
Reacción 7. Oxidación de Cr (III)	55
Reacción 8. Reducción de Cr ⁺⁶	71
Reacción 9. Formación de ácido crómico	73
Reacción 10. Deposición de cromo	74

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Balance general de materia.	39
Ecuación 2. Determinación de cromo trivalente	67
Ecuación 3. Valor presente (VP)	83
Ecuación 4. Costo anual uniforme equivalente	85

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Informe de resultados de laboratorio	92
Anexo B. certificación tratamiento de lodos galvánicos	93
Anexo C. Marcha de titulación cromo hexavalente	94
Anexo D. Cálculos de experimentación	95
Anexo E. Marcha titulación cromo hexavalente	102
Anexo F. Cotización equipos	103
Anexo G. Cotización de materia prima	105
Anexo H. Remisión Biolodos S.A. ESP	108

GLOSARIO

ANALITO: componente de la muestra que se desea analizar.

ÁNODO: electrodo positivo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones negativos.

BAÑO ELECTROLÍTICO: término impropio que significa electrolito.

CÁTODO: electrodo negativo de una célula electrolítica hacia el que se dirigen los iones positivos.

CORROSIÓN: es la gradual destrucción y desintegración de los materiales debido a un proceso electroquímico, químico o de erosión debido a la interacción del material con el medio que lo rodea.

CORRIENTE ANÓDICA: corriente que atraviesa todos los ánodos de una celda electrolítica.

CORRIENTE CATÓDICA: corriente que atraviesa todos los cátodos de una celda electrolítica.

CROMADO: término general que designa al proceso de formación de un revestimiento metálico de cromo sobre una superficie.

CROMO DURO: lamina o capa de cromo que se adhiere a una pieza metálica por medio de un tratamiento electrolítico.

DESENGRASE (METAL): limpiar una superficie metálica despejándola de las grasas que la recubren.

ELECTRODEPOSICIÓN: proceso que permite a una sustancia depositarse sobre un electrodo gracias a un fenómeno de electrólisis.

ELECTRODEPÓSITO: deposito catódico obtenido por el paso de la corriente eléctrica en una célula electrolítica.

ELECTRODO: sustancia conductora a través de la cual entra o sale la corriente eléctrica en una célula electrolítica, y a nivel de la cual los iones pierden su carga eléctrica.

ELECTRÓLISIS: operación que permite una modificación química y física por el paso de corriente eléctrica a través de un electrolito.

ELECTROLITO: solución que contiene por lo menos un cuerpo ionizado.

LODO: suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares.

MUESTRA PATRÓN: es una muestra de analito de concentración conocida.

RESIDUO: es cualquier objeto, material, sustancia, elemento o producto cuyo generador descarta, rechaza o entrega porque sus propiedades no permiten usarlo nuevamente en la actividad que lo generó o porque la legislación o la normatividad vigente así lo estipula.

SOLVENTE: es una sustancia en la que se diluye un soluto, normalmente es la sustancia que forma parte en mayor cantidad en una solución.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito generar una propuesta para la recuperación y reutilización del cromo en lodos galvánicos de Ingecrom Ltda., a nivel laboratorio.

En primera instancia se realizó el diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa, puesto que de esta se genera el lodo a estudiar, dando a conocer el tipo de aguas que llega a la planta, los equipos y el proceso desarrollado en la empresa para la purificación de las aguas, y así mismo la disposición del lodo y su producción anual.

De acuerdo al diagnóstico, se propone una alternativa por la cual se logre recuperar el cromo contenido en el lodo, por lo que se llevó a cabo una matriz de selección con las posibles opciones, evaluando aspectos como: eficiencia de recuperación, disponibilidad de equipos costos, tiempo y facilidad de operación. Seleccionando de esta manera y por medio de soportes bibliográficos la alternativa que dé cumplimiento a dicho objetivo. Se realiza la experimentación de esta, realizando un diseño factorial 2^3 de 9 ensayos con su respectiva réplica, determinando con análisis volumétrico el cromo existente en las soluciones, y obteniendo la recuperación de cromo hexavalente.

Seguidamente se evaluó el desempeño del cromo recuperado para la reincorporación de este en el proceso de cromo duro, por lo que se llevó a cabo respectivas marchas de purificación y finalmente una electrólisis a nivel laboratorio con celda Hull. Analizando de forma cualitativa el recubrimiento obtenido.

Una vez analizado el desempeño del cromo en la electrodeposición, se determinó la viabilidad financiera del proyecto usando el valor presente neto y el índice de precios al consumidor, llevando a cabo una proyección a cinco años de la alternativa seleccionada y sacando la relación beneficio costo del proyecto.

Palabras claves: aguas residuales, lodo, electrólisis, cromo duro.

INTRODUCCIÓN

En la industria de recubrimiento electrolítico existen cuatro subdivisiones para la aplicación de capas metálicas por vía electrolítica que son: Depósito con efecto protector y decorativo (D.E.P.D) usando cobre, níquel y cromo. Esta dada para aplicar sobre piezas de consumo masivo como partes de bicicletas y grifería. Deposito con efecto protector (D.E.P) usa recubrimiento de zinc, aplicada a tornillería y partes internas de automotores. Deposito con efecto decorativo (D.E.D) es utilizada por los orfebres para acabados superficiales, aplicando oro y plata. Deposito con efecto modificador (D.E.M) cubre los requisitos para la aplicación por electrólisis de cromo duro para ingeniería.

Estos procesos generan residuos líquidos contaminados con sustancias químicas y con cargas metálicas inherentes al proceso, los cuales deben seguir un tratamiento de aguas residuales para su posterior vertimiento o reutilización, de este tratamiento nace uno de los principales problemas en la industria el cual es la disposición y tratamiento de lodos.

La industria de cromo duro producen grandes volúmenes de lodo, que ha venido en aumento con el incremento de plantas de tratamiento de aguas residuales, dichos lodos en su composición incluyen los contaminantes iniciales del agua que pueden ser transformados y cuyas características pueden afectar el medio ambiente, uno de los mayores contaminantes y que generan altos niveles de peligrosidad al contacto humano son los metales pesados como el cromo.

En Colombia existen alrededor de 521 empresas dedicadas a los procesos galvanicos¹, entre pequeñas y grandes empresas se encuentran localizadas en zonas industriales de Bogotá y otras de las principales ciudades de todo el país. Solo algunas de estas cumplen con los estándares ambientales para los vertimientos de residuos, y con las leyes establecidas para este tipo de procesos.

Es por esto que hoy en día surge la necesidad de implementar alternativas para el tratamiento de lodos que sean económicamente viables, por las cuales se permita la reutilización de este residuo o disminuir su producción. Culminando en productos y servicios más limpios y sostenibles, con lo que se contribuirá al desarrollo económico y a reducir la contaminación ambiental.

La problemática a solucionar es, la recuperación de cromo presente en el lodo, lo cual se puede lograr por métodos diferentes como la electrólisis y la oxidación química en los cuales se basó el presente estudio, con el fin de recuperar ácido crómico para reutilizarlo en el proceso de electrodeposición. Este estudio es aplicable a empresas que utilicen el cromo como en sus procesos de recubrimiento

¹ FUNDES Colombia. Guía de buenas prácticas para el sector galvanotecnia; Julio, 2005, p 6.

electrolítico generando lodos de difícil disposición, siendo este una base para reducir los problemas ambientales.

De manera que por medio de este trabajo de grado se busca implementar un proceso por el cual se logre la recuperación del ácido crómico que se encuentre en el lodo procedente de la planta de tratamiento de aguas de una empresa de cromo duro. Con el que se alcance estándares de calidad, eficiencia y económica.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Generar una propuesta para la recuperación y reutilización del cromo en lodos galvánicos de Ingecrom Ltda., a nivel laboratorio.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Diagnosticar la planta de tratamiento de aguas del proceso de cromo duro.
2. Seleccionar la alternativa de recuperación de cromo presente en los lodos galvánicos.
3. Evaluar el desempeño del cromo recuperado para su reutilización en el proceso de recubrimiento por electrólisis a nivel laboratorio.
4. Determinar la viabilidad financiera de la implementación del proceso de recuperación y reutilización de cromo en Ingecrom Ltda.

1. GENERALIDADES

1.1 INDUSTRIA GALVANICA

El sector galvanico comprende todos aquellos recubrimientos vía electrolítica², es decir los cambios químicos producidos por la corriente eléctrica. Estos recubrimientos son aplicados sobre diferentes superficies, con fines decorativos y de protección. Los metales que se utilizan normalmente para cumplir este fin son: cadmio, cromo, cobre, oro, níquel, plata y estaño.

Actualmente es aplicada para la industria automotriz, industria aeronáutica, electrodomésticos, construcción, joyería, ferretería entre otras

1.2 INGE Crom LTDA.

Inge Crom LTDA, es una empresa con 35 años al servicio de la industria Colombiana realizando trabajos de recubrimiento en cromo duro de superficies metálicas para ingeniería. Se encuentra ubicada en la ciudad de Bogotá D.C., en esta planta se lleva a cabo el proceso de cromado el cual es controlado analíticamente, estandarizado bajo normas ASTM, cumpliendo con altos estándares de calidad y así mismos se da un uso de los recursos y materias primas de manera eficiente.

Igualmente realizan servicios especiales y bajo pedido como anonizado en duro, rectificado, cobrizado y otros recubrimientos especiales.

² FUNDES Colombia. Guía de buenas prácticas para el sector galvanotecnia. Julio 28. p. 5.

Figura 1. Ubicación de la empresa Ingecrom Ltda.



Fuente. Google Maps. Modificado por los autores

1.3 CROMO DURO

El cromo duro es la aplicación por vía electrolítica de un recubrimiento de cromo (Cr), con el que se adquieren diversas características físico-químicas según su aplicación³ tales como: dureza, resistencia a la corrosión y alto coeficiente de rozamiento. Es aplicado sobre superficies metálicas que deben soportar elevadas temperaturas, esfuerzos de desgaste y fuerzas de fricción. Aumentando de esta manera la vida útil de las distintas piezas usadas en ingeniería.

El proceso de cromado suele hacerse a partir de un electrolito de cromo hexavalente Cr^{+6} y un catalizador, en donde la calidad varía con la composición del electrolito, temperatura de proceso, contenido de catalizadores y densidad de corriente⁴.

Además de esto el cromo duro aplicado sobre una superficie metálica, cumple con las siguientes características físicas descritas en la tabla 1.

³ MUÑOZ RAMÍREZ, César Arnoldo, VARGAS RODRÍGUEZ, Nelson Leonardo. Recuperación de cromo residual en una planta electrolítica de cromo duro (Mecrotec Ltda.). Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2001. p. 1.

⁴ Ibid., p. 1.

Tabla 1. Propiedades físicas del cromo depositado electrolíticamente

Numero atómico	24
Peso atómico	52.01
Densidad	7g/cm ³
Peso específico	6.9 – 7.1 g/cm a 20°C
Punto de fusión	1900°C
Punto de ebullición	2500°C
Resistividad eléctrica	40 micro – ohms / cm
Coefficiente de dilatación lineal	0.8 mm p.m. a 0 °C
Poder de reflexión del cromo brillante	60 a 66 %
Conductibilidad térmica	0.165 cal / cm ² a 20°C
Resistividad al rayado, según escala Martens	56 - 100

Fuente. MASSUET, Vicente. Cromado duro. José Montesó ed. 1957. 11 p.

1.4 MARCO LEGAL DEL PROCESO DE CROMO DURO

En Ingegrom Ltda. Se realizan depósitos con efecto modificador (D.E.M) bajo las especificaciones generales sobre recubrimientos electrolíticos. Expedidas por la American Society for Testing Materials (ASTM), con las que se enuncian los requerimientos que debe llevar el producto y sugerencias sobre los procedimientos del proceso. A continuación las normas utilizadas para recubrimientos de cromo duro.

ASTM B650/2013 Esta especificación se basa en los requerimientos de los electrodepositos de cromo sobre sustratos ferrosos, para determinadas aplicaciones de ingeniería⁵. Por la cual se definen los requisitos del revestimiento como: la apariencia del recubrimiento, tratamiento de alivio de tensión, espesor y empaclado.

ASTM 177M/2011 La cual proporciona información sobre la deposición de cromo en acero para usos de ingeniería⁶, con la que se pretende obtener recubrimientos suaves y adherentes de cromo de un espesor deseado, conservando al mismo tiempo las propiedades físicas y mecánicas requeridas de los metales base. Proporcionando información sobre los baños electrolíticos catalizadores, sustratos utilizados en el tratamiento, en lo cual el cromo de ingeniería puede ser aplicado directamente a la superficie de una serie de metales de uso común tales como aluminio, aleaciones de níquel, hierro fundido, aceros, cobre, aleaciones de cobre y titanio. Asimismo sobre el contenido de los ánodos de plomo y la necesidad de estos.

⁵ ASTM International. 2013. ISBN 9781606506189

⁶ ASTM International. 2011. ISBN 9781606506189

Norma AMS2460 Dirigida a la especificación de material aeroespacial, incluye detalles para la calidad del metal base y para el alivio de tensión de las piezas de acero antes de la aplicación del recubrimiento⁷. Suministra información sobre la aplicación, restricciones, seguridad para materiales peligrosos, clasificación según la electrodeposición de cromo y según su apariencia. Asimismo sobre los requerimientos técnicos como, la calidad del metal base, limpieza, propiedades, espesor, porosidad, entre otros requerimientos necesarios para llevar a cabo la electrodeposición apta.

1.5 PROCESO DE CROMO DURO EN INGECROM LTDA.

Para realizar los depósitos con efecto modificador de cromo duro, se cumple con los procedimientos estándar de las normas anteriormente mencionadas, sujetas al requerimiento del cliente, y cuyos procesos básicos consisten en:

1.5.1 Tratamiento de Alivio de Tensión. Todas las partes que tengan una máxima resistencia a la tracción o por encima de 130.000 psi, las cuales sean maquinadas, esmeriladas, formadas o estiradas en frío, y/o han sufrido un esfuerzo o son de reproceso, se someterán a calentamiento a un mínimo de 375 +/- 23 °F (191 +/- 14°C) por un tiempo de tres horas o más⁸, antes de la limpieza y recubrimiento para alivio del deterioro de la tensión a la tracción residual.

1.5.2 Alistamiento mecánico. Se procede al quitar las pequeñas imperfecciones que quedaron en el material, ya que antes de aplicar un depósito metálico sobre cualquier artículo es necesario que la superficie este completamente uniforme.

1.5.3 Enganche. Se sujetan las piezas en el bastidor o ganchera, los cuales son dispositivos diseñados para permitir de manera adecuada el paso de la corriente durante el proceso electrolítico. Las gancheras pueden sujetar una o varias piezas.

1.5.4 Limpieza. Todas las partes de acero serán limpiadas se acuerdo a la norma establecida. Mientras que otros metales básicos serán limpiados por medio de métodos que no producirán deterioro en el metal base, así como tampoco interferirá con la adherencia del depósito.

Uno de estos métodos es el desengrase, en él se quitan las grasas presentes en las piezas ya que su presencia evita la adherencia del depósito electrolítico. Puede ocurrir desengrase alcalino o electrolítico.

1.5.5 Electrodeposición. Las piezas son sumergidas en un reactor en el cual se encuentra contenido un electrolito de cromo con ánodos de plomo y un catalizador,

⁷ SAE INTERNATIONAL. AMS2460. 1967

⁸ Recubrimiento o revestimiento de cromo electrodepositado. 1974, p 3.

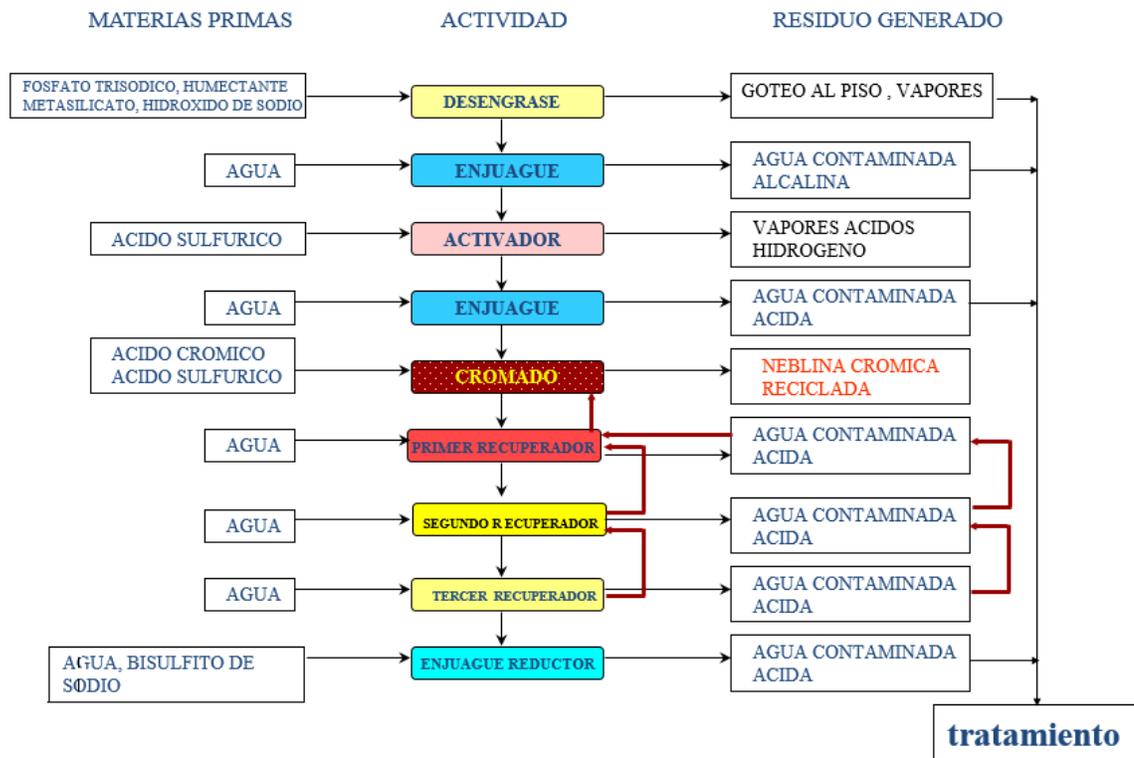
con el paso de la corriente los iones de la solución se reducen en el cátodo formando el recubrimiento.

1.5.6 Deshidrogenación. Todas las partes de acero recubiertas, con dureza de Rockwell 040 y mayor, serán calentadas a un mínimo de 375 +/- 25 °F (191 +/- 14°C)⁹ por tres horas o más dentro de las cuatro horas después del recubrimiento, para que se produzca el alivio de fisuración de hidrogeno.

1.5.7 Control final del proceso. Se realiza verificación del acabado, pruebas de dureza, espesor y adherencia. Con esto se verifica que las piezas están listas para ser entregadas.

En la figura 2 se puede observar el ciclo del proceso con las materias primas utilizadas y el residuo generado.

Figura 2. Diagrama del ciclo de proceso.



Fuente. INGECROM LTDA.

⁹ Recubrimiento o revestimiento de cromo electrodepositado. Op. Cit., p. 14.

1.6 DESPLAQUE

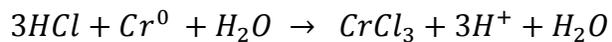
Es un procedimiento que consiste en retirar la película de cromo de una superficie metálica, este se realiza cuando es necesario en casos como: cromado defectuoso o no conforme. Es decir aquellos recubrimientos que no cumplen con los requerimientos establecidos en las normas, y además materiales que ya han cumplido su ciclo de vida o de trabajo y llegan a la planta para reproceso, para estos casos se realiza el proceso de desplaque, para continuar con el ciclo del proceso anteriormente descrito.

En Ingecrom Ltda., el 90% del material que entra a la planta es para reproceso, material que llega con cromo metálico sobre la superficie, lo que quiere decir que la mayor cantidad de cromo presente en los lodos proviene del proceso químico de desplaque. Este proceso no se mide por número de piezas, si no por área de superficie en decímetros cuadrados (dm^2), actualmente en Ingecrom Ltda., no se ha establecido ningún tipo de control primario para este proceso y la solución generada en este método llega a la PTAR.

El método aplicado para este proceso se elige dependiendo del tipo de material de composición.

1.6.1 Inmersión en ácido clorhídrico (HCl) 4%. Para todo tipo de aceros, es un proceso químico que consiste en sumergir las piezas en un tanque con ácido clorhídrico (HCl) y agua (H_2O) en partes iguales¹⁰. En donde se retira la película de cromo por ataque del ion cloro.

Reacción 1. Inmersión en ácido clorhídrico



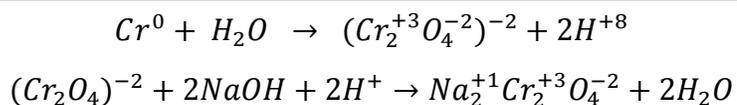
Este método de desplaque es el más utilizado en Ingecrom Ltda., la solución saturada se saca en un rango de 15 a 20 días para la PTAR.

1.6.2 Electrólisis inversa en hidróxido de sodio (NaOH). Utilizada para todo tipo de fundiciones, se somete la pieza a la acción de una solución de hidróxido de sodio (NaOH) y agua al 20%¹¹. Contendida en una cuba de hierro. El baño trabaja en frío con una densidad de corriente aproximadamente 8 A/dm^2 . El tiempo de duración de este tratamiento depende del espesor de la capa de cromo.

¹⁰ MASSUET. Op. Cit., p. 122.

¹¹ Ibid., p. 122

Reacción 2. Electrólisis inversa en NaOH.



1.6.3 Electrólisis en solución de cromo con corriente inversa. Se utiliza para las piezas de aluminio, con una solución de ácido crómico, trabajando a la temperatura ambiente y bajo una tensión de 6 voltios. De igual manera con este baño puede desprenderse la película de cromo electrolíticamente de cualquier otro material, aunque es más lento y menos económico.

1.7 RESIDUOS PELIGROSOS

Se habla de residuos peligrosos aquellos generados durante el tratamiento de aguas residuales en Ingecrom Ltda., como los son los lodos galvánicos. De acuerdo a esto los residuos peligrosos generados a partir de actividades industriales, son residuos que debido a su peligrosidad intrínseca (tóxico, corrosivo, reactivo, inflamable, explosivo, infeccioso, ecotóxico), son considerados como fuentes de riesgo para el medio ambiente y la salud¹².

Para clasificar un residuo como peligroso por lo general se utilizan los siguientes criterios.

- Estar incluidos en listas de residuos generados en procesos específicos, es decir, según su origen.
- Pertenecer a listas de tipos específicos de residuos.
- Presentar alguna característica de peligrosidad.
- Por sus propiedades físicas, químicas o biológicas.¹³

Es importante la correcta clasificación de los residuos, ya que hace posible tomar medidas de seguridad protectoras, acordes con el tipo de peligro al que corresponda. De no ser así, no es posible gestionarlos con seguridad por los encargados de su gestión.

1.7.1 Legislación ambiental aplicable. Dentro de las políticas de mejoramiento y preservación del medio ambiente, el gobierno nacional establece los estándares ambientales con respecto a los vertimientos generados por las industrias.

Con la normatividad ambiental existente se pretende disminuir el impacto ambiental generado por diferentes agentes contaminantes y por ende garantizar un ambiente sano a los habitantes del territorio nacional.

¹² Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial República de Colombia. Gestión integral de residuos o desechos peligrosos. Bogotá D.C: 2007. p. 13.

¹³ Ibid., p. 17.

Hoy en día la Secretaria Distrital de Ambiente, es la autoridad que promueve y regula la sustentabilidad ambiental de Bogotá. Todo esto se ve reflejado en las resoluciones, decretos y estatutos ambientales vigentes.

EL DECRETO 4741 DEL 30 DE DICIEMBRE DE 2005 define un “residuo o desecho peligroso” como:

Es aquel residuo o desecho que por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas, inflamables, infecciosas o radiactivas puede causar riesgo o daño para la salud humana y el ambiente¹⁴. Así mismo, se considera residuo o desecho peligroso los envases, empaques y embalajes que hayan estado en contacto con ellos.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 5 del Decreto 4741 de 2005 los residuos o desechos incluidos en el ANEXO A y ANEXO B del decreto se consideran como peligrosos a menos que no presenten ninguna de las características de peligrosidad descritas en el ANEXO C.

DECRETO 1594 DE 1984, por el cual se reglamenta parcialmente el título I de la Ley 9 de 1979, así como el capítulo II del título VI - parte III - libro II y el título III de la parte III - libro I - del Decreto 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos¹⁵.

- **Artículo 12.** Denominándose lodo a la suspensión de un sólido en un líquido proveniente de tratamiento de aguas, residuos líquidos u otros similares.

RESOLUCIÓN 1074 DEL 28 DE OCTUBRE DE 1997, por la cual se establece estándares ambientales en materia de vertimientos¹⁶.

- **Artículo 7.** Los lodos y sedimentos originados en sistemas de tratamiento de aguas residuales no podrán ser dispuestos en corrientes de agua y/o en redes de alcantarillado público.

De acuerdo con la información descrita en este capítulo se da una visión acerca de la industria galvánica la cual comprende todos los recubrimientos electrolíticos. De esta manera se da a conocer el proceso de cromo duro, su aplicación, las propiedades, características de este, las normas establecidas para su aplicación y además los conceptos básicos de los procesos involucrados en una planta electrolítica especializada en recubrimientos de cromo duro, en la cual se basa el presente trabajo de grado. Con lo que se permite desarrollar el estudio necesario para la recuperación de cromo contenido en lodos procedentes del tratamiento de aguas.

¹⁴ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 4741. (Diciembre 30,). 2005.

¹⁵ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Decreto 1594. (Junio 26,). 1984.

¹⁶ COLOMBIA. CONGRESO DE LA REPUBLICA. Resolución 1074. (Octubre 28,). 1997.

2. DIAGNÓSTICO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DE INGENIERIA LTDA.

El objetivo de la PTAR es minimizar el contenido de residuos provenientes del cromado para el cumplimiento de la normatividad ambiental (Resoluciones 0631 de 2015 y 1074 de 1997) y asimismo reutilizar el agua en la planta minimizando el consumo del líquido y el uso eficiente de materias primas. Esta se basa en los principios de producción más limpia, con los cuales se busca incrementar la eficiencia y reducir riesgos para los seres humanos y el ambiente, además conducen al ahorro de materias primas, agua y/o energía.

2.1 AGUAS RESIDUALES DEL PROCESO DE RECUBRIMIENTO

El agua residual es aquella que ha sido sometida a procesos en los cuales la calidad de esta se pierde puesto que hay presencia de uno o varios contaminantes¹⁷.

El agua residual procedente del proceso de recubrimiento electrolytico es un efluente industrial de gran poder contaminante, presenta cargas de trióxido de cromo (CrO_3) y demás componentes de los residuos del ciclo del proceso anteriormente presentado, los cuales afectan las características físicas y químicas del agua como lo son el color, olor, turbidez, entre otras. La principal característica del agua es que posee un pH ácido, y una alta concentración de cromo hexavalente.

De esta manera dos efluentes principales abastecen la planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) que son:

- Agua residual generada en el ciclo del proceso de cromo duro como los enjuagues, desengrase y lavado de pisos.
- Agua residual proveniente del proceso de desplaque.

Aproximadamente 30 L de la solución de desplaque son llevadas semanalmente a la PTAR para realizar el ajuste de pH durante el tratamiento de aguas. Además de esto un promedio de 10 L de dicha solución son utilizados para lavado de pisos semanalmente, y posteriormente llegan a la primera etapa de la PTAR junto con los residuos que van al piso.

La tabla 2 muestra las concentraciones máximas de metales permisibles que debe contener el agua generada en los procesos de la planta, para ser vertida a la red de alcantarillado.

¹⁷ FORIGUA MEDINA, María Margarita desarrollo de una propuesta de mejoramiento para el tratamiento de aguas residuales de la planta de nitrato de amonio en fertilizantes colombianos ferticol s.a. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2016. P. 26.

Tabla 2. Concentraciones máximas permisibles para verter a un cuerpo de agua y/o red de alcantarillado

Parámetro	Expresada como	Norma (mg/L)
Arsénico	As	0.1
Bario	Ba	5.0
Cadmio	Cd	0.003
Cinc	Zn	5.0
Cobre	Cu	0.25
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	0.5
Cromo total	Cr total	1.0
Mercurio	Hg	0.02
Plata	Ag	0.5

Fuente. MINISTERIO DE AMBIENTO Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 de 2015. Abril 18,. [Consultado el Agosto ,2017]. Disponible en: http://servicios.minminas.gov.co/compilacionnormativa/docs/resolucion_minambienteds_0631_2015.htm

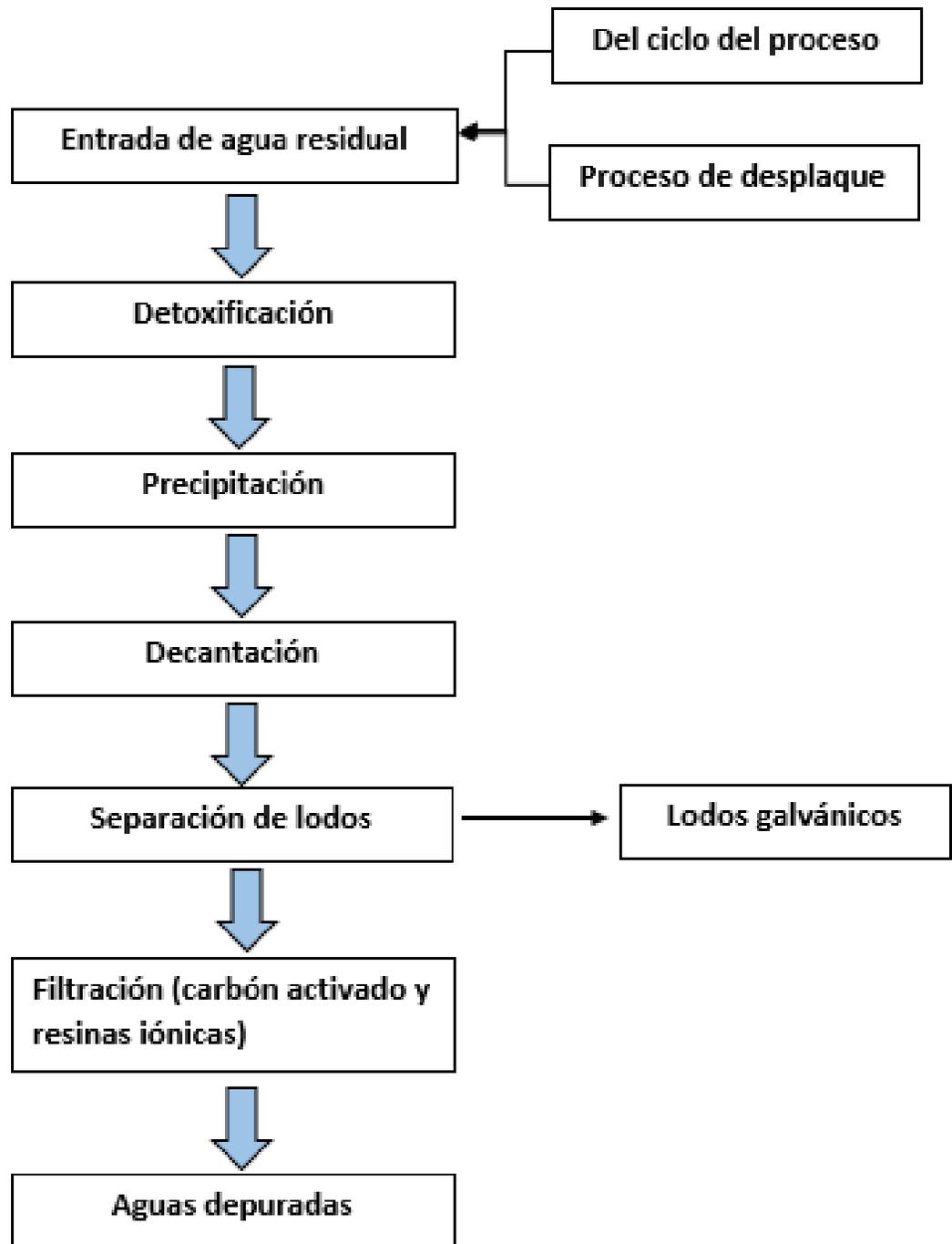
2.2 TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

El tratamiento realizado es un proceso discontinuo, el cual permite verificar y controlar la completa finalización de las reacciones químicas, con lo cual se facilita corregir posibles fallas en alguna de las etapas de la PTAR.

La secuencia del proceso físico químico de tratamiento por cargas tiene etapas de almacenamiento y homogenización en las cuales ocurren operaciones de detoxificación, precipitación, decantación y filtración.

A continuación en la figura 3, se muestra el diagrama de bloques del proceso.

Figura 3. Diagrama de bloques del proceso.



2.2.1 Equipos involucrados. El sistema de tratamiento cuenta con equipos y tanques para el óptimo desarrollo del tratamiento que se muestran a continuación.

Tabla 3. Equipos involucrados en la PTAR

Equipos	Descripción
Tanque homogenizador	Es el tanque utilizado para el almacenamiento y homogenización de las aguas residuales generadas durante el proceso. tiene una capacidad de 1 m ³
Tanque de tratamiento	Tanque de detoxificación, floculación, precipitación y decantación de lodos galvánicos por cargas. Tiene una capacidad máxima de 2.46 m ³
Tanque ajuste de pH	Tanque de almacenamiento y estandarización de pH, para verificación de parámetros. Capacidad 1 m ³
Tanque almacenamiento agua tratada	Tanque normalización de agua tratada con verificación de parámetros para reutilización en planta.
Bomba centrífuga	El proceso de transporte de agua se realiza por medio de dos bombas centrífugas de 115 voltios, 1/3 HP y 3450 rpm. Este equipo de la PTAR se encuentra en condiciones de uso.
Filtro de carbón activado	Atrapa y remueve compuestos principalmente orgánicos y tensoactivos presentes en el líquido.
Columnas de intercambio iónico	Son materiales sólidos insolubles que aportan cationes o aniones intercambiables. Por las cuales se elimina los iones metálicos persistentes.

2.2.2 Proceso del tratamiento de aguas residuales. Debido a las restricciones ambientales del cromo hexavalente se hace necesario reducirlo para su tratamiento, por lo cual en el tratamiento de aguas residuales se emplean una serie de operaciones unitarias como: neutralización en la cual se ajusta el pH, coagulación, floculación y sedimentación.

El tratamiento inicia con la entrada de las aguas residuales en el tanque homogenizador. Las cuales se agitan por 3 minutos para su completa homogenización, este tanque está dotado de un filtro en la parte superior para controlar el posible ingreso de objetos extraños o basuras al tratamiento. Posteriormente el agua pasa por un sistema de bombeo acondicionado con una tubería de 2", la cual se encarga de transportar dicha agua proveniente del primer tanque a un segundo tanque de tratamiento donde se llevan a cabo por cargas las reacciones químicas para remover metales y otros contaminantes de las aguas residuales.

De este tanque se toma una muestra de un litro de agua para determinar concentración de contaminantes y ajustar adiciones de reactivos químicos mediante análisis y pruebas de jarras. Según los resultados del análisis hecho en el laboratorio se realizan las siguientes operaciones.

1. Ajuste de pH a 1.5 con las aguas cargadas de Cr proveniente del proceso de desplaque, manteniendo la agitación.
2. Siguiendo la secuencia físico química del tratamiento, en este tanque se lleva a cabo la detoxificación, que es el proceso en el cual se adiciona sulfito de sodio (Na_2SO_3) el cual es el detoxificante correspondiente para reducir el cromo hexavalente (Cr^{+6}) a cromo trivalente (Cr^{+3}). Se debe calcular la cantidad necesaria de Na_2SO_3 de acuerdo a la concentración de cromo hexavalente determinada y el volumen de agua a tratar como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Dosis de sulfito de sodio para la reducción

Cr⁺⁶ (Mg/L)	Sulfito (g)	Cr⁺⁶ (Mg/L)	Sulfito (g)
0	0	160	780
10	50	170	830
20	100	180	870
30	150	190	920
35	170	200	970
40	190	210	1020
45	220	220	1070
50	240	230	1120
55	270	240	1160
60	290	250	1210
65	320	260	1310
70	340	270	1410

Fuente. INGECROM LTDA.

Tabla 5. (Continuación)

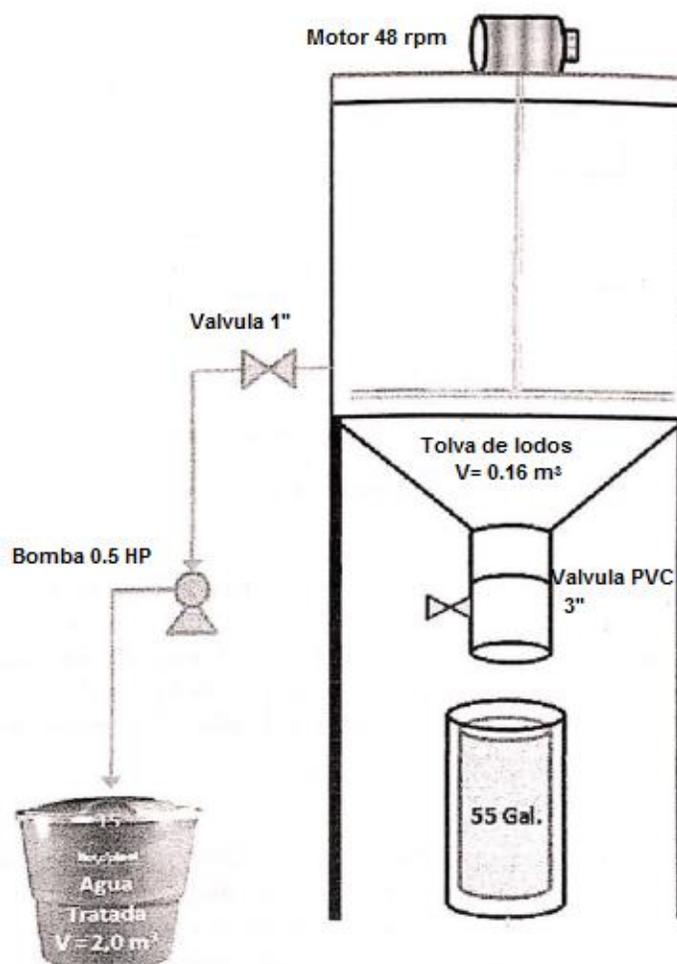
Cr⁺⁶ (Mg/L)	Sulfito (g)	Cr⁺⁶ (Mg/L)	Sulfito (g)
80	390	290	1550
90	440	300	1700
100	490	310	1840
110	530	320	1940
120	580	330	2040
130	630	340	2180
140	680	350	2330
150	730	360	2430

Fuente. INGECROM LTDA.

3. Determinar nuevamente la concentración de Cr⁺⁶ para verificar la reducción total del mismo y el cumplimiento de la norma ambiental vigente (Resoluciones 0631 de 2015 y 1074 de 1997).
4. Adición de sulfuro de sodio (Na₂S).
5. Subir el pH a 9.5 mediante la adición de hidróxido de sodio (NaOH) al 20% el cual es una base fuerte que favorece la reacción con el ion Cr (III) para formar el hidróxido de cromo (Cr(OH)₃), igualmente se adiciona lechada de cal.
6. Eliminación de cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn). Mediante la adición de hipoclorito de sodio (NaClO) por el cual se generan cationes que cumplen con dicho objetivo.
7. Adición de sulfato de aluminio (Al₂(SO₄)₃) para eliminar cadmio (Cd) y níquel (Ni) presentes como contaminantes del agua.
8. Floculación y precipitación por medio de la adición del floculante de 30 g/m³, se deja reposar para sedimentación de lodos.

El tanque de tratamiento tiene capacidad total de 2.46 m³ de los cuales 0.16 m³ constituyen la tolva de lodos donde se recolectan los sedimentos que se generen durante el tratamiento, de la cual pueden ser fácilmente removidos, como se aprecia en la figura 4. Mientras que los 2.30 m³ restantes, corresponde al agua clarificada que continúa a la siguiente fase de tratamiento.

Figura 4. Esquema tanque de tratamiento.

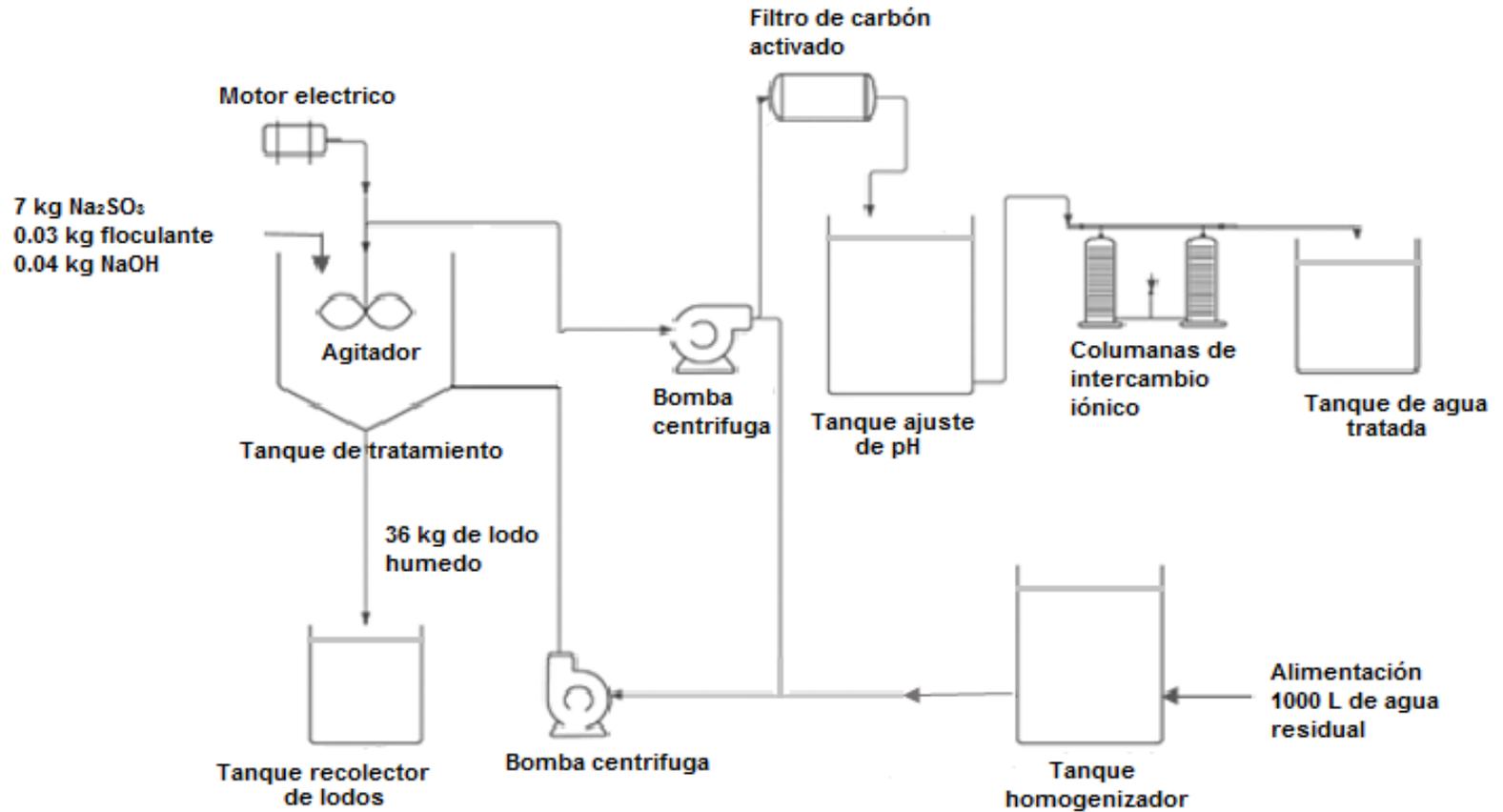


Fuente. INGECROM LTDA

El agua clarificada es bombeada al tanque 3 de ajuste de pH pasando por un filtro de carbón activado para la remoción de materia orgánica y tensoactivos. En el tanque número 3 se ajusta el pH a 7.5 con ácido sulfúrico (H_2SO_4) para dar cumplimiento a la normatividad ambiental vigente. De aquí el agua es bombeada a las columnas de intercambio iónico, las cuales cuentan con unas resinas catiónica y anionica en su interior que permiten la separación de los iones persistentes en el agua residual luego de haber realizado el tratamiento, con lo cual se purifica el efluente para su reutilización, y finalmente llegar al cuarto tanque de agua tratada.

De acuerdo a esto en la figura 5 se puede ver la distribución de equipos de la (PTAR).

Figura 5. Esquema de la PTAR.



Anualmente se realizan pruebas al agua tratada, donde se verifica el cumplimiento de las normas para este efluente. En la tabla 5 se muestra el último informe de resultados de laboratorio del contenido de metales presente en una muestra de agua tratada en la PTAR de Ingecrom Ltda. Desarrollado por Laboratorio Quimicontrol Ltda. El 12 de junio de 2017 en control del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Este informe completo se puede consultar en el (Anexo A).

Tabla 6. Informe de resultados de laboratorio.

Variable	Unidad	Método	Resultados	Res 631:1015
Cobre total, Cu	mg/L	SM 3030 H,3111 B,A.A. LLAMA	0.067	1 cumple
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H,3111 B,A.A. LLAMA	0.017	0.5 cumple
Hierro total, Fe	mg/L	SM 3030 H,3111 B,A.A. LLAMA	0.113	3 cumple
Níquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H,3111 D,A.A. LLAMA	0.087	0.5 cumple
Plata total, Ag	mg/L	SM 3030 H,3111 B,A.A. LLAMA	< 0.005	0.2 cumple

Fuente. INGECROM LTDA.

En la tabla anterior se observa que el agua tratada en la PTAR cumple con las concentraciones de metales máximas permisibles para verter el fluido en la red de alcantarillado según la tabla 2, y además para ser reutilizada en las diferentes actividades de la fábrica. Igualmente Se establece que el cromo total se encuentra en una cantidad de 0.017 mg/L es decir que cumple con la normatividad ambiental ya que el nivel máximo es de 0.5 mg/L y esto se logra con todo el proceso de tratamiento de aguas anteriormente descrito y las operaciones involucradas.

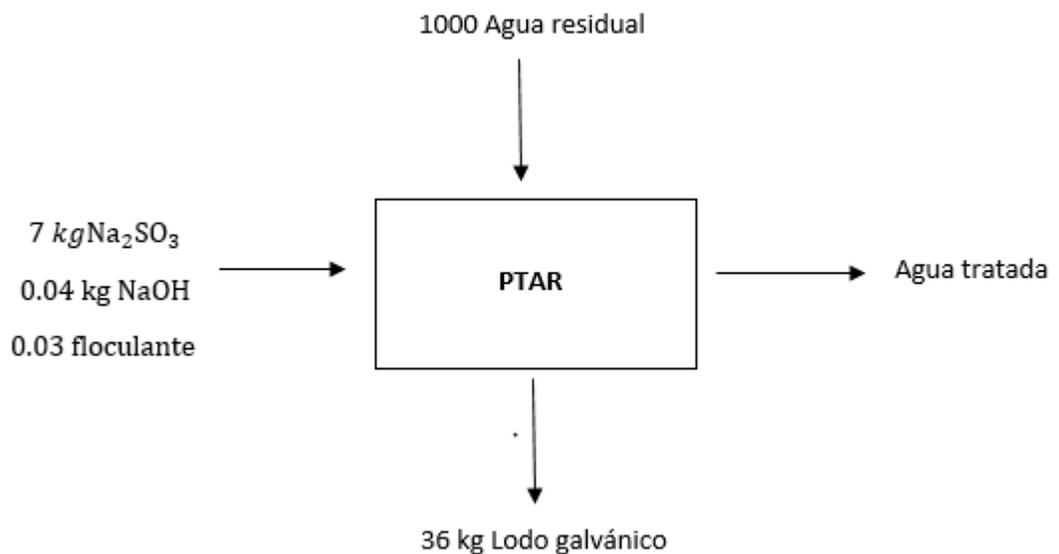
2.2.3 Balance de materia. A continuación se desarrolla el balance de materia de la PTAR, por el cual se determina la cantidad de agua trata que sale de esta, así mismo el rendimiento y las pérdidas.

- **Balance general**

Ecuación 1. Balance general de materia.

$$M \text{ Entrada} = M \text{ salida}$$

Figura 6. Esquema balance de materia.



$$\mathbf{M\ entrada = M\ sale}$$

$$1000\text{ kg}(\text{H}_2\text{O})_m + 7\text{ kg}(\text{Na}_2\text{SO}_3) + 0.03\text{ kg}(\text{Floculante}) + 0.04\text{ kg}(\text{NaOH}) \\ = 36\text{ kg}(\text{Lodos}) + x(\text{kg H}_2\text{O})$$

$$x = 971.07\text{ kg}$$

$$\% R = 97.10\text{ rendimiento}$$

$$\text{Perdidas} = 2.9\%$$

De acuerdo al balance de materia realizado anteriormente se puede establecer que por 1000 kg de agua residual que entra a la PTAR, se obtiene 971.07 kg de agua tratada.

2.3 LODOS PROCEDENTES DE LA PTAR

Posterior al proceso de cromado, se generan residuos sólidos a partir del tratamiento de aguas residuales, dichos residuos son lodos que precipitan, los cuales deben gestionarse de acuerdo a su composición.

La presencia de metales pesados en el lodo hace que este sea un recurso potencial, puesto que posibilita gestionarlos para su recuperación.

2.3.1 Descripción de lodos. Los lodos metálicos que se generan en la PTAR, presenta un color verdoso propio de las sales de cromo trivalente, con trazas amarillas y cafés. Dichos lodos contienen sales insolubles de los metales junto con agentes químicos utilizados durante el proceso, por esta razón presentan características tóxicas y corrosivas, y son denominados como residuos peligrosos.

Actualmente en Ingecrom Ltda., los lodos provenientes del proceso de tratamiento de aguas galvánicas, son retirados por la parte inferior del tanque de tratamiento haciendo uso de una válvula, vertiéndolos en un sistema de filtración y desecación que retendrá los sólidos más gruesos y filtra el agua por medio de una tela especial de uso industrial. Después de retirados, los lodos son llevados a contenedores donde se dejan secar al ambiente, la solución que queda en los contenedores vuelve directamente a la PTAR para ser tratada. Una vez deshidratados, los lodos son almacenados en sacos de polietileno, los cuales no deben superar los 25 kg.

La figura 7 muestra los lodos cuando son vertidos desde la tolva, mientras que la figura 8 es una muestra extraída de un saco de almacenamiento.

Figura 7. Lodo vertido desde la tolva



Figura 8. Muestra de lodo almacenado



Los lodos son almacenados por un periodo máximo de 1 año en un lugar apropiado para ser entregado a un gestor en este caso a Biolodos S.A.E.S.P, entidad orientada al tratamiento biológico de lodos galvánicos, mediante el método de láminas filtrantes. En el año 2016 se entregaron 1580 kg de lodos, con un proceso que garantiza el adecuado tratamiento de los residuos mencionados cumpliendo con la normatividad ambiental vigente y con la resolución de la CAR No. 1559 del 31 de mayo del 2006.

La tabla 6 muestra la cantidad de lodos con contenido de cromo, generados en los 3 últimos años.

Tabla 7. Cantidad de lodos producidos anualmente

Año	Lodo metálico (kg/año)	Volumen de agua aproximada (L)
2013	1,135	31,528
2014	1,730	48,055
2015	1,135	31,527
2016	1,580	43,888

En el anexo B, se puede ver la certificación del 2016 emitida por Biolodos S.A.E.S.P.

2.4 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL LODO

La caracterización física comprende la determinación de pH y porcentaje de humedad, para esto se tomaron muestras de lodo el cual estaba almacenado en diferentes fechas, arrojando los siguientes resultados.

2.4.1 pH. Se determinó usando un pHmetro en diferentes muestras de lodo, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 8. pH del lodo

Muestra	pH	Promedio
1	5	5.5
2	5.5	
3	6	

Como se puede observar el lodo presenta un pH de carácter ácido que está en promedio de 5.5.

2.4.2 % de humedad. Para la determinación del porcentaje de humedad se tomaron muestras de 4g de lodo, extraídas de distintos sacos en donde estos se encuentran almacenados. La muestra fue pesada en un crisol el cual fue llevado a una mufla a calentar durante 30 minutos a una temperatura de 70°C, permitiendo que se evapore la humedad que posee la muestra. Por último el crisol es enfriado y pesado, los datos obtenidos fueron los siguientes.

Tabla 9. % de humedad del lodo

Muestra	% Humedad	Promedio
1	75.75 %	
2	77.12%	
3	75.84%	75.93%
4	75.77%	
5	74.90%	

Una vez el lodo se ha secado, el residuo presenta una coloración gris oscura, con facilidad de fractura.

Por lo descrito en este capítulo y conociendo el proceso en el que se genera el lodo, Ingecrom Ltda., desea implementar una alternativa por medio de la cual se logre recuperar la materia prima que se encuentre en estos residuos sólidos estudiados, de manera que se alcance un aprovechamiento total de los recursos de la empresa, contribuyendo con una posible disminución en los costos de disposición del lodo, así mismo al mejoramiento ambiental y la transformación productiva a la competitividad empresarial. Concluyendo en bienes y servicios más limpios y sostenibles.

Por esta razón se realizará un estudio para proponer la alternativa que cumpla con este objetivo.

3. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE RECUPERACIÓN DE CROMO PRESENTE EN LOS LODOS.

La industria de depósitos de cromo duro para ingeniería genera anualmente grandes cantidades de lodos con contenido de cromo. Por esta razón se crea la necesidad de buscar alternativas de aprovechamiento del cromo presente en el lodo en el proceso productivo, es necesaria la implementación de procesos apropiados para el manejo de estos residuos sólidos peligrosos, sujetos al cumplimiento de los requerimientos legales establecidos para su adecuado tratamiento y recuperación. De esta manera se pretende disminuir el volumen de los lodos y por consiguiente los costos de su disposición, que finalmente recaen en los costos de producción.

Con la selección de la alternativa se buscó recuperar Cr^{+6} de los residuos sólidos en estudio, y posteriormente, convertir en insumo para la industria y por ende minimizar la contaminación ambiental y la peligrosidad de estos residuos.

Actualmente en Ingecrom Ltda. El manejo y disposición de lodos generados en la PTAR, representa únicamente un costo en el proceso, sin obtener un aprovechamiento del cromo presente en estos.

3.1 TRATAMIENTOS PARA RECUPERACIÓN DE METALES

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, se identificaron dos diferentes tratamientos que permiten la recuperación de metales en lodos, los cuales incluyen procesos fisicoquímicos, entre los cuales se destacan la electrolisis y la oxidación química. Aunque también existen otros métodos por los cuales se puede separar el metal del lodo como lo es el intercambio iónico o por osmosis inversa, estos dos métodos no son viables para aplicar en este procedimiento debido a que posteriormente se tendría que hacer una oxidación para obtener cromo hexavalente el cual es el utilizado en el proceso de cromo duro.

A continuación se describen los dos posibles tratamientos para la recuperación de cromo.

3.1.1 Electrólisis. Esta técnica se basa en reacciones de óxido reducción, donde los electrones liberados por la corriente eléctrica reducen los iones metálicos, obligándolos a depositarse en el cátodo de la célula electrolítica¹⁸. Para realizar la operación se debe establecer una diferencia de potencial entre los electrodos para seleccionar la reacción deseada.

Durante mucho tiempo las técnicas de recuperación de metales por electrólisis han sido limitadas, por la baja eficiencia de recuperación en efluentes con bajas

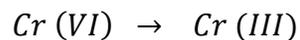
¹⁸ Xavier Elias Castells. Reciclaje de residuos industriales. ES: Díaz De Santos M.U.A, 2012. p. 148.

concentraciones de iones metálicos, aunque actualmente se han utilizado nuevos materiales (cátodos) en el mercado aumentando la eficiencia de recuperación.

Los sistemas electrolíticos utilizan células con dos electrodos, el ánodo generalmente esta hecho de un material no consumible como titanio, plomo entre otros, y el cátodo que es adaptado a la naturaleza de la operación y al tipo de electrolito utilizado, “en este sistema se permite recuperar el metal bajo forma de depósito sólido”¹⁹. El rendimiento depende entre otras de la densidad de corriente, la concentración y de la temperatura, la cantidad de metal depositado es proporcional a la cantidad de corriente que fluye a través de la celda electrolítica²⁰.

Por otro lado los iones metálicos también pueden ser devueltos o llevados al estado de valencia deseado como:

Reacción 3. Reducción de cromo



Así mismo la construcción de la célula requiere una velocidad de caudal regular sobre la totalidad de la superficie, con velocidades de caudal elevado se consiguen densidades de corriente y rendimientos más elevados que producen depósitos metálicos utilizables.

Los costos de la recuperación del metal dependen del tipo de metal y de la concentración de este²¹.

3.1.2 Oxidación química. Las reacciones de oxidación son aquellas en las que existe un aporte de electrones al agente oxidante por parte de una sustancia que se oxida, normalmente estas reacciones van acompañadas por adición de oxígeno y también puede ser común el aporte del cloro²².

Dichas reacciones deben contar con medios oxidantes, estos son los compuestos que pueden ceder fácilmente oxígeno, y de igual manera los elementos que pueden tomar fácilmente electrones, los oxidantes más comunes utilizados en la industria son:

- Oxígeno o aire
- Ozono
- Peróxido de hidrogeno

¹⁹ FISHCER, G. Recuperación de metales en los procesos electrolíticos. Cedel ed. Barcelona: Viladrau, 1982. p. 20.

²⁰ Ibid. p. 20.

²¹ Electrochemistry; Juan M. Feliu Martinez, Victor Climent ed. Encyclopedia of life support systems Eloss, 2009. p. 358.

²² CABILDO MIRANDA, M^a del Pilar, *et al.* Reciclado y tratamiento de residuos. ES: UNED, 2010. ISBN 9788436260069

- Permanganato potásico
- Cloro
- Dióxido de cloro

En la recuperación de cromo por vía oxidativa, tiene lugar un intercambio electrónico en el cual la partícula de la cual se extraen los electrones se oxida.

Para la recuperación de las sales de cromo contenidas en el lodo, es necesario oxidar el cromo que se encuentra en estado trivalente, por medio de un agente oxidante por el cual se obtenga cromo hexavalente.

3.2 MATRIZ DE SELECCIÓN PARA LA ALTERNATIVA DE RECUPERACIÓN

Después de plantear las alternativas para la recuperación de cromo hexavalente, se desarrolla una matriz de selección donde se evalúa cada una de las alternativas, mediante parámetros definidos para cada una de ellas. Para realizar la matriz de selección, se tuvieron en cuenta cinco criterios de interés para Ingecrom Ltda., los cuales son claves para seleccionar la mejor alternativa, estos son: eficiencia de recuperación, costos de operación, disponibilidad de equipos, facilidad de operación, tiempo de operación.

Se realiza una matriz de selección en la cual se concede un porcentaje de acuerdo a su importancia según los criterios y necesidades de la empresa.

Tabla 10. Ponderado de criterios

Variables	Porcentaje (%)
Eficiencia de recuperación	40
Costos de operación	30
Disponibilidad de equipos	10
Facilidad de operación	10
Tiempo de operación	10

Con estos porcentajes se puede determinar la calificación de cada alternativa de recuperación planteada.

Calificación:

5 → nivel más alto: mayor eficiencia, disponibilidad y facilidad de operación. Menor tiempo y costos.

1 → nivel más bajo: menor eficiencia, disponibilidad y facilidad de operación. Mayor tiempo y costos.

Una vez seleccionado el tratamiento a desarrollar, se llevará a cabo un diseño de experimentos con el cual se logrará establecer las cantidades de los diferentes reactivos químicos adicionar que permitirán la oxidación del cromo trivalente.

A continuación se calificarán los cinco criterios anteriormente establecidos para cada alternativa.

Eficiencia de recuperación. Criterio 1

Considerando que la recuperación de cromo hexavalente es el objetivo del proyecto a esta variable se le dio el mayor porcentaje de ponderación.

Tabla 11. Evaluación variable eficiencia de recuperación

		Puntaje
Electrólisis	Este tratamiento ofrece porcentajes de recuperación hasta del 85% ²³	4
Oxidación química	Porcentajes de recuperación en el rango de 89 – 99% ²⁴	5

Costos de operación. Criterio 2

Esta variable influye directamente en la selección de la alternativa y la realización del proyecto, por tal razón se ponderó con el 30%.

²³ FISHCER, G. Op. cit., p. 24.

²⁴ E Silva, Paula Teresa de Souza, et al. Extraction and recovery of chromium from electroplating sludge. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 128, no. 1, p. 41.

Tabla 12. Evaluación variable costos de operación

		Puntaje
Electrólisis	Origina costos energéticos aproximados de un 50%, y además de esto se requiere la materia prima y equipos.	2
Oxidación química	Este tratamiento no conlleva elevados costos en la operación, las materias primas, agentes oxidantes a utilizar son accesibles económicamente ²⁵ .	4

Disponibilidad de equipos. Criterio 3

Esta variable no genera impedimento para la realización del proyecto, aunque lo ideal es que no se adquieran equipos nuevos. Por tal razón se ponderó con el 10%.

Tabla 13. Evaluación variable disponibilidad de equipos

		Puntaje
Electrólisis	Genera la necesidad de utilizar y seleccionar materiales de construcción dieléctricos y de alta resistencia química, para realizar la electrólisis.	3
Oxidación química	No involucra el uso de tecnología sofisticada y se cuenta con los equipos necesarios para la operación.	5

Facilidad de operación. Criterio 4

Se ponderó con un porcentaje de 10% ya que no es determinante en la selección de la mejor alternativa.

²⁵ Ibid. p. 43.

Tabla 14. Evaluación variable facilidad de operación

		Puntaje
Electrólisis	No genera gran dificultad en la operación y los resultados se pueden analizar con facilidad ²⁶ . Aunque el operario tiene que recibir una capacitación antes del manejo.	3
Oxidación química	El tratamiento es de fácil operación, no presenta dificultades relevantes durante el proceso.	4

Tiempo de operación. Criterio 5

La variable no afecta directamente la selección del tratamiento para la recuperación del cromo.

Tabla 15. Evaluación variable tiempo de operación

		Puntaje
Electrólisis	Este procedimiento no conlleva mucho tiempo de operación, este depende de la concentración y la intensidad de corriente. El cual se puede calcular por medio de la ley Faraday ²⁷ .	3
Oxidación química	Depende de las condiciones de operación como temperatura y, concentración ²⁸	3

De acuerdo con la información suministrada, por medio de la matriz se evaluará cada una de las alternativas planteadas.

²⁶ FISHCER, G. Op. cit., p. 22.

²⁷ Harold Frederic Walton. Análisis químico e instrumental moderno. Reverté, 1978. p. 90.

²⁸ E Silva, Paula Tereza de Souza, et al. Op. Cit., p. 41.

Tabla 16. Matriz de selección de la mejor alternativa

Matriz de selección					
Alternativas		Oxidación química		Electrólisis	
Variables	Ponderación	Evaluated	Ponderación	Evaluated	Ponderación
Eficiencia de recuperación	40%	5	2	4	1.6
Costos de operación	30%	4	1.2	2	0.6
Disponibilidad de equipos	10%	5	0.5	3	0.3
Facilidad de operación	10%	4	0.4	3	0.3
Tiempo de operación	10%	3	0.3	3	0.3
TOTAL	100%		4.4		3.1

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, la mejor alternativa para la recuperación de cromo hexavalente es la oxidación química, debido a que presenta mayor favorabilidad frente a las variables evaluadas comparada con el otro tratamiento.

3.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Se describirán los ensayos realizados a nivel de laboratorio, que permitieron establecer las condiciones de operación del proceso seleccionado para la recuperación del metal.

Con ensayos basados en documentación bibliográfica se establecieron las condiciones y variables, determinando en que el grado de eficiencia que se logra con las mismas.

En las etapas de disolución de lodos y la oxidación del cromo presentes en el proceso, son consideradas algunas variables las cuales son mencionadas a continuación:

3.3.1 Disolución de lodos

Variable:

- **pH:** es una variable controlable, se debe tener un pH ácido de 1 para que el lodo se disuelva completamente.

A partir de la química analítica se conoce que el cromo precipita en medio básico, la solubilidad del hidróxido de cromo $[\text{Cr}(\text{OH})_3]$ en agua es nula, como se muestra a continuación²⁹.

Reacción 4. Descomposición del hidróxido de cromo.



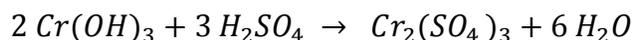
Por esta razón fue necesario elegir un reactivo que cumpliera con el propósito de la disolución completa de la muestra y que a su vez no afectara las condiciones para la recuperación del Cr (VI), para esto se tuvieron en cuenta dos reactivos: ácido nítrico $[\text{HNO}_3]$ y ácido sulfúrico $[\text{H}_2\text{SO}_4]$.

El ácido nítrico es un reactivo muy inestable el cual se descartó debido a que al elevarse la temperatura de la solución se desprenden vapores que presentan niveles de toxicidad como óxidos de nitrógeno, NO, NO₂. Por otro lado el ácido

²⁹ ORTIZ P, Nidia Elena. Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales de curtiembres de San Benito, Bogotá. En: INTEKHNIA. Dic 13, .p. 147.

sulfúrico produce una solución concentrada y pura de Cr⁺³, produciendo la acidez necesaria para disolver el lodo³⁰. Formando sulfato básico de cromo o sulfato de cromo, como se muestra a continuación.

Reacción 5. Formación de sulfato de cromo



3.3.1.1 Materiales y métodos. Para esta operación se utilizó H₂SO₄ reactivo analítico concentrado al 95 – 97 %, la prueba se realizó a temperatura ambiente, en la cual no surgió la necesidad de realizar una manipulación térmica. Con este la solución se lleva a un rango de pH entre 1 y 2 en el cual el cromo trivalente es muy soluble.

Se utilizó una muestra de lodo de 27.2 g con un pH inicial de 5.5 la cual fue disuelta en 100 ml de agua, seguidamente se adiciono H₂SO₄ hasta llegar a un pH en el cual se presente la disolución completa del lodo.

3.3.1.2 Resultados

Tabla 17. Medición de H₂SO₄.

Concentración [%W]	Cantidad de H ₂ SO ₄ [ml]	pH	Observación
35%	1.0	4	Cambio de coloración verde claro
	1.5	2	Intensificación de color
	2	1	Separación de fases

A pH 1 se obtiene la completa disolución de la muestra de lodo y la precipitación de pequeñas partículas sólidas de impurezas presentes en el lodo, como se muestra en la figura 9.

³⁰ CEMINO, Fernando E.; BIANCHI, Benjamín E., ANDRADA, Hugo L. Cromado electrolítico. El Cid Editor, 2007.

Figura 9. Fotografía disolución de una muestra de 4g de lodo



3.3.2 Oxidación de Cromo

Variable controlable

- **pH:** La oxidación del cromo tiene reacción en medio alcalino³¹, el medio debe tener suficiente concentración de $[\text{OH}]$ para que el Cr^{+3} se oxide a Cr^{+6} . Por tal razón se utiliza hidróxido de sodio $[\text{NaOH}]$ para alcanzar un $\text{pH} > 10$ ³².

Variables independientes

- **Concentración de agente oxidante:** Es necesario establecer la concentración de oxidante que se debe aplicar a una determinada concentración de Cr^{+3} para de esta manera garantizar la completa oxidación de la materia prima y a su vez determinar la concentración y el porcentaje del cromo recuperado.
- **Temperatura:** la reacción de oxidación puede ocurrir a temperatura ambiente y en un rango de 40 a 60 °C³³ para obtener una mayor velocidad de descomposición del agente oxidante.

³¹ VIAN ORTUÑO, Ángel. Introducción a la química industrial (2a. ed.). Barcelona: Editorial Reverté, 2012. p. 457.

³² I. Bojanowska. Recovery of Chromium from Sludge Formed after Neutralisation of Chromic Wastewater. En: POLISH JOURNAL OF ENVIRONMENTAL STUDIES. p. 118.

³³ E Silva, Paula Tereza de Souza, et al Op. Cit., p. 41.

Variable de respuesta

- **Cromo hexavalente recuperado:** es la variable de interés en la experimentación que está influenciada por los factores anteriormente mencionados, esta mide el resultado del estudio.

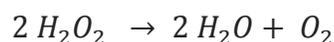
Teniendo en cuenta los aportes de los artículos “Extraction and recovery of chromium from electroplating sludge” y “A bench study on chromium recovery from tannery sludge” para realizar la oxidación de Cr (III) a Cr (VI). Se consideró el uso de hipoclorito de sodio [NaClO] y de peróxido de hidrogeno [H₂O₂] como agentes oxidantes.

A pesar de ser un oxidante muy eficiente para Cr (III), se descartó el uso del hipoclorito de sodio debido a que la materia orgánica presente en el lodo puede reaccionar con el ion cloro para producir compuestos organoclorados perjudiciales a la exposición humana,³⁴ además de esto pueden alterar la recuperación de cromo. Por esta razón el peróxido de hidrogeno fue el agente escogido para la oxidación de cromo.

Este es un producto químico industrial de gran importancia por sus múltiples aplicaciones, se produce comercialmente por electrolisis del ácido sulfúrico³⁵. El H₂O₂ se encuentra en estado de oxidación -1 y puede actuar como un agente oxidante reduciéndose al estado de oxidación -2³⁶.

La velocidad de descomposición aumenta con la temperatura en un factor de aproximadamente 2.2 veces por cada 10 °C en el rango de 20 -100³⁷, es inestables y se descompone rápidamente a oxígeno y agua con liberación de calor como se muestra a continuación.

Reacción 6. Descomposición de peróxido de hidrógeno



Para la experimentación se utilizó H₂O₂ comercial al 35% debido a su bajo costo y productos finales libres de peligros de reacción, la aplicación de este producto químico evita cualquier riesgo de formación de compuestos orgánicos clorados tóxicos porque el subproducto principal es el agua [H₂O].

³⁴ Ibid., p. 42.

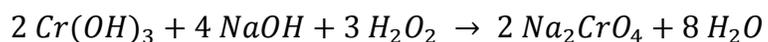
³⁵ WALTER J. WEBBER, JR. Control de la calidad del agua procesos fisicoquímicos. Reverté S.A., p. 466.

³⁶ GUILLESPIE, Ronald J. Chemistry. Reverté S.A., 1990. p. 791.

³⁷ STRUKUL, Giorgio (Hrsg). Catalytic oxidations with hydrogen peroxide as oxidant. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. p. 37.

La reacción que ocurre en medio alcalino con hidróxido de sodio y el agente oxidante es la siguiente.

Reacción 7. Oxidación de Cr (III)



Dicha reacción es exotérmica, durante esta se puede observar que la solución cambia el color verde característico de las sales de cromo trivalente a color marrón debido a la oxidación a cromo hexavalente, como se puede observar en la figura 10.

Figura 10. Oxidación de Cr^{+3}



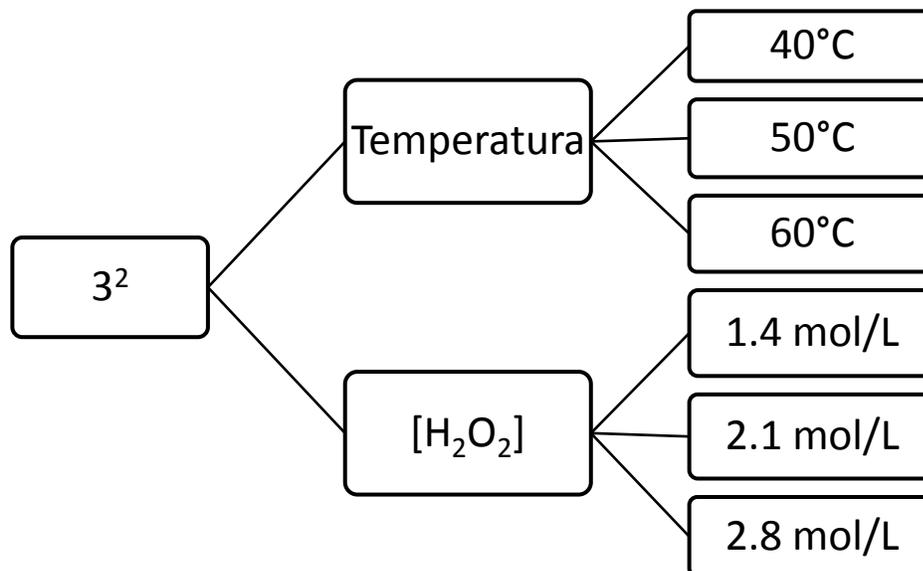
3.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Se consideraron 2 factores temperatura y concentración de peróxido de hidrógeno, cada uno a 3 niveles, basados en el artículo "Extraction and recovery of chromium from electroplating sludge"³⁸, donde los autores realizan un estudio para obtener cromo hexavalente por medio oxidativo, aplicando un diseño de experimentos y obteniendo finalmente el 92% de recuperación de cromo a 60 °C y 1.4 mol/L. Por esta razón se llevó a cabo un diseño de experimentos factorial en base a las condiciones establecidas en dicho artículo, analizando de esta manera todas las posibles combinaciones de los niveles y factores en cada réplica de los ensayos

³⁸ E Silva, Paula Tereza de Souza, et al. Extraction and recovery of chromium from electroplating sludge. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 128, no. 1, p. 41.

simbolizadas con (R), de manera que se podrá determinar el efecto conjunto de estos sobre la variable de respuesta.

Figura 11. Factores y niveles del diseño de experimento



Hipótesis nula (H₀): con la variación de la concentración del peróxido de hidrogeno **no** se evidencia formación de cromo trivalente.

Hipótesis alterna (H_i): con la variación de la concentración del peróxido de hidrogeno se evidencia la formación de cromo trivalente.

Tabla 18. Diseño de experimentos para condiciones de oxidación

Ensayo	Temperatura (°C)	[H ₂ O ₂] mol/L	Cr (VI) (g/L)
1	40	1.4	4.74
2	50	1.4	7.91
3	60	1.4	12.65
4	40	2.1	11.07
5	50	2.1	12.65
6	60	2.1	22.13
7	40	2.8	14.23
8	50	2.8	17.39
9	60	2.8	22.13
1 (R)	40	1.4	4.74
2 (R)	40	2.1	11.07

Tabla 17. (Continuación)

Ensayo	Temperatura (°C)	[H ₂ O ₂] mol/L	Cr (VI) (g/L)
3 (R)	40	2.8	5.81
4 (R)	50	1.4	2.32
5 (R)	50	2.1	4.65
6 (R)	50	2.8	6.39
7 (R)	60	1.4	4.06
8 (R)	60	2.1	8.13
9 (R)	60	2.8	8.13

3.4.1 Análisis de varianza. Se desarrolla un análisis de varianza de 2 factores para la variable de respuesta cromo hexavalente recuperado. Se realizan algunas pruebas para determinar qué factores tienen un efecto estadístico significativo sobre el cromo hexavalente recuperado.

Tabla 19. Análisis de varianza

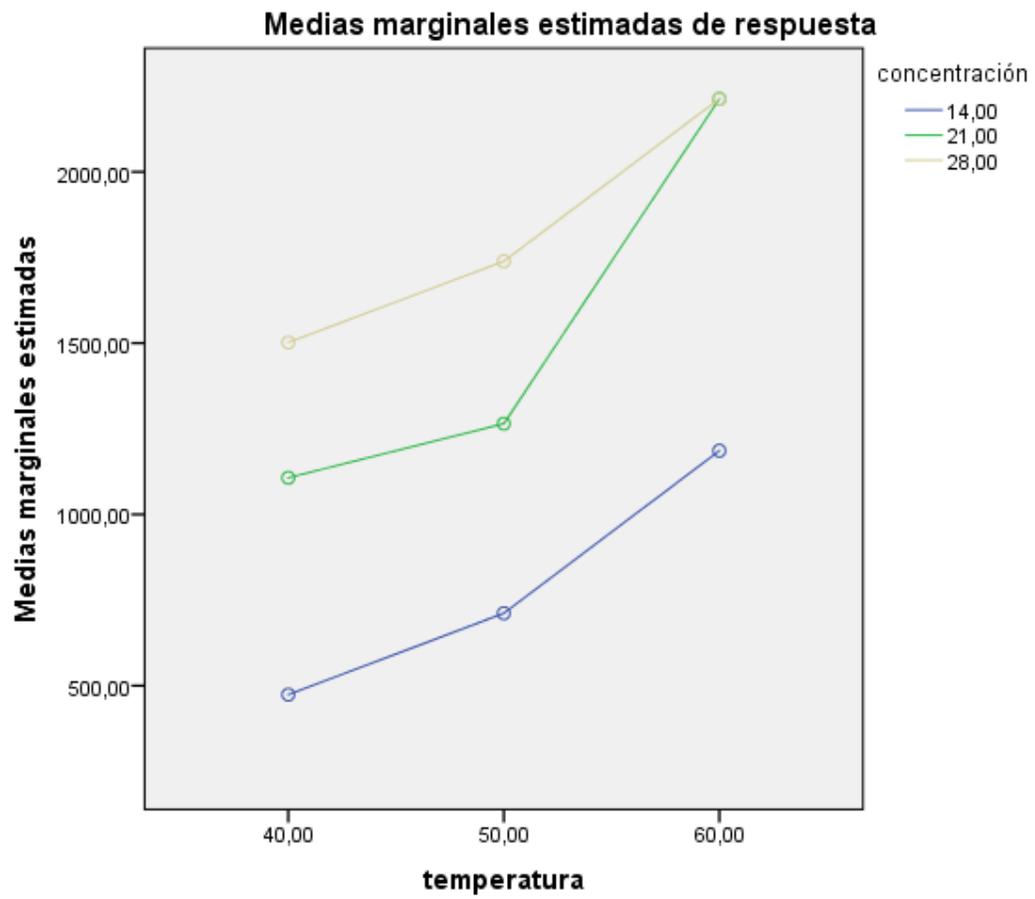
Pruebas de efectos inter-sujetos

Variable dependiente: respuesta

Origen	Tipo III de suma de cuadrados	GI	Media cuadrática	F	Sig.
Modelo corregido	5849302,444 ^a	8	731162,806	174,991	,000
Intersección	34226780,060	1	34226780,060	8191,600	,000
Temperatura	2309468,778	2	1154734,389	276,366	,000
Concentración	3368122,111	2	1684061,056	403,051	,000
temperatura * concentración	171711,556	4	42927,889	10,274	,002
Error	37604,500	9	4178,278		
Total	40113687,000	18			
Total corregido	5886906,944	17			

a. R al cuadrado = ,994 (R al cuadrado ajustada = ,988)

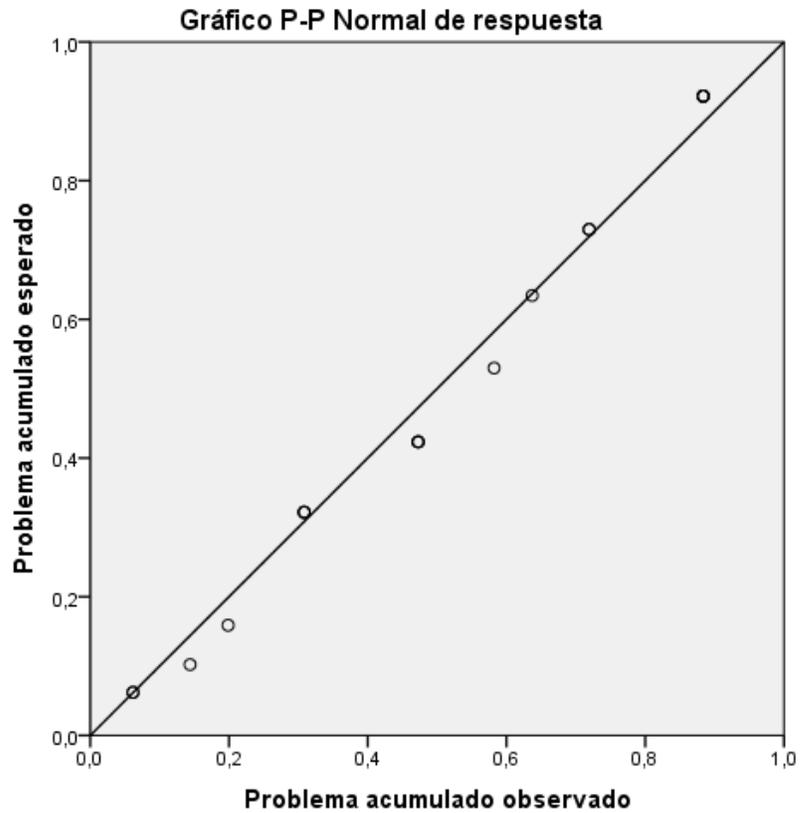
Figura 12. Medidas marginales estimadas de respuesta



De acuerdo al análisis de varianza realizado, se recomienda utilizar una temperatura de 60 °C y una concentración de 2.1 o 2.8 mol/ L de $[H_2O_2]$.

- Prueba de normalidad

Figura 13. Normalidad

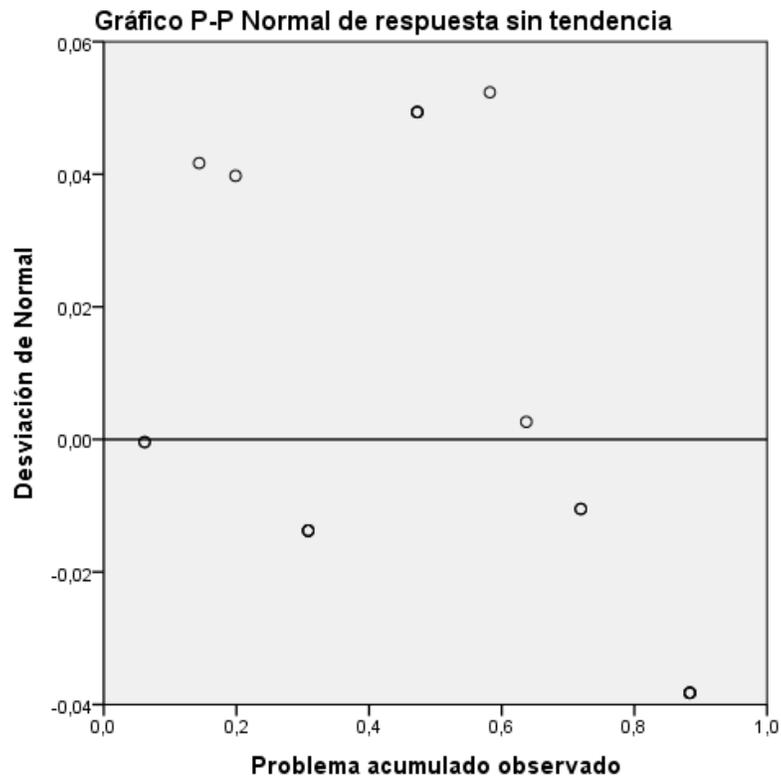


La figura 13 presenta un comportamiento normal

- Prueba de independencia

La figura 14 confirma que los factores son independientes.

Figura 14. Prueba de independencia



- Prueba de homogeneidad de varianzas

Tabla 20. Homogeneidad de varianza

Prueba de igualdad de Levene de varianzas de error^a

Variable dependiente: respuesta

F	df1	df2	Sig.
.	8	9	.

Prueba la hipótesis nula que la varianza de error de la variable dependiente es igual entre grupos.

a. Diseño : Intersección + temperatura + concentración + temperatura * concentración

3.5 PROCEDIMIENTO DE OXIDACIÓN

Para la experimentación se tomó una muestra de 27.2 g de lodo llevada a 272 g/L, puesto que esta es la medida generalmente utilizada en la empresa para hacer control de calidad en el electrolito de cromo a nivel laboratorio, ya que este debe estar entre 250 – 300 g/L para llevar a cabo el proceso.

El volumen equivalente de (H_2O_2) para esta muestra de lodo fueron las siguientes:

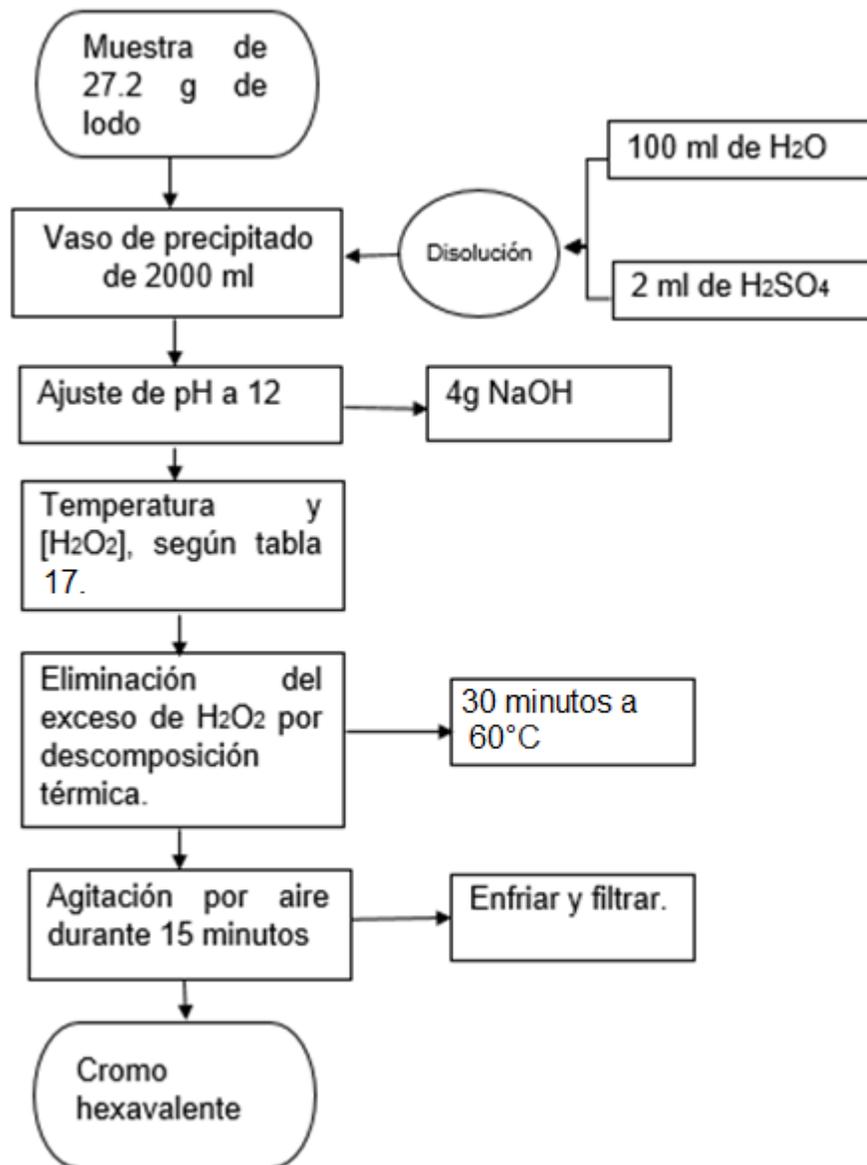
Tabla 21. Volumen de (H_2O_2)

V (H_2O_2) (L)	[H_2O_2] (mol/L)
0.0012	1.4
0.0021	2.1
0.0023	2.8

Una vez suceda la oxidación, es necesario eliminar el exceso de agente oxidante (H_2O_2) adicionado, lo cual se logra por medio de una descomposición térmica en una mufla durante 30 minutos a $60^\circ C$ ³⁹. este procedimiento se puede observar en el diagrama de flujo de la figura 15.

³⁹ I. Bojanowska. Op. cit., p. 119.

Figura 15. Diagrama de flujo proceso de oxidación

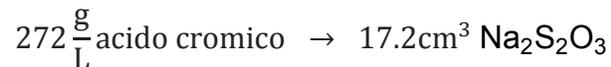


3.5.1 Resultados y análisis. Para determinar el contenido de cromo en la solución se realizó un análisis volumétrico, con el cual se logró establecer la concentración de cromo hexavalente y cromo trivalente una vez oxidada la solución. Para dicho fin se llevó a cabo la titulación para ácido crómico (método alterno) y cromo trivalente descritas en el capítulo 9 del libro “Manual de ingeniería de los recubrimientos

electrolíticos”. La marcha completa para determinar el cromo hexavalente se encuentra en el Anexo C.

En el primer ensayo se utilizó una concentración de peróxido de hidrógeno de 1.4 mol/L en los diferentes niveles de temperatura arrojando una recuperación entre el 4.74 y 12.65 g/L. Para determinar dichas cantidades de cromo recuperado en los diferentes ensayos, es necesario hallar el factor propio de una solución estándar de cromo hexavalente, el cual se establece por medio de un análisis volumétrico utilizando $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1 N como solución titulante y una muestra patrón de 272 g/L de ácido crómico, se lleva a cabo la misma marcha realizada anteriormente en el (Anexo C) para la solución patrón de cromo y se obtuvieron los siguientes resultados.

Lectura de la bureta: $17.2 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$



Por lo tanto para conocer cuánto neutraliza 1 cm^3 de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, se obtiene:

$$\frac{272 \text{ g/L}}{17.2 \text{ cm}^3} = \frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} = \text{Factor estándar de cromo}$$

Es decir que 1 cm^3 de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ neutraliza 15. 81 g/L de Cr.

Los cálculos completos de todos los ensayos se pueden apreciar en el anexo D. A continuación se describirán las pruebas en las cuales se obtuvieron el menor y el mayor porcentaje de cromo recuperado.

Prueba 1

Según la tabla 17, en esta prueba se obtuvo la menor cantidad de cromo oxidado, a una temperatura de $40 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1.4 mol/L de agente oxidante. En la filtración de esta solución se pudo observar que persistía formación de lodo con cromo, como se muestra en la siguiente figura 16.

Figura 16. Filtrado prueba 1



Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Lectura de la bureta: 0.3 cm^3 de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.3 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 4.74 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de CrO}_3$$

Prueba 6

Al filtrar la solución oxidada a las condiciones establecidas según la tabla 17. Esta queda totalmente disuelta sin presencia de lodo como se muestra en la figura 17.

Figura 17. Filtrado prueba 2



Datos obtenidos

Factor estándar: $\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3}$

Lectura de la bureta: 2 cm³ de (Na₂S₂O₃), solución titulante.

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de CrO}_3$$

En términos de proceso por cada kg de lodo procesado se recupera 0.813 kg/L de cromo hexavalente como se ve a continuación.

$$0.0272 \text{ kg de lodo} \rightarrow 0,02213 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \text{ Cr}^{+6}$$

$$1 \text{ kg} \rightarrow \times$$

$$\times = 0.0813 \frac{\text{kg}}{\text{L}} \text{ de Cr}^{+6}$$

En la figura 18 se puede observar una muestra del cromo oxidado obtenido en esta prueba.

Figura 18. Muestra de cromo oxidado



Posteriormente se realizó la titulación con $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0.1 N y utilizando el factor previamente obtenido se logra determinar la presencia de cromo trivalente en esta solución. La marcha consiste en la reoxidación del cromo convirtiendo las posibles partículas persistentes de Cr^{+3} nuevamente en cromo hexavalente (CrO_3), con lo que se determinara el CrO_3 real en la solución. La marcha completa de titulación se puede ver en el anexo E.

Obteniendo los siguientes resultados.

Lectura de la bureta método cromo trivalente: 1.4 cm^3

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de cromo total como CrO}_3$$

Posteriormente se determina la cantidad de cromo trivalente en la solución con el siguiente cálculo

Ecuación 2. Determinación de cromo trivalente

$$\left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de cromo total } \text{CrO}_3\right) - \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de cromo real } \text{CrO}_3\right) = (\text{g de } \text{Cr}^{+3} \text{ en la solución})$$

Fuente. A. Kahahamenneth Graham, H.L.Pinkerton. Manual de ingeniería de los recubrimientos electrolíticos. 1967.

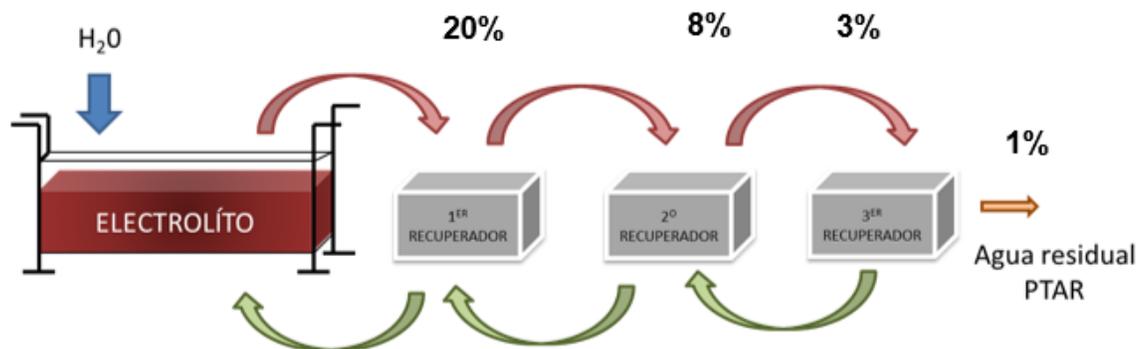
$$(22.13 \text{ g } \text{CrO}_3) - (22.13 \text{ g } \text{CrO}_3) = 0 \text{ g/L de } \text{Cr}^{+3}$$

Lo que quiere decir que el cromo total presente en la solución se ha oxidado y no hay presencia de cromo trivalente.

Con base a la información obtenida anteriormente se logró una recuperación de 22.13 g/L de cromo hexavalente con el ensayo número 6 a $T = 60^\circ\text{C}$ y $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2.1 \text{ mol/L}$, el mismo valor se obtuvo con el ensayo 9 que aunque se ejecutó también a 60°C requirió mayor concentración de peróxido (2.8 mol/L). Lo que indica que se obtendrán valores de recuperación mayores cuando los dos factores de diseño se establecen en los niveles más altos.

El cromo hexavalente que se recupera por medio de oxidación, como se vio anteriormente es tan solo de $0.813 \frac{\text{kg}}{\text{L}}$ por kg de lodo procesado. Esto es debido a las técnicas de producción más limpia ejercidas en Ingecrom Ltda. Puesto que los residuos de cromo que se generan en las 3 etapas de enjuague posteriores al recubrimiento electrolítico van directamente a los respectivos recuperadores el cromo recuperado de los enjuagues es devuelto a la cuba del electrolito como se aprecia en la figura 19, esto con el fin de ajustar los niveles del baño.

Figura 19. Recuperadores de cromo



Fuente. INGECROM LTDA.

Por consiguiente la cantidad de cromo que llega a la PTAR como residuos del proceso electrolítico es mínima, el resto llega por los derrames al piso y la solución

de desplaque. Además de esto de acuerdo a la tabla 8, el lodo contiene en promedio 76% de humedad lo que quiere decir que el peso seco de la muestra es de 6.528 g.

Cantidad de agua:

$$27.2 \text{ g de lodo} \times 76\% \text{ de humedad} = 20.675 \text{ g H}_2\text{O}$$

Lodo seco:

$$27.2 \text{ g de lodo húmedo} - 20.672 \text{ g H}_2\text{O} = 6.528 \text{ g de lodo seco}$$

Cromo en el lodo

$$27.2 \text{ g} \times 8.13 \% = 2.211 \text{ g de CrO}_3 \text{ en el lodo}$$

$$6.528 \text{ g} - 2.211 = 4.317 \text{ g otros productos químicos}$$

La cantidad de “otros productos químicos” presentes en el lodo pueden estar relacionados con compuestos iniciales que se le aplica al agua de proceso, tales como:

- Sulfatos
- Aluminio
- Hierro
- floculante

En este capítulo se realizó una matriz de selección con la cual fue posible determinar la alternativa que cumplía con los criterios establecidos por la empresa, y de esta manera recuperar el cromo que se encuentra contenido en el lodo. Lo anterior fue posible con un método de oxidación química usando como agente oxidante el peróxido de hidrógeno, para lo cual se llevó a cabo un diseño de experimentos con dos factores y tres niveles realizando 9 experimentos con replica de cada uno. Así se determinaron las condiciones de temperatura (60 °C) y concentración de oxidante (2.1 mol/L) a las cuales se puede recuperar la mayor cantidad de cromo hexavalente del lodo, obteniendo como resultado de los ensayos realizados 22.13 g/L de Cr⁺⁶.

4. ELECTRÓLISIS DEL CROMO RECUPERADO

En vista de que los ensayos del presente trabajo son realizados a escala laboratorio y teniendo en cuenta que el objetivo del proceso de electrodeposición es conseguir un depósito que se adhiera bien al sustrato. Se evaluará la apariencia de los recubrimientos con la solución de cromo previamente recuperada, para este propósito se utilizara la celda Hull para comprobar cualitativamente la condición del cromo recuperado, la cual replica el baño de recubrimiento en una escala de laboratorio⁴⁰.

4.1 CARACTERÍSTICAS Y EMPLEO DE LA CELDA HULL

La celda Hull es uno de los métodos prácticos más utilizados para el control de los baños electrolíticos (más conocidos como baños galvánicos)⁴¹. Este método permite observar el comportamiento de una muestra de la solución de cromo que se desea utilizar, mediante cubetas de baja capacidad volumétrica, cuando es sometido a las mismas condiciones de electrolisis que en la cubeta real⁴².

Con dicha celda se pueden prevenir problemas en los recubrimientos electrolíticos, utilizar en el mantenimiento diario, estableciendo parámetros de operación y considerando modificaciones o mejoras de un proceso de recubrimiento⁴³. Esto debido a produce una réplica del depósito electrolítico, “que es obtenido en varias densidades de corriente dentro del rango operativo del sistema en particular, permite a los operadores experimentados determinar múltiples parámetros de proceso que incluyen”⁴⁴:

- Presencia o ausencia de impurezas metálicas y orgánicas.
- Densidad de corriente
- Concentración aproximada de agentes de adición.

La celda electrolítica Hull, tiene forma trapezoidal como se aprecia en la figura 20, lo que permite una distribución progresiva de la densidad de corriente catódica. Comúnmente la celda debe estar construida de materiales dieléctricos como polietileno, vidrio o porcelana, y tiene una capacidad de 267 ml, aunque también se pueden utilizar otras células de hasta 1000 ml de capacidad⁴⁵.

⁴⁰ ALBAN RICO, Iván Ernesto, GARCIA ALVARADO, Evaluación de las condiciones de aplicación de los aditivos para cobre en medio ácido y alcalino con marca Dr. Hesse en la industria marroquinera y eléctrica en el sector metálico a nivel laboratorio. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2016. P. 26.

⁴¹ JULVE SALGADO, Enrique. Control de calidad en la electrodeposición de metales; Cedel ed. 1982. 210 p.

⁴² Ibid., p. 210.

⁴³ RAY DARGIS. The Hull Cell: Key to Better Electroplating - Part I. Nov 11, 2005. Disponible en: <https://www.pfonline.com/articles/the-hull-cell-key-to-better-electroplating-part-i>

⁴⁴ Ibid., Part I.

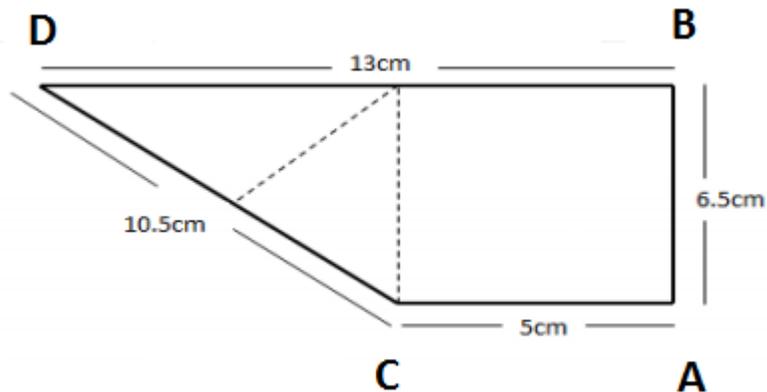
⁴⁵ JULVE SALGADO. Op. cit., p. 210.

Figura 20. Celda electrolítica



De acuerdo a la figura 21, Contra la cara AB de la celda se coloca el polo positivo o ánodo y el cátodo o polo negativo contra la cara CD donde se adquiere mayor cercanía a la zona anódica y por ende más densidad de corriente⁴⁶.

Figura 21. Celda Hull desde la superficie



Fuente. ALBAN RICO, Iván Ernesto, GARCIA ALVARADO, Evaluación de las condiciones de aplicación de los aditivos para cobre en medio ácido y alcalino con marca Dr. Hesse en la industria marroquinera y eléctrica en el sector metálico a nivel laboratorio. Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2016. p. 27. Modificado por el autor.

⁴⁶ Ibid., p. 211.

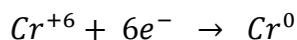
4.2 FORMACIÓN DEL DEPÓSITO POR VÍA ELECTROLÍTICA

Los principales elementos que componen el proceso electroquímico son:

- Solución electrolítica, la cual contiene sales de Cr^{+6} igualmente debe estar presentes radicales ácidos que actúen como catalizador de la reacción de reducción.
- Cátodo (conductor eléctrico), es la pieza que va a ser recubierta
- Ánodo (conductor eléctrico), es insoluble, inerte.
- Celda electrolítica
- Rectificador, fuente de corriente directa.

El recubrimiento se obtiene por la reducción del cromo sobre el cátodo, que se puede observar en la ecuación

Reacción 8. Reducción de Cr^{+6}



4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

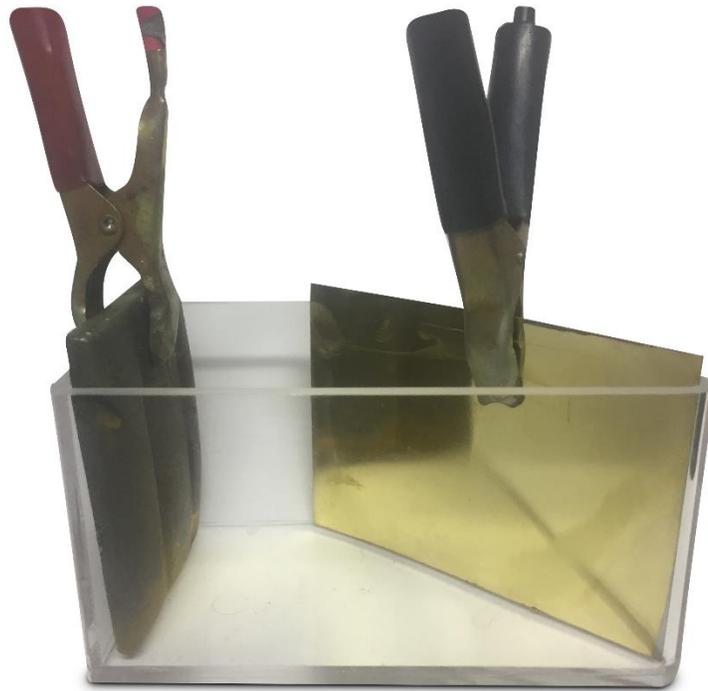
De acuerdo con lo explicado anteriormente, se procederé a realizar la experimentación de celda Hull a nivel laboratorio.

4.3.1 Condiciones de la electrolisis. Las condiciones de electrolisis ejercidas para el control del baño de cromo duro con la celda Hull son las siguientes suministradas por la empresa utilizadas en su proceso convencional.

- Tiempo de electrolisis: 5 minutos
- Intensidad de corriente: 5 A
- Temperatura: 40 °C
- Ánodo: material inerte de plomo 93% – estaño 7%
- Cátodo: lamina de bronce de (10.1 cm x 7.1 cm)

En la figura 22 se puede observar la celda Hull con el respectivo cátodo y ánodo para realizar la electrólisis.

Figura 22. Celda Hull con ánodo y cátodo



Con este ensayo se logra detectar la presencia de posibles contaminantes en el baño de cromo como impurezas metálicas tales como níquel, zinc o cobre, cuando la concentración de estos iones supera los 0.01 g/L, se produce sobre el sustrato zonas atacadas que son detectadas por la disminución del poder de cubrimiento del electrolito. Lo mismo ocurre con la presencia de otro tipo de impurezas como sulfatos o cloruros que pueden estar presentes en el baño electrolítico.

De ahí la importancia del método de la celda Hull posee para el control del baño de cromo duro, ya que permite informar sobre la concentración de sustancias inorgánicas presentes, la velocidad de deposición y las características de este en cualquier rango de temperatura.

Para la electrólisis se recuperaron 300 cm³ de Cr⁺⁶ el cual es sometido a unas marchas de purificación para poder realizar la celda electrolítica.

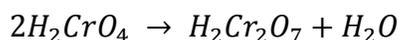
En primera instancia la solución de cromo recuperada es llevada a una temperatura de 60 °C durante 15 minutos agregando 3 g/L de carbón activado, con el objetivo de eliminar la materia orgánica presente, se agita la solución durante 5 minutos para dejar enfriar y seguidamente filtrar.

Posteriormente se lleva la solución a un vaso de precipitados de 500 ml, aquí se hace reaccionar con cátodos falsos en relación 10:1, 10 áreas de ánodo por 1 área

de cátodo, durante una hora en el laboratorio a $5 \frac{A}{dm^2}$, con el objetivo de eliminar la presencia de trazas de metales presentes en la dilución por medio de electrólisis.

El electrólito de cromo hexavalente consta de trióxido de cromo (CrO_3), que al combinarse con agua forma ácido crómico, como se muestra continuación.

Reacción 9. Formación de ácido crómico



Por otro lado para que el cromo pueda ser depositado la solución se adiciona H_2SO_4 en relación de CrO_3 / H_2SO_4 , la cual se debe mantener 100/1, por cada 100 g de cromo se adiciona 1 de ácido sulfúrico, el cual actuara como catalizador de la reacción de reducción. Una relación menor requiere una mayor densidad de corriente y produce un recubrimiento débil.

Con lo anterior la solución de cromo esta lista para realizar el recubrimiento.

4.3.2. Materiales y métodos. Se utilizó una celda electrolítica de polietileno de 267 ml de capacidad adicionando a esa 262 ml solución electrolítica de cromo anteriormente purificado llevando ya el correspondiente ánodo, un rectificador de laboratorio de corriente continua que permite obtener intensidades de corriente entre 0 a 30 amperios (A) y diferencias de potencial de hasta 30 voltios (V).

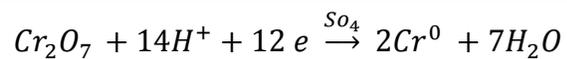
Se coloca a continuación el cátodo en la posición anteriormente indicada y se realizan las conexiones correspondientes, el cátodo estará conectado al terminal negativo mientras que el ánodo al terminal positivo. Finalmente se realiza la electrólisis de la solución, como se muestra en la figura 23.

Figura 23. Electrólisis del cromo



4.3.3 Resultados y análisis. Se obtuvo un depósito de cromo duro en el cátodo, la reacción de deposición que ocurre es la siguiente.

Reacción 10. Deposición de cromo



Al cabo del tiempo determinado para la electrolisis se saca el cátodo, se enjuaga con agua y se seca, en la figura 24 se puede observar el recubrimiento obtenido.

Figura 24. Recubrimiento de cromo duro



Se obtuvo un depósito de cromo duro uniforme con buenas condiciones sin interferencia de cromo trivalente como también se demostró en los análisis fisicoquímicos. Con la celda Hull se puede determinar por qué la presencia de Cr^{+3} forma depósitos negros pulverulentos en las zonas de alta densidad, además de esto no se deposita como cromo metálico.

Por el contrario se puede observar en la parte inferior izquierda de la película depositada que presenta pequeñas sombras lo cual indica que persisten impurezas en el electrolito las cuales pueden ser de origen orgánico o inorgánico.

Una vez realizada la celda es necesario determinar la densidad de corriente medida a la que trabaja el electrolito para aplicarla a la cuba electrolítica real. La densidad de corriente medida de trabajo es la relación existente entre la intensidad de corriente en amperios (A) que circula por el electrolito y la superficie en (dm^2) del cátodo⁴⁷. Esta se puede determinar por medio de la tabla 21, por la cual se determina la densidad de corriente en A/dm^2 de acuerdo a los amperios aplicados y la posición del cátodo de la celda Hull.

⁴⁷ JULVE SALGADO, Enrique. Op. cit., p. 230.

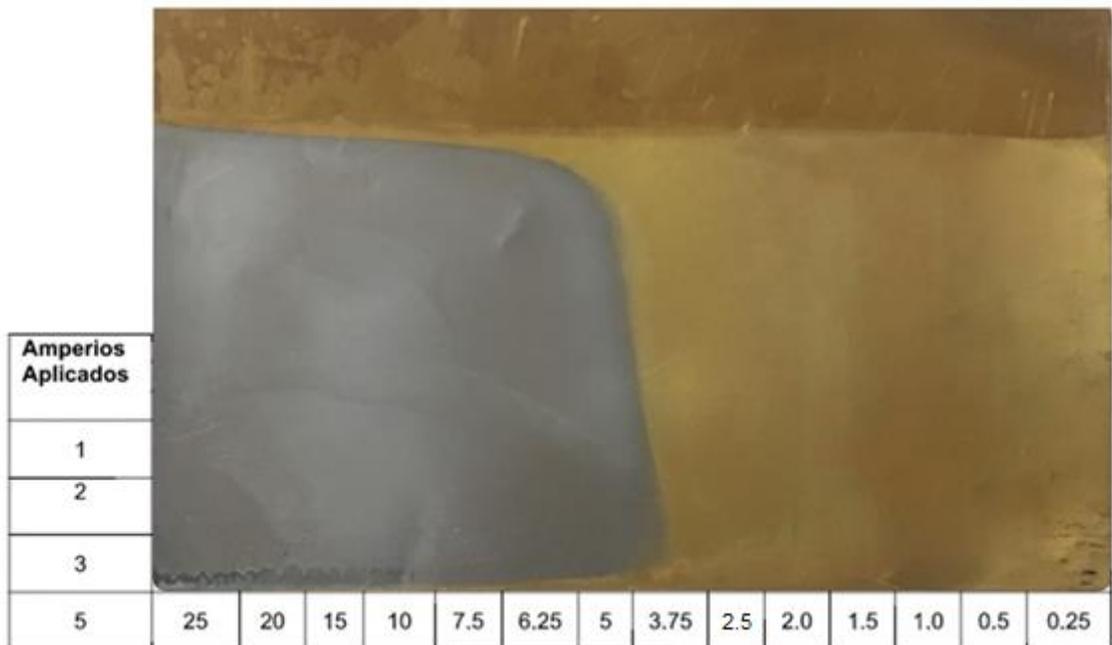
Tabla 22. Densidad de corriente

Amperios Aplicados	Densidad A/dm ²													
	Posición cátodo de la celda Hull													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	5	4	3	2	1.5	1.25	1	0.75	0.5	0.4	0.3	0.3	0.1	0.05
2	10	8	6	4	3	2.5	2	1.5	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0.1
3	15	12	9	6	4.5	3.75	3	2.25	1.5	1.2	0.9	0.6	0.3	0.15
5	25	20	15	10	7.5	6.25	5	3.75	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.25

Fuente. INGECROM LTDA.

A continuación se realizará la lectura de la densidad de corriente del recubrimiento obtenido. Para lo cual se ubica el cátodo en los amperios aplicados durante la electrólisis, en este caso en 5 A. seguidamente se realiza una medida del recubrimiento obtenido desde la casilla A como se puede muestra a continuación en la figura 25, con lo cual se logra fácilmente la lectura de la densidad de corriente.

Figura 25. Densidad de corriente del recubrimiento



De acuerdo a la figura 25 se puede explicar que el rango de operación del depósito está entre 25 y $5 \frac{A}{dm^2}$, lo que quiere decir que a esta densidad de corriente se obtiene un buen depósito de cromo ya que esta brillante y con un amplio rango de densidad

de corriente. Mientras que entre 5 y $3.75 \frac{A}{dm^2}$ el cromo no queda totalmente depositado.

El porcentaje máximo de deposición de cromo duro en una celda electrolítica es el 75% llegando a una densidad de corriente de $2.5 \frac{A}{dm^2}$, lo que quiere decir que el depósito obtenido con el cromo recuperado está en el rango ideal por lo tanto es posible y apto para ser reutilizado en el proceso de cromo duro.

5. EVALUACIÓN FINANCIERA

En este capítulo se analiza la evaluación financiera de la viabilidad del proceso de recuperación de ácido crómico del lodo proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ingecrom Ltda., por la propia empresa estimando la inversión inicial, los costos que genera el tratamiento de estos lodos y evaluando el proyecto con el valor presente (VP), que generan los egresos necesarios que se incurrirían en el proyecto.

Se realizará una proyección a 5 años con el fin de saber la viabilidad del proyecto teniendo en cuenta los valores del índice de precios al consumidor (IPC).

Aunque este proyecto representa un beneficio ambiental al disminuir la contaminación que produce el lodo originalmente en el medio ambiente y que no puede ser evaluado respecto a un valor monetario, el objetivo del mismo implica el conocimiento comparativo de los costos actuales frente a una inversión necesaria para que la empresa realice internamente esta labor.

5.1 INVERSIÓN TOTAL

Para determinar la inversión total es necesario conocer la inversión fija del proyecto y los costos de operación.

5.1.1 inversión fija. La inversión fija considera todos los bienes tangibles que se definan para poder realizar el proceso productivo⁴⁸.

5.1.1.1 Inversión de equipos. Esta inversión se refiere a los equipos utilizados en los procesos de disolución del lodo y oxidación, lo cual se puede apreciar en la Tabla 22. La cotización de los equipos y accesorios fue suministrada por diferentes firmas comerciales las cuales se encuentran en el (Anexo F).

⁴⁸ SANTO DOMINGO, R. D. Anexo Técnico VII. 1 Subproyecto Agroindustria. p. 22.

Tabla 23. Costo de equipos

EQUIPO	CANTIDAD	VALOR (\$)
Tanque eternit 1000 L	1	320.000
Tubería de ¾ in cpvc	6m	20.000
Resistencia 220 V	1	422.000
Tanque de fibra de vidrio con agitador (1 m ³)	1	4.900.000
Tanque en fibra de vidrio con filtro (1 m ³)	1	4.650.000
Bomba centrifuga 1Hp	2	730.000
Válvulas de bola	4	250.000
Total inversión equipos		11.292.000

Fuente. Firmas comerciales.

5.1.1.2 Inversión de instalación. La instalación y el montaje de los equipos equivalen al 15% del valor de los equipos.

$$\$11.292.000 \times 15\% = \$1.694.000$$

5.1.1.3 Costo total inversión fija. Estos costos están representados por la suma de los costos de inversión en equipos e instalación de los mismos.

Tabla 24. Costo total inversión fija (cifras en \$)

INVERSIÓN	VALOR TOTAL
Equipos	11.292.000
Instalación	1.694.000
Total inversión	12.986.000

5.1.2 Costos de operación. Los costos de operación incluyen la materia prima, energía eléctrica y mano de obra.

5.1.2.1 Materia prima. Se evaluaron los costos del ácido sulfúrico, hidróxido de sodio y peróxido de hidrógeno, para tratar 125 kg en un mes de trabajo, tomando como base un promedio de 1.5 ton de lodo generado anual. En el anexo G se puede ver los costos de materia prima.

Tabla 25. Costos de materia prima

MP	CANTIDAD ANUAL	COSTO	COSTO ANUAL (\$)
NaOH	232.94, Kg	240 Kg	804.000
H ₂ SO ₄	3.50 L	4 L	116.000
H ₂ O ₂	1.08 L	1 L	50.000
TOTAL			970.000

Fuente. Firmas comerciales.

5.1.2.2 Servicios públicos

- **Energía.** El consumo energético se conoce de acuerdo a las fichas técnicas de cada equipo, teniendo en cuenta que el valor del kW-h en Bogotá es de \$441.98.

Tabla 26. Costos de energía eléctrica

EQUIPO	CONSUMO MENSUAL	COSTO (\$/Kw-h)	COSTO ANUAL (\$)
Resistencia	5.43 kW-h	\$441.98	28.799
Agitadores	14.32 kW-h	\$441.98	75.949
TOTAL			104.748

Consumo resistencias

Al mes consume 5.43 kW-h es decir que habría un consumo de $65.16 \frac{\text{kW-h}}{\text{año}}$

Por ende el gasto energético anual sería de:

$$65.16 \frac{\text{kW-h}}{\text{año}} \times \$441.98 = \$28.799$$

Para efectos del presente proyecto se tendrá como consumo de energía anual de la resistencia la suma de \$29.000 presupuestados para el primer año.

Consumo agitadores

P = 0.3 hp

Se utilizarán dos agitadores con la misma potencia, los cuales representan un consumo de $171.84 \frac{\text{kW-h}}{\text{año}}$

Gasto energético anual de los agitadores

$$171.84 \frac{\text{kW-h}}{\text{año}} \times \$441.98 = \$75.949$$

Para efectos del presente proyecto se tendrá como consumo de energía anual de los agitadores la suma de \$76.000 presupuestados para el primer año.

5.1.2.3 Costo total de operación. Los costos de inversión total por operación están representados por la suma de los costos de materia prima y consumo energético como se ve en la tabla 26.

Tabla 27. Costo total de operación

ITEM	COSTO ANUAL (\$)
Materia prima	970.000
Energía eléctrica	105.000
TOTAL	1.075.000

De acuerdo a lo anterior, los costos totales del proyecto, de recuperación de cromo a partir de lodo residual por parte de la compañía, serían como se ven en la tabla 27.

Tabla 28. Costo total del proyecto

COSTO	VALOR ANUAL (\$)
Costos totales de inversión fija	12.986.000
Costos totales de operación	1.075.000
Costo total del proyecto	14.061.000

5.2 COSTOS DISPOSICIÓN DE LODO

En la disposición del residuo solido se generan costos asociados al tratamiento que la empresa Biolodos S.A.E.S.P, le da a estos, teniendo en cuenta la producción anual de lodo en el año 2016 de 1.580 Kg de lodo. El tratamiento de estos residuos tiene un costo de \$1.275.000, de acuerdo a la remisión expedida por Biolodos S.A.EPS que se puede observar en el anexo H, en el cual se tienen en cuenta los siguientes ítems como se muestra en la tabla 28.

Tabla 29. Costos y servicios (cifras en \$)

Tipo de residuo o servicio	Cantidad Embalaje	Valor unitario	Valor Total
Lodos galvánicos	50 lonas	590	932.200
Solidos contaminados	50 lonas	1.200	32.400
Tratamiento de plásticos	4 lonas	550	70.400
Transporte	1	240.000	240.000
	Total		1.275.000

Fuente. Remisión, Biolodos S.A.ESP

5.3 EVALUACION DEL PROYECTO

Se pretende determinar la viabilidad del proyecto a futuro, por tal razón se realizara una proyección a cinco años utilizando el indicador financiero de VP (Valor presente), y teniendo en cuenta los valores del índice de precios al consumidor (IPC)⁴⁹ que se muestran a continuación.

Tabla 30. Valores índice de precios al consumidor

AÑOS	2017	2018	2019	2020	2021
IPC	4.05%	3.50%	3.60%	3.40%	3.20%

Fuente. Bancolombia. Tabla macroeconómica proyectada. Disponible en: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/investigaciones-economicas/publicaciones/tablas-macroeconomicos-proyectados>

5.3.1 valor presente (VP). Se define como la suma del valor presente de cada año proyectado teniendo en cuenta la tasa interna de oportunidad (TIO) que Ingegrom Ltda., maneja, la cual es de 13%. La proyección se determina mediante la siguiente ecuación.

⁴⁹ Bancolombia. Tabla macroeconómica proyectada. Disponible en: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/investigaciones-economicas/publicaciones/tablas-macroeconomicos-proyectados>

Ecuación 3. Valor presente (VP)

$$VP = -inversion + \frac{Vf_1}{(1+i)^1} + \frac{Vf_2}{(1+i)^2} + \frac{Vf_3}{(1+i)^3} + \frac{Vf_4}{(1+i)^4} + \frac{Vf_5}{(1+i)^5}$$

Fuente. Clase ingeniería financiera, Fundación Universidad de América, Luis Gonzales.

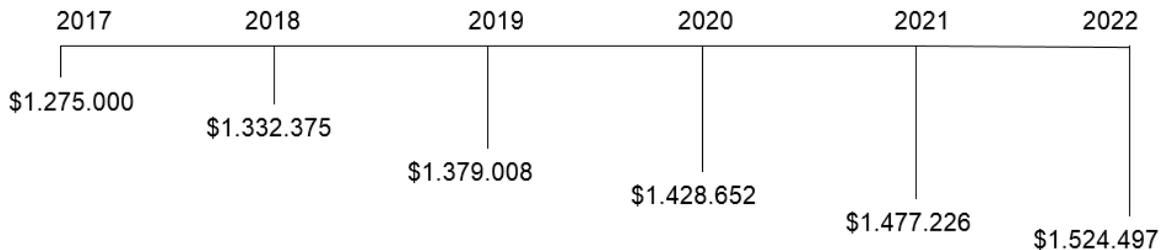
Donde:

i = Es la tasa interna de oportunidad (TIO)

Vf = valor proyectado en cada año

- **Egresos actuales.** Hace referencia a los costos anuales generados para el tratamiento del lodo a cargo de la empresa recolectora Biolodos S.A.E.S.P. el monto asciende a **\$1.275.000** para el año 2016.

Figura 26. Proyección de egresos a 5 años



$$VP = \frac{\$1.275.000}{(1+0.13)^0} + \frac{\$1.332.375}{(1+0.13)^1} + \frac{\$1.379.008}{(1+0.13)^2} + \frac{\$1.428.652}{(1+0.13)^3} + \frac{\$1.477.226}{(1+0.13)^4} + \frac{1.524.497}{(1+0.13)^5}$$

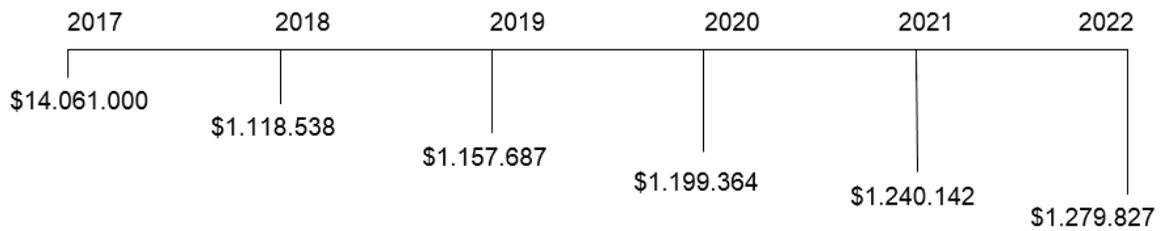
$$VP = \$1.275.000 + \$1.179.093 + \$1.079.965 + \$990.127 + \$906.010 + \$827.435$$

$$VP = \$6.257.630$$

De continuar Ingecrom Ltda., con el contrato de Biolodos S.A.E.S.P para que retire anualmente los residuos durante los próximos cinco años se estarían cancelando a valor presente la suma de \$6.257.630

- **Inversión del proyecto.** El costo evaluado para la inversión inicial en equipos, instalación materia prima y consumo eléctrico es de: **\$14.061.000**. Para esto se debe tener en cuenta el valor total de inversión fija referente a costo de equipos e instalación de los mismos más los costos de operación en el primer año; para los siguientes años, solo se tiene en cuenta el costo de operación **\$1.075.000** referente a materia prima y consumo eléctrico, afectado por el IPC del año anterior, como se ve a continuación en la figura 27.

Figura 27. Proyección a cinco años



$$VP = -\$14.061.000 + \frac{\$1.118.538}{(1 + 0.13)^1} + \frac{\$1.157.687}{(1 + 0.13)^2} + \frac{\$1.199.364}{(1 + 0.13)^3} + \frac{\$1.240.142}{(1 + 0.13)^4} + \frac{\$1.279.827}{(1 + 0.13)^5}$$

$$VP = -\$14.061.000 + \$989.856 + \$906.639 + \$831.219 + \$760.602 + \$694.639$$

$$VP = \$ - 9.878.045$$

Debido a que el valor presente (VP) del proyecto es negativo, el proyecto no es viable, lo que quiere decir que no justifica su implantación en la empresa, puesto que los costos de inversión son muy alto y al cabo 5 años no se lograra recuperar la inversión realizada para el desarrollo del proyecto.

5.3.2 Costo anual uniforme equivalente. A continuación se determinara el costo anual equivalente (CAUE), para los siguientes cinco años, del valor presente de los egresos actuales que tiene la empresa, manteniendo el contrato con Biolodos S.A.S.E.S.P, de acuerdo a la ecuación 4. El costo anual equivalente del proyecto no se realiza debido a que el valor presente obtenido es negativo, por tal razón se descarta su realización.

Ecuación 4. Costo anual uniforme equivalente
CAUE

$$CAUE = VP \left(\frac{(1+i)^n \times i}{(1+i)^n - 1} \right)$$

Fuente. Clase ingeniería financiera, Fundación
Universidad de América, Luis Gonzales.

Donde:

VP = valor presente

i = Tasa interna de oportunidad (TIO)

n = periodo

$$CAUE(\text{egresos actuales}) = \$6.257.630 \left(\frac{(1+0.13)^5 \times 0.13}{(1+0.13)^5 - 1} \right)$$

$$CAUE(\text{egresos actuales}) = \$1.779.135$$

Por lo anterior Ingecrom Ltda., tendría que asumir por la disposición y tratamiento del lodo, por los siguientes cinco años, el costo de anualidad uniforme equivalente de \$1.784.399.

6. CONCLUSIONES

- Se llevó a cabo el diagnóstico de la planta de tratamiento de aguas residuales de Ingecrom Ltda., en el cual se logró identificar que se generan en promedio 36 kg de lodo húmedo por cada 1000 L de agua residual que entra a la planta para su tratamiento. De igual manera se dio a conocer el manejo y disposición que se le da a los lodos y la producción anual de este residuo sólido en la empresa.
- Teniendo en cuenta el diagnóstico realizado, se establecen y se determinan las alternativas de tratamiento adecuadas para recuperar el cromo que se encuentra contenido en el lodo residual, mediante una matriz de selección donde se evaluaron aspectos claves para su realización, concediendo un porcentaje de acuerdo a su importancia según los criterios y necesidades de la empresa, entre los que se consideran eficiencia de recuperación (40%), costos de operación (30%), disponibilidad de equipos (10%), facilidad de operación (10%), tiempo de operación (10%)
- Para realizar la recuperación de cromo se realizó un diseño de experimentos factorial teniendo en cuenta dos factores, la temperatura y la concentración de agente oxidante cada uno a tres niveles diferentes, realizando 9 ensayos con su respectiva replica. En los ensayos 6 con condiciones de $T = 60^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2.1 \text{ mol/L}$ y el ensayo 9 con condiciones de $T = 60^{\circ}\text{C}$, $[\text{H}_2\text{O}_2] = 2.8 \text{ mol/L}$ se obtuvo la misma cantidad de cromo hexavalente recuperado y la más alta, de los cuales se eligió el ensayo 6, debido a que se utiliza menor concentración de agente oxidante, logrando finalmente un resultado de 22.13 g/L de CrO_3 de cromo en la muestra.
- Se realizó una electrólisis por celda Hull, obteniendo un recubrimiento de cromo duro, en el cual se determinó que en el electrolito persisten impurezas las cuales pueden ser de origen orgánico e inorgánico, de la misma manera por medio del análisis cualitativo del recubrimiento se estableció que el cromo recuperado del lodo residual es apto para reincorporarlo en el proceso de cromo duro.
- El proyecto requiere una inversión inicial de \$18.431.000, con una proyección a 5 años se obtuvo un valor presente neto de \$-9.878.045, lo que demuestra que el proyecto de recuperación de cromo presente en el lodo residual no es viable, puesto que la inversión necesaria para su realización no se recuperara a lo largo del tiempo establecido. Por ende se halló el costo anual equivalente de los egresos actuales de la empresa dando como resultado \$1.779.135, es decir que este sería costo anual que Ingecrom Ltda. deberá asumir para que la empresa recolectora realice el tratamiento de los lodos.

7. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una caracterización del lodo generado en la planta de tratamiento de aguas.
- La implementación de un método por el cual se logre eliminar la humedad del lodo residual, con el cual se obtendría menor cantidad de lodo por ende disminuirán los costos asociados al tratamiento de estos a cargo de la empresa recolectora.
- Se recomienda separar las aguas provenientes del proceso de desplaque, no mezclarlas en la PTAR con los otros efluentes residuales, con el fin de realizar el tratamiento de recuperación de cromo directamente a etas, ya que son las que contienen el mayor porcentaje de cromo.
- En lo posible cuantificar las cantidades del cromo recuperado durante los procesos de enjuague, para corroborar los resultados de la recuperación.

BIBLIOGRAFÍA

A. Kahahamenneth Graham y H.L.Pinkerton. Manual de ingeniería de los recubrimientos electrolíticos. 1967.

ALBAN RICO and GARCÍA ALVARADO. Evaluación de las condiciones de aplicación de los aditivos para cobre en medio ácido y alcalino con marca dr. hesse en la industria marroquinera y eléctrica en el sector metálico a nivel laboratorio; Barcelona:

ARUNDEL John. Tratamientos de aguas negras y efluentes industriales & nbsp; Acibia S.A, 2002. 80 p.

ASTM International. 2013a. ISBN 9781606506189

Bancolombia. Tabla macroeconómica proyectada. Disponible en: <https://www.grupobancolombia.com/wps/portal/empresas/capital-inteligente/investigaciones-economicas/publicaciones/tablas-macroeconomicos-proyectados>

CABILDO MIRANDA, M^a del Pilar, *et al.* Reciclado y tratamiento de residuos. ES: UNED, 2010. ISBN 9788436260069

CEMINO, Fernando E.; BIANCHI, Benjamín E. and ANDRADA, Hugo L. Cromado electrolítico. El Cid Editor, 2007.

E SILVA, Paula Teresa de Souza, *et al.* Extraction and recovery of chromium from electroplating sludge. En: JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS. vol. 128, no. 1, p. 39.

Electrochemistry, Juan M. Feliu Martinez, Victor Climent ed. Encyclopedia of life support systems Eloss, 2009. 358 p.

ELIAS CASTELLS, Xavier. Reciclaje y Tratamiento de Residuos Diversos. Madrid, ES: Ediciones Díaz de Santos, 2012.

Estudio de potenciales impactos ambientales y vulnerabilidades. 2013b. 363-366 p.

FISHCER, G. Recuperación de metales en los procesos electrolíticos. Cedel ed. Barcelona: Viladrau, 1982. 20 p.

FORIGUA MEDINA, María Margarita. Desarrollo de una propuesta de mejoramiento para el tratamiento de aguas residuales de la planta de nitrato de amonio en fertilizantes colombianos ferticol s.a. Fundación universidad de América ed. 2016.

FUNDES Colombia. Guía de buenas prácticas para el sector galvanotecnia. Julio 28,.p. 5

GUILLESPIE, Ronald J. Chemistry. Reverté S.A., 1990. 791 p.

Harold Frederic Walton. Análisis químico e instrumental moderno. Reverté, 1978. 90 p.

I. BOJANOWSKA. Recovery of Chromium from Sludge Formed after Neutralisation of Chromic Wastewater. En: polish journal of environmental studies. p. 118

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C: El instituto, 2008. 33 p

_____. Documentación Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486. Bogotá D.C.: El instituto, 2008. 36 p. 2008.

_____. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: El instituto, 1998.23p.

Juan M. Feliu -Martinez and Victor Climent Paya. Electrochemistry. 2009.

JULVE SALGADO, Enrique. Control de calidad en la electrodeposición de metales; Cedel ed. 1982. 210 p.

KRUGMAN, Pul y WELLS, Robin. Introducción a la economía: microeconomía. Reverté S.A., 2006. 176

MASSUET GRAU, Vicente. Cromado duro. José Montesó ed. 122 p.

MASSUET, Vicente. Cromado duro. José Montesó ed. 1957. 11 p.

Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial República de Colombia. Gestión integral de residuos o desechos peligrosos. Bogotá D.C: 2007. 11 p.

MINISTERIO DE AMBIENTO Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 631 de 2015. Abril 18. [Consultado el Agosto ,2017]. Disponible en: http://servicios.minminas.gov.co/compilacionnormativa/docs/resolucion_minambienteds_0631_2015.htm

MUÑOZ RAMÍREZ, César Arnoldo y VARGAS RODRÍGUEZ, Nelson Leonardo. Recuperación de cromo residual en una planta electrolítica de cromo duro (Mecrotec Ltda.). Bogotá D.C: Fundación Universidad de América, 2001. 5 p.

ORTIZ P, Nidia Elena. Recuperación y reutilización de cromo de las aguas residuales de curtiembres de San Benito, Bogotá. En: INTEKHNIA. Dic 13, .p. 147

RAY DARGIS. The Hull Cell: Key to Better Electroplating - Part I. Nov 11,. Disponible en: <https://www.pfonline.com/articles/the-hull-cell-key-to-better-electroplating-part-i>

Recubrimiento o revestimiento de cromo electrodepositado. 1974. 3

SAE INTERNATIONAL. AMS2460. 1967.

- SANTO DOMINGO, R. D. Anexo Técnico VII. 1 Subproyecto Agroindustria. 22
- SOGORB SANCHEZ, Miguel Angel y VILANOVA GISBERT, Eugenio. Técnicas analíticas de contaminantes químicos. Dias Santos S.A. ed. 2004. 45-47 p.
- STRUKUL, Giorgio. catalitic oxidations with hidrogen peroxide. Kluwer Academic Publishers, 1992. 35 p.
- STRUKUL, Giorgio (Hrsg). Catalytic oxidations with hydrogen peroxide as oxidant. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992. 338 p.
- VELANDIA M, Denisse Andrea y PINEDA R, Mario Alexander. Estudio de factibilidad técnico-financiero para el tratamiento, disposición y recuperación de lodos ricos en cromo, cobre y bentonita de calcio. Fundación Universidad de América, 2003. p. 89.
- VIAN ORTUÑO, Ángel. Introducción a la química industrial (2a. ed.). Barcelona: Editorial Reverté, 2012. 457 p.
- WALTER J. WEBBER, JR. Control de la calidad del agua procesos fisicoquímicos. Reverté S.A., 466 p.
- Xavier y Elias Castells. Reciclaje de residuos industriales. ES: Díaz De Santos M.U.A, 2012. 148 p.

ANEXOS

ANEXO A INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

L. Q.
 LABORATORIO QUIMICONTROL LTDA.
Ambiente e Industria

INFORME 8 OCA 553-AG
25 de julio de 2017

IDENTIFICACIÓN DEL CLIENTE

Ingeniera
Diana Pilar Muñoz Ramirez
CROMO DURO PARA INGENIERÍA Ltda.-INGECROM Ltda.
Teléfono: 277 72 22
e-mail: ingecrom@ingecrom.com
Bogotá

INFORME DE RESULTADOS DE LABORATORIO

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA

ORDEN DE SERVICIO: 2438
FECHA RECEPCIÓN MUESTRA: 12 de junio de 2017
MATRIZ: RND
FECHA DE MUESTREO: 12 de junio de 2017
TIPO DE MUESTREO: Compuesto (8 horas M# 1340)
PUNTO DE MUESTREO: Vertimiento final
IDENTIFICACIÓN MUESTRA: 17-AG2631
OBSERVACIONES: Muestra tomada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.



IDEAM
INSTITUTO DE HIDROLOGÍA,
METEOROLOGÍA Y
ESTUDIOS AMBIENTALES
Laboratorio acreditado
NIT-950/001-17029
2005. Resolución de
reconocimiento y extensión
de acreditación N° 0459
de 2015. Resolución de la
entidad de la
acreditación N° 0099 de
2016 y 0010 de 2017

Variable	Unidad	Método	Fecha Análisis	Resultados	Incertidumbre	Res 631:2015
Cobre total, Cu	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2017-06-15	0,067	±0,001	1 Cumple
Cromo total, Cr	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2017-06-14	0,017	±0,001	0.5 Cumple
Hierro total, Fe	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2017-06-15	0,113	±0,002	3 Cumple
Níquel total, Ni	mg/L	SM 3030 H, 3111 D, A.A. Llama	2017-06-14	0,087	±0,01	0.5 Cumple
Plata total, Ag	mg/L	SM 3030 H, 3111 B, A.A. Llama	2017-06-20	< 0,005	±0	0,2 Cumple

SM: "STANDARD METHODS For The Examination Of Water And Wastewater" 22ND EDITION, 2012. (A.A.): Absorción Atómica. (*): Variable subcontratada. (**): Variable que no se encuentra acreditada. (<): Menor que límite de cuantificación del método. N.D.: No disponible. A y R: Análisis y reporte. (ARND): Agua residual no doméstica. Entidad emisora de la norma: Resolución 631 de 2015 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Capítulo VI, Artículo 13, Actividad 8.21: Tratamiento y revestimiento de metales., con factor multiplicador por vertimiento al alcantarillado público.

NOTA 1: Los resultados que se relacionan en este informe corresponden únicamente a la muestra analizada.

NOTA 2: La reproducción parcial de este informe será autorizada por el Laboratorio Quimicontrol Ltda.

NOTA 3: Las muestras serán eliminadas treinta (30) días después de la entrega de los resultados impresos. Las muestras subcontratadas son desechadas de acuerdo a los lineamientos establecidos por el laboratorio externo.

NOTA 4: Incertidumbre expandida para un nivel de confianza del 95,45 % con un factor K=2.

Este informe NO es válido para impresión ni almacenamiento sin firma original de las personas autorizadas por el Laboratorio.


CONSTANZA NIZUL OCAMPO
Química - Matricula profesional P0 412
Especialista en Consultoría Ambiental

Elaboró: Ingrid Johana Beltrán Castro
Revisó: Carlos Steven Moreno Giron

ANEXO B CERTIFICACIÓN TRATAMIENTO DE LODOS GALVÁNICOS.



CERTIFICACIÓN No. - 10,669 2
TRATAMIENTO DE LODOS GALVANICOS
Según Resolución de la CAR No. 1559 del 31 de Mayo de 2006.

BIOLODOS S.A. E.S.P certifica que en el Parque Ambiental ubicado en la Vereda Balsillas del municipio de Mosquera, bajo la supervisión del Director del Departamento Técnico, y con la presencia del Jefe de Planta, se procedió a realizar el proceso de Tratamiento de LODOS GALVANICOS y fueron generados por la Empresa:

CROMO DURO PARA INGENIERIA LTDA INGENCROM LTDA
830,088,289
AV CLL 6 N 32 A - 10

Según formato de recepción de residuos la trazabilidad en la cadena de custodia es la siguiente:

Remisión	Corriente Residuo	Tipo de Residuo	Cantidad (kg)	Fecha de Tratamiento
14880	A-1050	LODOS GALVANICOS	1,580.00	30/11/2016

El servicio de TRATAMIENTO LODOS GALVANICOS fue tratado por el Método Biológico de Láminas Filtrantes, proceso que garantiza un adecuado tratamiento de residuos mencionados cumpliendo con la normatividad vigente ambiental y de acuerdo con la resolución de la CAR No. 1559 del 31 de mayo del 2006.

En constancia se firma, en la ciudad de Bogotá D.C, 02 de DICIEMBRE de 2016.

Atentamente,

I.Q. CARLOS ALBERTO LOZANO A.
Jefe Planta P.A.M.

DOUGLAS A. ROCHA CASTRO
Jefe Departamento De Logística



TRATAMIENTO DE LODOS CON SISTEMAS BIOLÓGICOS "LÁMINAS FILTRANTES" - ADEBORA S.A. INGENIERIA AMBIENTAL

Oficina Fusagasugá: Kilómetro 61 Vía Bogotá-Guardia Sector La Vereda • Teléfonos: 871 89 97 - 871 89 98

Parque Ambiental Biólodos Fusagasugá.

Oficina Comercial y Logística: Av. Froncal de Occidente No. 1 - 59 Este Lote 204 3 Bod. 10

Portal Centro Logístico Empresarial Mosquera

Tel: 829 8677 - 829 8678

Parque Ambiental Biólodos Mosquera (Parque Ambiental)

www.bioldos.com • bioldos@ecoskandia.com • www.ecoskandia.com • Colombia - Suramérica

ANEXO C.
MARCHAS DE TITULACIÓN CROMO HEXAVALENTE

Ácido crómico (método alterno)

1. Medir con la pipeta 10 ml de la solución y ponerla en un frasco volumétrico de 500 ml, diluir hasta la marca con agua destilada y mezclar completamente.
2. Tomar con la pipeta 10 ml de la solución preparada en el paso (1) y ponerlos dentro de un frasco de Erlenmeyer de 250 ml.
3. Añadir 100 ml de agua destilada.
4. Añadir aproximadamente 2 g de bifloruro de amonio (NH_4HF_2).
5. Añadir 15 ml de ácido clorhídrico concentrado (HCl).
6. Añadir 10 ml de yoduro de potasio (KI) al 10%.
7. Llenar la bureta con 50 ml de solución estándar de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) y valorar hasta que el color café oscuro comience a desvanecer.
8. Añadir 5 ml de solución indicadora de almidón al 1% y continuar valorando, o hasta que el color azul desaparezca por un minuto.
9. Leer la bureta. Este valor multiplicado por el factor propio de la solución estándar de cromo, da los gramos de ácido crómico por litro de solución del baño galvánico.

ANEXO D
CALCULOS DE EXPERIMENTACIÓN

- Ensayo 1: T= 40°C, [H₂O₂]= 1.4
0.3 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.3 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 4.74 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de CrO}_3$$

$$\begin{array}{l} 272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad 100\% \\ 4.74 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$X = \frac{4.74 \times 100\%}{272} = 1.74 \% \text{ de CrO}_3$$

- Ensayo 2: T= 50°C, [H₂O₂]= 1.4
0.5 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.5 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 7.91 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de CrO}_3$$

$$\begin{array}{l} 272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad 100\% \\ 7.91 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$X = \frac{7.91 \times 100\%}{272} = 2.91 \% \text{ de CrO}_3$$

- Ensayo 3: T= 60°C, [H₂O₂]= 1.4
0.5 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.8 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 12.65 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de CrO}_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$12.65 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{12.65 \times 100\%}{272} = 4.65 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 4: T= 40°C, [H₂O₂]= 2.1
0.7 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.7 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 11.07 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$11.07 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{11.07 \times 100\%}{272} = 4.07 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 5: T= 50°C, [H₂O₂]= 2.1
0.7 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.8 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 12.65 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$12.65 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{12.65 \times 100\%}{272} = 4.65 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 6: T= 60°C, [H₂O₂]= 2.1
1.4 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$\begin{array}{l} 272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad 100\% \\ 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$X = \frac{22.13 \times 100\%}{272} = 8.13 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 7: T= 40°C, [H₂O₂]= 2.8
0.9 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.9 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 14.23 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$\begin{array}{l} 272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad 100\% \\ 14.23 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$X = \frac{14.03 \times 100\%}{272} = 5.23 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 8: T= 50°C, [H₂O₂]= 2.8
1.1 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.1 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 17.39 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$17.39 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{17.39 \times 100\%}{272} = 6.39 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 9: T= 60°C, [H₂O₂]= 2.8
1.4 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{22.13 \times 100\%}{272} = 8.13 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 1(R): T= 40°C, [H₂O₂]= 1.4
0.3 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de Cr}}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.3 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 4.74 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$4.74 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{4.74 \times 100\%}{272} = 1.74 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 2 (R): T= 40°C, [H₂O₂]= 2.1
0.7 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.7 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 11.07 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$\begin{array}{l} 272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad 100\% \\ 11.07 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$X = \frac{11.07 \times 100\%}{272} = 4.07 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 3 (R): T= 40°C, [H₂O₂]= 2.8
0.7 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.0 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$\begin{array}{l} 272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad 100\% \\ 15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \quad \rightarrow \quad x \end{array}$$

$$X = \frac{15.81 \times 100\%}{272} = 5.81 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 4 (R): T= 50°C, [H₂O₂]= 1.4
0.4 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 6.32 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$6.32 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{6.32 \times 100\%}{272} = 2.32\% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 5 (R): T= 50°C, [H₂O₂]= 2.1
0.5 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.8 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 12.65 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$12.65 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{12.65 \times 100\%}{272} = 4.65\% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 6 (R): T= 50°C, [H₂O₂]= 2.8
1.1 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.1 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 17.39 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$17.39 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{17.39 \times 100\%}{272} = 6.39\% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 7 (R): T= 60°C, [H₂O₂]= 1.4
0.5 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 0.7 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 11.067 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$11.067 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{11.067 \times 100\%}{272} = 4.06 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 8 (R): T= 60°C, [H₂O₂]= 2.8
1.4 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{22.13 \times 100\%}{272} = 8.13 \% \text{ de } CrO_3$$

- Ensayo 9 (R): T= 60°C, [H₂O₂]= 2.8
1.4 cm³ Na₂S₂O₃ gastados

$$\frac{15.81 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } Cr}{\text{cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3} \times 1.4 \text{ cm}^3 \text{ Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 = 22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \text{ de } CrO_3$$

$$272 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow 100\%$$

$$22.13 \frac{\text{g}}{\text{L}} \rightarrow x$$

$$X = \frac{22.13 \times 100\%}{272} = 8.13 \% \text{ de } CrO_3$$

ANEXO E

MARCHA TITULACIÓN CROMO TRIVALENTE

Cromo trivalente

1. Medir con la pipeta una muestra de 10 ml y poner en un frasco aforado de 500 ml diluir hasta la marca con agua destilada y agitar vigorosamente.
2. Tomar con la pipeta 10 ml de la solución preparada en el paso (1) y ponerlos dentro de un frasco de Erlenmeyer de 250 ml y añadir 100 ml de agua destilada.
3. Añadir 0.2 g de peróxido de sodio (Na_2O_2).
4. Hervir durante 20 minutos al menos pero sin exceder de 30.
5. Diluir entre 100 y 125 ml y dejar enfriar.
6. Añadir 2 g de bifloruro de amonio (NH_4HF_2).
7. Añadir 15 ml de ácido clorhídrico concentrado y dejar enfriar
8. Añadir 10 ml de solución de yoduro de potasio (KI)
9. Llenar la bureta con 50 ml de solución estándar de tiosulfato de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) y valorar hasta que el color café oscuro comience a desvanecer.
10. Añadir 3 ml de solución indicadora de almidón al 1% y continuar valorando, o hasta que el color azul desaparezca por un minuto.
11. Leer la bureta. Este valor multiplicado por el factor propio de la solución estándar de cromo, da el cromo total como ácido crómico (CrO_3) equivalente.

ANEXO F
COTIZACIÓN DE QUIPOS



INGENIERIA DE TANQUES EN FIBRA SAS

COTIZACION OP-301117-02

CONDICIONES COMERCIALES				
ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
1	FABRICACION DE 2 TANQUES DE 1 M3 EN PRFV PARA TRATAMIENTOS DE LODOS GALVANICOS	2	\$ 3.900.000	\$7.800.000
			IVA 19%	\$ 1.482.000
			TOTAL	\$9.282.000

TRANSPORTE INCLUIDO, MEDIDAS A CONVENIR

FORMA DE PAGO:

50% Como anticipo del Valor Total incluido IVA

30% Antes del despacho con registro fotográfico o visita a la bodega incluido IVA.

20% Contra entrega final con los descuentos de ley.

GARANTIA: 6 meses por defectos en la fabricación o en los materiales utilizados, comprobado por nuestros técnicos.

TIEMPO DE ENTREGA: De 15 a 20 días.

Esperamos que esta oferta cumpla con sus expectativas, quedamos a la espera de su aprobación.

Oficina y Planta: Calle 34 Sur No 78 L 22 / Kr 5 No 100 C Este 75 Sur
Teléfonos de contactos: 4 830193 / 317 8621955 / 319 2256059
E-mail: gerencia@tanquesenfibradevidrio.com info@tanquesenfibradevidrio.com
www.tanquesenfibradevidrio.com
Bogotá



Señora
Alejandra Pérez

Según lo acordado adjunto cotización del producto requerido, quedo atenta a cualquier duda que tenga.

Cantidad	Descripción	Valor Und	Valor Total
1	Resistencia para inmersión 120 V	\$420.988	\$420.988
		Total	\$420.988

Att
RESISTENCIAS NACIONALES S.A

Telefono: 760 2859 - Móvil: 314 416 4988 - 313 293 5243 - Fax: 760 0951
CONTACTO@RESISTENCIASNACIONALES.COM
BOGOTÁ, COLOMBIA

RTS S.A.
NIT 890906525-3
CORR POPALITO KM 8 VIA PORCE BARBOSA-ANTIOQUIA
TEL: 4441082
IVA REGIMEN COMUN 11 9009-06

FACTURA DE VENTA No. 022857
PRELIO B7

CODIGO CIUD 4662 RTE CREE 0.43

Facturacion por computador Segun Resolucion No 110000636773 DE 2015 07 13
Desde No 20001 HASTA 30000

Cliente: 830988289-0
Nombre: CROMOLUKO PARA INGENIERIA LTDA
Direccion: AV 6 No 32A 10
BOGOTA DC
Telefono: 2777222

FECHA FACT 2016-01-19
PLAZO CONTADO
FECHA VTO 2016-01-19
ORDEN COMP
VENDEDOR 2032

LOTE	REFERENCIA	DESCRIPCION	CANT	PRECIO UN.	TOTAL
	0615205 063153	ACIDO CROMICO	500.0	11,500	5,750,000

VALOR BRUTO 5,750,000
VALOR IVA 920,000
DESCUENTO 0
VALOR TOTAL 6,670,000

SON: SEIS MILLONES SEISCIENTOS SETENTA MIL PESOS MCTE.

COMENTARIO:

FACTURA EN ORIGINAL
PASADOS 8 DIAS DE RECIBIDO LA MERCANCIA NO ACEPTAMOS RECLAMOS NI DEVOLUCIONES.
ESTA FACTURA GENERA INTERESES DE ACUERDO A LA TASA MAXIMA LEGAL VIGENTE


Firma del Emisor

Firma y sello Cliente ,238

FACTURA IMPRESA POR SOFTWARE DE SISTEMAS DE INFORMACION EMPRESARIAL NIT 890319193-3

ANEXO H
REMISIÓN DE BIOLODOS S.A. ESP

REMISION DE RECEPCION RESIDUOS BIOLODOS S.A. ESP	REMISION No.	15477
	FECHA DE RECEPCION	miércoles 30/11/2016

Datos Generales del Solicitante			
Nombre Cliente o Razón Social :	INGECROM LTDA	Nombre conductor :	Piter Jimenez
Transportador :	Prosamcol	Placa del vehiculo:	WBF574

Datos específicos del Servicio						
Consecutivo	Nombre Empresa Generadora	Tipo de residuo	Cant. Embalaje	Peso(kg)	V/R unitario (\$)	V/R TOTAL (\$)
28404	INGECROM LTDA	A1050 Lodos galvanicos	50 Lonas	1,580,00	\$ 580,00	\$ 932.200,00
R00698	INGECROM LTDA	Solidos contaminados con A1050	50 Lonas	25,00	\$ 1.200,00	\$ 30.000,00
28405	INGECROM LTDA	Y17 Desechos resultantes del tratamiento de superficie de metales y plásticos.	4 Lonas	128,00	\$ 550,00	\$ 70.400,00
R00697	INGECROM LTDA	Solidos contaminados con Y17	4 Lonas	2,00	\$ 1.200,00	\$ 2.400,00
						\$ -
						\$ -
Subtotal (1)						\$ 1.035.000,00

Datos Adicionales del Servicio									
Se factura Transporte?				Genera RESPEL?					
		SI	x	NO			SI	x	NO
Tipo de Transporte	Cant	V/R unitario (\$)	V/R TOTAL (\$)	Tipo de RESPEL	Cant	V/R unitario (\$)	V/R TOTAL (\$)		
Furgon	1	\$ 240.000,00	\$ 240.000,00				\$ -		
			\$ -				\$ -		
Servicio de Bascula			\$ -				\$ -		
			Subtotal (2)				\$ 240.000,00	Subtotal (3)	\$ -

Devolucion Embalajes	Tipo de Embalaje	Cantidad(und)		SUBTOTAL(4)	\$ 1.275.000,00
R00698	lonas	50			
R00697	lonas	4			
Unidad 7					
				TOTAL	\$ 1.275.000,00
			ORDEN DE SERVICIO No.	FACTURA No.	

ENCARGADO DE ENTREGAR EL RESIDUO		ENCARGADO DE RECIBIR EL RESIDUO	
NOMBRE	Piter Jimenez	NOMBRE	Yineth Velez
CARGO	Conductor	CARGO	Auxiliar de planta
FIRMA		FIRMA	

F-O 10 V2 07/04/2012