

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica
Escuela Profesional de Metalurgia

**“ELIMINACIÓN DE IONES CROMO (VI) CONTENIDOS EN
EFLUENTES METALÚRGICOS MEDIANTE SU PRECIPITACIÓN
COMO CROMATO DE PLOMO”**

**TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO METALURGISTA**

JASON ROMERO TERRONES

**LIMA – PERÚ
2004**

DEDICATORIA

***Dedicado con infinita gratitud a
Mis padres María Gloria Terrones Guerra y
Lizardo Romero Serván.***

***Así como a mis hermanos Silvia Mercedes, Lizardo Nicolás,
Angel Joel, Gloria Patricia, y a mi
sobrina Carlita.***

Lima, 22 de mayo de 2004

AGRADECIMENTOS

***En primer lugar a Dios que me dio las fuerzas
necesarias para poder culminar este trabajo,
a mi familia, amigos y a la
Empresa Smallvill S.A.C. donde trabajé, por
todas las facilidades que me dieron
para la elaboración de este trabajo.
A todas las personas nombradas muchas gracias,
por su apoyo y comprensión.***

SUMARIO

La eliminación de iones cromo hexavalente contenidos en efluentes metalúrgicos mediante su precipitación como cromato de plomo se logró mediante la reacción del acetato de plomo añadido y el efluente de cromato de sodio con un contenido de cromo de 117.4mg/l y pH=7.74.

Los iones Pb^{+2} (proveniente del acetato de plomo añadido) y CrO_4^{-2} (proveniente del efluente de la planta concentradora), forman el precipitado de cromato de plomo, el cual es recuperado por sedimentación (previa floculación).

Para la recuperación del precipitado de cromato de plomo se propone una planta de tratamiento con el mínimo de equipos, un tanque 6'x6' para la primera etapa de precipitación, un tanque de 4'x4' mezclador para la floculación y un sedimentador de $\phi 5m \times 2.4m$.

El resultado final es un efluente con una concentración de cromo por debajo de 1ppm y sin la presencia de otros metales contaminantes cumpliéndose todas las normas medioambientales vigentes, paralelo a esto se obtiene un precipitado de cromato de plomo comercial que puede ser comercializado.

Los detalles se presentan en los siguientes capítulos de este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I - ANTECEDENTES	1
1.1 Evaluación de la generación de efluentes con contenido de iones cromato en la minería peruana.	1
1.2 Regulaciones ambientales vigentes para efluentes con contenido de cromo.....	5
1.3 Toxicología del cromo hexavalente	8
1.4 Descripción de tratamientos convencionales de efluentes que contienen cromo hexavalente	12
1.4.1 Método de Reducción y Precipitación.....	12
1.4.2 Método de adsorción con carbón activado.....	13
1.4.3 Método de osmosis inversa.....	14
CAPÍTULO II - FUNDAMENTO TEÓRICO	17
2.1 Aspecto general.	17
2.2 Precipitación de iones cromato.....	21
CAPÍTULO III - INGENIERÍA DEL PROYECTO	27
3.1 Introducción.....	27
3.2 Pruebas experimentales: análisis y discusión de resultados de diferentes opciones de tratamiento.	28
3.2.1 Con nitrato de plomo industrial.	28
3.2.2 Con acetato de plomo industrial.	30
3.2.3 Con acetato de plomo sintetizado en laboratorio.	31
3.3 Separación sólido-líquido (recuperación del pigmento).....	33
3.4 Caracterización del pigmento.	36
3.5 Diseño de la Planta de tratamiento de efluentes con contenido de iones cromato.....	37

3.5.1 Esquema de la planta de tratamiento continuo.	37
3.5.2 Balance de materiales.....	37
3.5.3 Parámetros de diseño básico.	37
3.6 Dimensionamiento y selección del equipo principal.	43
CAPÍTULO IV - EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	45
4.1 Determinación de la inversión.....	45
4.2 Costo de la eliminación de cromo.....	45
CAPÍTULO V - ASPECTOS AMBIENTALES.....	53
5.1 Calidad de efluentes finales.....	53
5.2 Elaboración del plan de contingencia durante la operación.....	54
5.3 Plan de cierre.....	56
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES	61
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	
CURRICULUM VITAE	

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo presenta una nueva alternativa al tratamiento de efluentes metalúrgicos que contienen cromo hexavalente, teniendo como meta minimizar el impacto ambiental a bajos costos de tratamiento y además de obtener beneficios económicos a partir de obtener un producto comercial como es el cromato de plomo, el cual es un pigmento muy usado en la industria de pinturas, plásticos, etc. Las pruebas fueron realizadas en los laboratorios de la Compañía Smallvill S.A.C, compañía consultora especializada en estudios medioambientales y metalúrgicos.

Para la realización de las pruebas se tomó como referencia el efluente de una planta concentradora de polimetálicos Cu-Pb-Zn de 1600TM de capacidad de tratamiento ubicada en la Sierra central del Perú. Esta planta en la etapa de separación Cu-Pb emplea dicromato de sodio como depresor de plomo, la solución remanente de dicromato de sodio es la que va directamente a lagunas y/o ríos cercanos contaminándolos con el nocivo cromo hexavalente.

Introducción

En el presente trabajo se presenta las regulaciones ambientales para efluentes con contenido de cromo, así como el impacto en la flora y fauna debido a la presencia de cromo hexavalente en ríos y/o lagunas.

Conociendo la concentración de cromo hexavalente en el efluente se hicieron pruebas metalúrgicas, las cuales se detallan más adelante, presentándose los resultados, y las interpretaciones que sustentan este trabajo; las pruebas se realizaron al nivel de laboratorio.

Se propone una planta de tratamiento (diseño básico) que basa su diseño en la rápida cinética de la reacción de precipitación del cromato de plomo así como una fácil separación sólido-líquido.

En la parte final de este trabajo se presenta las ventajas económicas y técnicas de esta propuesta.

Capítulo I

ANTECEDENTES

1.1 Evaluación de la generación de efluentes con contenido de iones cromato en la minería peruana.

La existencia de minerales polimetálicos que contienen sulfuros de Cu, Pb, y Zn, es común en la minería peruana, como consecuencia el tratamiento de ellos por el método de flotación produce concentrados individuales de cobre, plomo y zinc. En el tratamiento convencional de flotación se obtiene primero un concentrado colectivo (también denominado "bulk") de Cu-Pb, y luego de concentrados de Zn, el concentrado bulk Cu-Pb se somete entonces al proceso de separación en que se deprime el sulfuro de plomo y se flota el sulfuro de cobre.

En el circuito de separación Cu-Pb, generalmente se emplea el dicromato de Sodio para deprimir los sulfuros de Pb; la dosificación empleada esta en el orden de 2 a 3 kg/TM y en consecuencia la fase liquida de la pulpa de flotación resulta con concentraciones de cromo entre 30 y 340 mg/l. La concentración de cromo en el efluente de la planta depende fundamentalmente de la dilución de la pulpa de flotación empleada (dilución=L/S=peso de liquido/peso de sólido), como se observa en la tabla

1.1.1.

Tabla 1.1.1.- Concentración de cromo en efluente final del circuito de separación Cu-Pb, en función de la dilución de la pulpa (Dosificación de Dicromato de sodio: 2.5 kg/TM)

Concentración de Sólidos		Concentración, mg/l	
% Peso	Dilución, L/S	Dicromato	Cromo
3	32,3	77	31
4	24,0	104	42
5	19,0	132	53
10	9,0	278	113
15	5,7	441	179
20	4,0	625	254
25	3,0	833	338
30	2,3	1071	435

En la figura 1.1.1 se aprecia el diagrama de flujo de una Planta de Flotación de minerales polimetálicos que incluye el Circuito de Separación Cu-Pb y la generación del efluente con cromo en ella se describe el tratamiento por Flotación de los minerales polimetálicos que dan origen al concentrado bulk Cu-Pb, el que luego es procesado en el Circuito de Separación Cu-Pb para producir concentrados individuales de Cu y de Pb.

En la figura 1.1.2 se puede observar el balance de agua y cromo de la planta concentradora de polimetálicos de referencia, se puede observar que el dicromato de sodio se añade en la etapa de acondicionamiento del Circuito de Separación Cu-Pb, y entonces se origina el efluente que contiene Cromo.

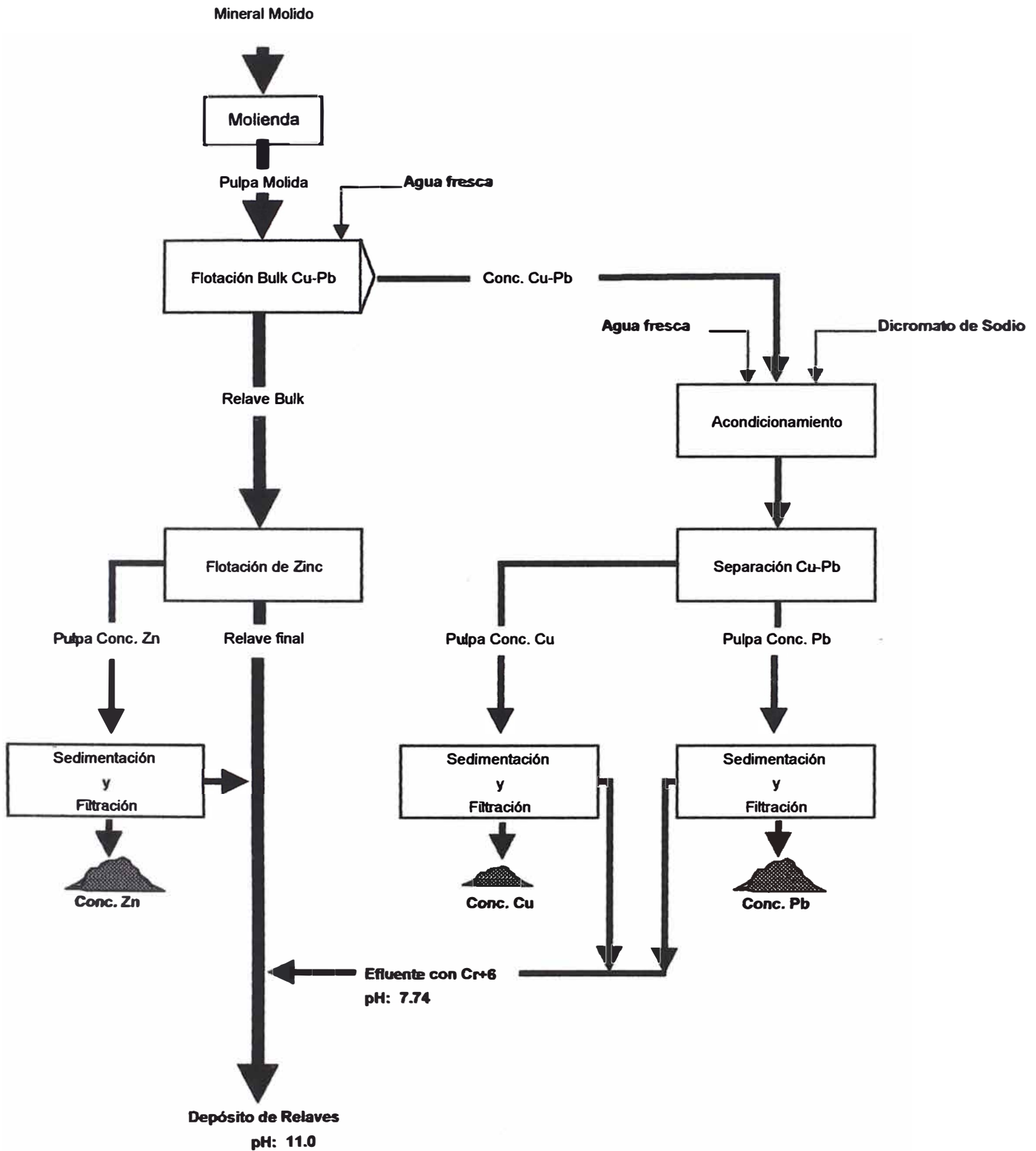


Figura 1.1.1. Esquema de Flotación de minerales polimetálicos y la generación del Efluente que contiene Cromo

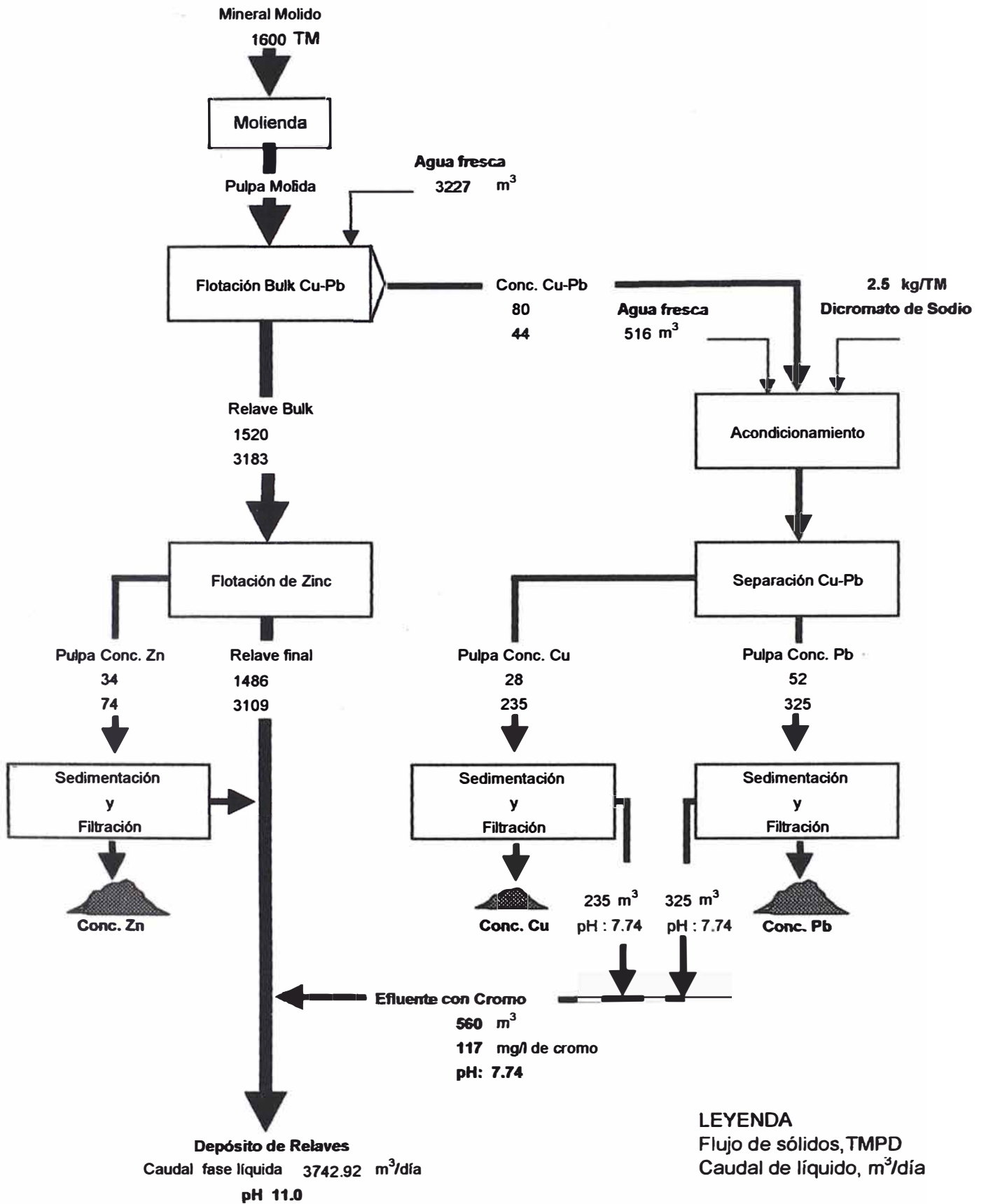


Figura 1.1.2. Balance de agua y cromo

La cantidad de Dicromato añadida está en el rango de 2.5 kg por cada Tonelada Métrica (TM) de Concentrado bulk Cu-Pb.

La concentración de Cromo en el Efluente Final depende de la concentración de sólidos en la pulpa procesada y del caudal de agua empleada para el transporte de los concentrados hasta la zona de Sedimentación y Filtrado.

Así en la Planta Concentradora que se detalla en la figura 1.1.2 la pulpa procesada tiene una concentración de sólidos en el rango de 12.5 % en peso, y entonces la concentración de Cromo en el efluente resulta igual a 117.4 mg/l.

En la figura 1.1.2 se muestra también los caudales relativos y pH del efluente de Cr ($560 \text{ m}^3/\text{día}$) y de la pulpa del relave final ($3\ 109 \text{ m}^3/\text{día}$).

1.2 Regulaciones ambientales vigentes para efluentes contenido de cromo.

Según el Reglamento de la Ley General de Aguas (D.S. N° 007-83-SA), se establecen como valores límites para el cromo hexavalente los observados en la tabla 1.2.1 (para conocer los valores límites de otros metales disueltos observar la tabla 1.2.2):

Tabla 1.2.1 Reglamento de la Ley General de Aguas

Elemento	Limite, mg/l	Tipo	Uso
Cromo	0,05	I	Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
Cromo	0,05	II	Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración, aprobados por el Ministerio de Salud.
Cromo	1,00	III	Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
Cromo	5,00	IV	Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).
Cromo	0,05	V	Aguas de zonas de pesca de mariscos.
Cromo	0,05	VI	Aguas de zonas de preservación de fauna acuática y pescas recreativa y comercial.

Por tanto el límite máximo permisible (LMP) establecido por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) para efluentes mineros que contienen cromo que se derivan para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales es 1.0 mg/l, entonces, la concentración actual en las plantas que usan dicromato supera largamente este valor y necesita un tratamiento para reducir su concentración por debajo de 1.0 mg/l.

En ocasiones el efluente del circuito de separación se mezcla con la pulpa del relave general de la planta que tiene un caudal de 5 a 10 veces mayor, para así reducir la concentración de cromo finalmente descargada al medio receptor. En tales casos las concentraciones de cromo se reducen al rango de 20mg/l y tampoco cumplen con el LMP.

Tabla 1.2.2
LEY GENERAL DE AGUAS D.L. Nro. 17752 Y SUS MODIFICACIONES AL REGLAMENTO
DE LOS TÍTULOS I, II, y III SEGÚN EL DECRETO SUPREMO Nro. 007-83-S.A.
CLASIFICACIÓN DE LOS CURSOS DE AGUA Y DE LA ZONA COSTERA
Para efectos de Protección de las aguas correspondientes a los diferentes usos-Valores lmites

DENOMINACIÓN	CURSOS DE AGUA						AGUA MARÍTIMA						EXPRESADO
	I	II	III	IV	V	VI	I	II	III	IV	V	VI	
Aluminio	-	-	-	1.00	1.00	-	-	-	1.00	1.00	1.00	-	mg/l como Al
Arsénico	0.10	0.10	0.20	1.00	0.01	0.05	0.10	0.10	0.20	1.00	0.01	0.05	mg/l como As *
Bario	0.10	0.10	-	0.50	0.50	-	0.10	0.10	-	0.50	0.50	-	mg/l como Ba
Cadmio	0.01	0.01	0.05	-	0.0002	0.004	0.10	0.10	0.05	-	0.0002	0.004	mg/l como Cd*
Cianuro	0.20	0.20	1.00	-	0.0050	0.005	0.20	0.20	1.00	-	0.005	0.005	mg/l como CN*
Cobalto	-	-	-	0.20	0.20	-	-	-	0.20	0.20	0.20	-	mg/l como Co
Cobre	1.00	1.00	0.50	3.00	0.01	-	1.00	1.00	0.50	3.00	0.01	-	mg/l como Cu*
Cromo(VI)	0.05	0.05	1.00	5	0.05	0.05	0.05	0.05	1.00	5.00	0.05	0.05	mg/l como Cr
Coliformes Totales	8.80	20000.00	5000.00	5000.00	1000.00	20000.00	8.80	20000.00	5000.00	5000.00	1000.00	20000.00	NMP/100ml **
Coliformes Fecales	0.00	4000.00	1000.00	1000.00	200.00	4000.00	0.00	4000.00	1000.00	1000.00	200.00	4000.00	NMP/100ml **
Oxígeno disuelto	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00	4.00	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00	4.00	mg/l como O.D.
Fenoles	0.0005	0.0010	0.0010	-	0.0020	0.0020	0.0005	0.0010	0.0010	-	0.002	0.002	mg/l como C6H5OH
Hierro	0.30	0.30	1.00	-	-	-	0.30	0.30	1.00	-	-	-	mg/l como Fe
Floruros	1.50	1.50	2.00	5.00	-	-	1.50	1.50	2.00	-	-	-	mg/l como F
litio	-	-	-	-	5.00	-	-	-	5.00	5.00	5.00	-	mg/l como Li
Magnesio	-	-	150.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	mg/l como Mg
Manganeso	0.10	0.10	0.50	-	-	-	0.10	0.10	-	-	-	-	mg/l como Mn
Mercurio	0.002	0.002	0.010	-	0.0001	0.0002	0.002	0.002	0.01	-	0.0001	0.0002	mg/l como Hg*
Nitrato	0.01	0.01	0.10	-	-	-	0.01	0.01	0.10	-	-	-	mg/l como N*
Níquel	0.002	0.002	0.002	0.500	0.002	-	0.002	0.002	0.002	0.50	0.002	-	mg/l como Ni
pH	5-9	5-9	5-9	5-9	5-9	-	6-9	6-9	6-9	6-8.5	6-8.5	-	
Plata	0.05	0.05	0.05	-	-	-	0.05	-	0.05	-	-	-	mg/l como Ag*
plomo	0.05	0.05	0.05	-	0.01	0.03	0.05	0.05	0.10	-	0.01	0.03	mg/l como Pb*
Selenio	0.01	0.01	0.05	0.05	0.005	0.01	0.01	0.01	0.05	0.05	0.05	0.01	mg/l como Se*
Sulfatos	-	-	400	-	-	-	-	-	-	-	-	-	mg/l como SO4
Sulfuros	0.001	0.002	0.005	-	0.002	0.002	0.001	0.002	0.005	-	0.002	0.002	mg/l como X*
Zinc	5.00	5.00	25.00	-	0.02	**	5.00	5.00	25.00	-	0.02	**	mg/l como Zn

* Sustancias Potencialmente Peligrosas.

** Entendido como valor máximo en 80% de 5 o más muestras mensuales.

I : Aguas de abastecimiento doméstico con simple desinfección.

II : Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración. aprobados por el Ministerio de Salud.

III : Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.

IV : Aguas de zonas recreativas de contacto primario (baños y similares).

V : Aguas de zonas de pesca de mariscos.

VI : Aguas de zonas de preservación de fauna acuática, pesca recreativa y comercial.

El efluente que contiene cromo se obtiene generalmente como una solución con un bajo contenido o insignificante de sólidos debido a que ambos productos, concentrado de cobre y concentrado de plomo, se obtienen luego de operaciones de Sedimentación y Filtración.

En la actualidad existen diversas operaciones mineras que emplean dicromato de sodio como reactivo de flotación, como son los casos de la Compañía Minera Casapalca en la Planta Concentradora Berna, Empresa Administradora Chungar en la Planta Concentradora de Animón, Compañía Minera Huarón, Compañía Minera Atacocha, Compañía Minera Raura y Compañía Minera Milpo.

1.3 Toxicología del cromo hexavalente.

El cromo (Cr) es un elemento metálico que la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de los Estados Unidos cataloga como uno de los 129 contaminantes de prioridad, además, el cromo es considerado uno de los 14 metales pesados más nocivos.

El cromo elemental es muy estable, constituye las 0.1-0.3 partes por millón de la corteza de la Tierra, pero normalmente no se encuentra puro en la naturaleza. El cromo puede existir en estados oxidación que van de +2 a +6, pero frecuentemente en la mayoría de los casos es encontrado en el ambiente en los estados de oxidación trivalente (Cr^{+3}) y hexavalente (Cr^{+6}).

Los estados de oxidación +3 y +6 son los más importantes debido a que los otros estados +2, +4, y +5 son inestables y se convierten rápidamente a +3, que a su vez se oxida a +6.

Los compuestos del cromo son estables en el estado trivalente y se presentan en la naturaleza como cromita (FeCr_2O_4). El estado hexavalente es el segundo estado más estable y se presenta en la naturaleza como un mineral raro llamado crocoíta (PbCrO_4).

Los efluentes que contienen cromo hexavalente se caracterizan por ser altamente bio-acumulables, con altos factores de bio-concentración en peces y productos vegetales, pues sus compuestos son bastantes solubles y móviles en el ambiente.

Muchos compuestos de cromo con una valencia de 6 se llaman cromatos, bicromatos, o ácido crómico; la mayoría tienen un color amarillo, y todos son tóxicos. Los compuestos del cromo hexavalente tienden a ser oxidantes y se les asocia como cancerígenos además de provocar daño a los riñones.

El cromo hexavalente es más tóxico que el cromo trivalente porque su potencial de oxidación es alto y penetra las membranas biológicas fácilmente causando daño al ADN y muchas otras estructuras del tejido humano.

El cromo hexavalente (Cr^{+6}) cuando es inhalado en dosis elevadas tiene el potencial de producir tumores pulmonares en los humanos y en animales. Sin embargo, cuando los niveles de exposición son bajos los efectos de los iones del cromo hexavalente son reducidos en los fluidos corporales humanos como el jugo gástrico, el fluido del revestimiento epitelial de la vía respiratoria, sangre, y otros fluidos, antes de que los iones del cromo hexavalente puedan reaccionar con el ADN y producir daño celular, a menos que la dosis sea suficiente alta como para debilitar la capacidad de defensa del cuerpo.

El cromo hexavalente es fácilmente asimilado por los organismos vivos debido a su alta solubilidad, en concentraciones altas el Cr^{+6} está asociado con actividades anormales, como a alteraciones en la sangre, la baja resistencia a organismos patógenos, las modificaciones de la conducta, cambio en los hábitos alimenticios.

Como se puede resumir el cromo, especialmente el hexavalente, es importante su estudio desde el punto de vista de impacto en la fauna y flora, sin embargo aunque el cromo tiene todavía un poco de notoriedad, en general es uno de los contaminantes medioambientales más dañinos, debido que se le considera cancerígeno.

En el caso de la fauna acuática, los peces sometidos a altas dosis de cromo hexavalente, estos desarrollan hipertrofia (aumento excesivo del volumen de

un órgano) e hiperplasia (aumento de fibrina en la sangre), las que finalmente producen daños irreversibles en los órganos de respiración de los peces.

Además los peces que están expuestos al cromo hexavalente exhiben alteraciones en su desplazamiento, conductas vacilantes, incluso la pérdida de equilibrio, movimientos erráticos, rápidos y torpes, y una frecuencia más alta a nadar verticalmente, y además esta exposición altera los ciclos reproductivos de los peces.

La exposición de las plantas al cromo hexavalente produce en estas alteraciones en su organismo como la clorosis férrica (amarilleamiento de las hojas), interfiere en el desarrollo normal del tallo, reduce la captación de micronutrientes e inhibición de la fotosíntesis.

El cromo hexavalente tiene gran actividad biológica lo que lo hace mutagénico, y carcinogéno, en una gran variedad de organismos. Las plantas acuáticas y los gusanos marinos parecen ser los grupos más sensibles probados, como ejemplo de esto se tiene la inhibición en el crecimiento de las algas cuando el contenido de cromo hexavalente en el agua es de 10.0 ppb, y la reproducción de gusanos cuando el contenido de cromo hexavalente en el agua es de 12.5 ppb.

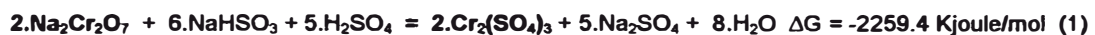
Sin embargo, en la dieta de los humanos, se recomienda para un buen funcionamiento de la hormona llamada insulina(encargada de controlar el nivel de azúcar en la sangre) el cromo trivalente en dosis diarias de 50 a 200 microgramos por día.

1.4 Descripción de tratamientos convencionales de efluentes que contienen cromo hexavalente.

A continuación se describen los métodos tradicionales efectuados en el tratamiento de efluentes con contenido de cromo:

1.4.1 Método de Reducción y Precipitación (*)

El método de **Reducción y Precipitación (*)** consiste en reducir el cromo hexavalente a trivalente, luego con incremento de pH el Cr^{+3} es precipitado en forma de $\text{Cr}(\text{OH})_3$. El agente reductor empleado es el bisulfito de sodio:



La reacción de precipitación se logra mediante la adición de Cal (CaO), Hidróxido de Calcio, Hidróxido de Sodio (NaOH), Carbonato de Sodio (Na_2CO_3) u otro agente alcalino; el uso de Cal es preferido debido a su precio bajo y amplia disponibilidad. La precipitación ocurre desde pH 7.5

pero es completa cuando se alcanza pH 10.0, y ocurre de acuerdo a la siguiente reacción:



El precipitado de hidróxido crómico $\text{Cr}(\text{OH})_3$ obtenido se flocula con polímeros, que aceleran su velocidad de sedimentación, y se separa del líquido por decantación o filtración. Las pruebas realizadas hasta nivel de Planta Piloto demuestran que se puede obtener una buena separación mediante sedimentación. El precipitado obtenido tiene valor comercial y puede ser vendido o tratado posteriormente para obtener cromo metálico, cromita (Cr_2O_3) o para regenerar el dicromato de sodio.

()Este método ha sido desarrollado por la Compañía Smallvill Multiservice S.A.C. y comprobada a escala industrial.*

1.4.2 Método de adsorción con carbón activado

Este método plantea la adsorción física (reversible) de los iones cromato en carbón activado.

En pruebas realizadas en la Compañía Minera Raura se investigó el tiempo de contacto, la influencia de la velocidad de agitación, capacidad máxima de adsorción del carbón activado y la desorción de cromo del carbón activado;

se determinó que la velocidad de adsorción es rápida lográndose una extracción de 85% de iones cromato en 5 segundos de tiempo de agitación. La máxima capacidad de carga lograda fue de 1.4mg de cromo por gramo de carbón activado.

Se estudió la regeneración del carbón activado con una solución de ácido clorhídrico al 3% para lograr la desorción de cromo. En el laboratorio y con una sola etapa de lavado se logró desorber hasta un 30% del cromo.

El inconveniente de este método es que para la recuperación del carbón se requiere varias etapas de lavado.

1.4.3 Método de osmosis inversa

Es uno de los reciente descubrimientos en lo que a tratamientos de aguas se refiere, ya sea para uso en calderas de alta presión, productos farmacéuticos y cosméticos, consumo humano, potabilización del agua de mar, diálisis etc.

Su uso se está extendiendo rápidamente, debido a su gran versatilidad y a los cada vez más reducidos costos de los equipos y al valor del agua purificada o permeada por unidad de volumen; se considera a la ósmosis inversa como un hiperfiltro, que permite eliminar en un 80% a 98% de sales disueltas u otros contaminantes como son las bacterias presentes en el agua.

La eliminación de impurezas del agua, se logra aplicando una alta presión al fluido para que este pase por difusión a través de una membrana semipermeable con poros del orden de 5 a 20 armstrongs. Es tan reducido el diámetro de estos poros que sustancias con peso molecular de 200, son retenidas o filtradas por estas membranas osmóticas, se puede decir que las mismas funcionan como filtros químicos.

La difusión a través de la membrana se fundamenta en la Ley de Fick, la cual postula que en el transporte de solvente y soluto, el flujo molar de cada uno es proporcional al gradiente químico.

Así tenemos que para el transporte del agua:

$$Q_1 = P_w \cdot K_a (P - P_o)$$

Para el transporte de soluto: $Q_2 = K_s \cdot C$

Siendo que: $K_s / K_a = (P - P_o) \cdot (1 - R) / R$

Donde:

Q_1	=	<i>Transporte del agua pura.</i>
Q_2	=	<i>Flujo de soluto.</i>
P_w	=	<i>Densidad del agua.</i>
K_a	=	<i>Constante de membrana al agua pura en m/seg.</i>
K_s	=	<i>Constante de membrana a la solución salina en m/seg.</i>
P	=	<i>Diferencia de presión trans-membranal.</i>
P_o	=	<i>Diferencia de presión osmótica.</i>
R	=	<i>Rechazo de membrana al soluto.</i>
C	=	<i>Diferencia de concentración salina en cada lado de la membrana.</i>

La presión osmótica es la diferencia de energía potencial entre las soluciones de cada lado de la membrana semipermeable, y la presión neta

de trabajo es la diferencia hidrostática total menos la contrapresión ejercida por la presión osmótica. Esta presión osmótica es la presión que tenemos que vencer para que haya caudal del agua.

La capacidad de las membranas de ósmosis inversa aumenta en proporción directa con el incremento de la valencia del soluto. Por lo tanto, cationes como el magnesio y calcio (divalentes) son rechazados más eficazmente que el sodio o potasio (monovalente).

En pruebas realizadas en la Compañía Minera Raura se logró reducir la concentración de cromo a 1.26mg/l teniendo una alimentación de 38.1 mg/l de concentración de cromo y 25.8l/h de caudal.

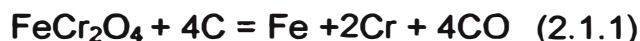
Capítulo II

FUNDAMENTO TEORICO

2.1 Aspecto general

La única mena de cromo es la cromita (FeCr_2O_4), los minerales de cromita se agrupan en tres categorías: metalúrgicos, refractarios y químicos, basándose en su contenido en cromo y la relación cromo-hierro. El cromo metálico se emplea como ferroaleación para dar al acero las propiedades combinadas de gran dureza, gran tenacidad y resistencia a los ataques químicos. El cromo es el constituyente principal del acero inoxidable. El nicrom aleación de cromo y níquel, se emplea como resistencia en los aparatos de calefacción eléctrica. El cromo encuentra amplias aplicaciones en el cromado de aparatos sanitarios, accesorios de automóviles, etc. se emplean ladrillos de cromita en los hornos metalúrgicos, debido a su carácter refractario y neutro. Los ladrillos normalmente se hacen de cromita cruda y brea de carbón, o de cromita con caolín, bauxita u otros minerales, el cromo sirve para obtener ciertos pigmentos verdes, amarillos, anaranjados y rojos; y para la obtención del dicromato de sodio usado en flotación y como mordientes para fijar tintes.

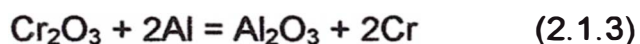
Si no se requiere cromo puro (como para su uso en aleaciones ferrosas) se reduce la cromita con carbón en un horno, lo que da la aleación de ferrocromo que contiene carbono.



Cuando se requiere cromo en estado puro se trata primero la cromita con álcali fundido y oxígeno para convertir el Cr^{+3} a cromato, que se disuelve en agua y se precipita finalmente como dicromato de sodio. Este último se reduce con carbono para dar óxido de cromo.



Finalmente se reduce el óxido con aluminio:



El cromo es un metal de color blanco, duro, brillante y frágil (p.f. 1903 ± 10).

Es extremadamente resistente a los agentes corrosivos ordinarios, lo que explica su amplio uso como una capa protectora por medio de electrodeposición. El metal se disuelve con bastante facilidad en ácidos minerales no oxidantes, por ejemplo, los ácidos hidroclicóric y sulfúric, pero no en frío en agua regia o ácido nítrico, ya sea concentrado o diluido.

El cromo es un metal muy activo cuando no está en estado pasivo. El cromo se une directamente a temperaturas elevadas, con los halógenos, azufre, silicio, boro, nitrógeno, carbono y oxígeno.

En soluciones básicas por encima del pH 6, el trióxido de cromo CrO_3 , al disolverse en agua forma el ion cromato tetraédrico CrO_4^{2-} de color amarillo (figura 2.1.1); entre pH 2 y pH 6, el HCrO_4^- y el ion dicromato $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ (figura 2.1.2) están en equilibrio; y a valores de pH por debajo de 1, la especie principal es H_2CrO_4 .

Los equilibrios son los siguientes:

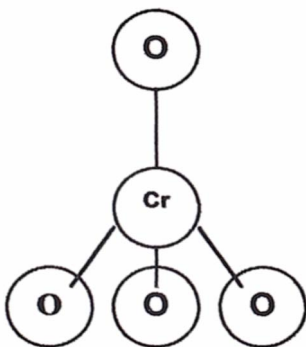
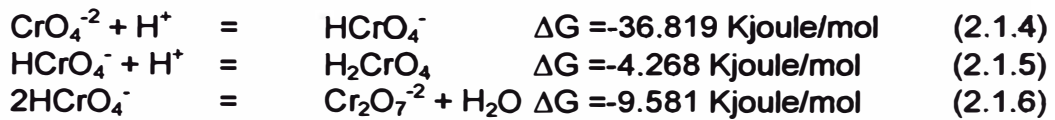


Fig.2.1.1 Estructura del Ion cromato

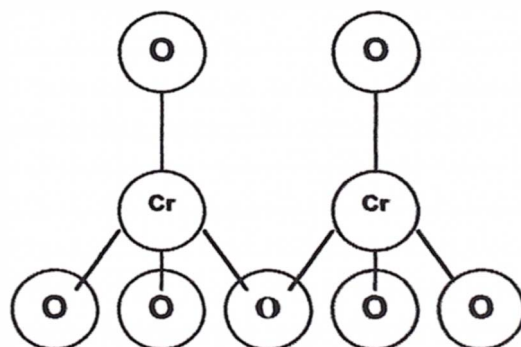


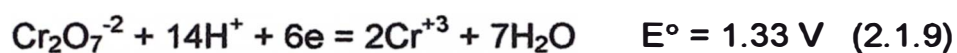
Fig.2.1.2 Estructura del Ion dicromato

Además existen los equilibrios de hidrólisis básica



Los equilibrios que dependen del pH son bastante frágiles y al añadir cationes que forman cromatos insolubles (por ejemplo Ba^{+2} , Pb^{+2} , Ag^{+2}) se precipitan los cromatos y no los dicromatos.

Las soluciones ácidas de dicromatos son oxidantes muy fuertes:



Sin embargo el ion cromato en solución básica es mucho menos oxidante:



En la tabla 2.1.1 se resumen las propiedades de los tres estados de oxidación del cromo.

Tabla 2.1.1 Estados de oxidación del cromo.

Iones en solución ácida	+6	+3	+2
	Cr ₂ O ₇ Dicromato	Cr ⁺³ Crómico	Cr ⁺² Cromoso
Color característico	Anaranjado	Violeta	Azul
Iones en solución Básica	CrO ₄ ⁻² Cromato	CrO ₂ ⁻ Cromito	Cr(OH) ₂ Hidróxido cromoso
Color característico	Amarillo	Verde intenso	Amarillo
Carácter del óxido	CrO ₃ Acido	Cr ₂ O ₃ Anfótero	CrO Básico
Potencial de oxidación		-1.36 v	+0.41v
Compuestos típicos	CrO ₃ Na ₂ CrO ₄ Na ₂ Cr ₂ O ₇ PbCrO ₄	Cr ₂ O ₃ Cr(OH) ₃ NaCrO ₂ Cr ₂ S ₃	CrO Cr(OH) ₂ CrSO ₄
Complejos típicos		[Cr(NH ₃) ₆] ⁻³ [Cr(H ₂ O) ₆] ⁺³ [Cr(H ₂ O) ₂ (OH) ₄] ⁻	

2.2 Precipitación de los iones cromato.

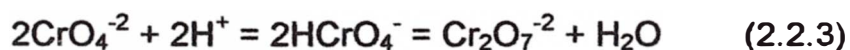
El cromo disuelto en los efluentes mineros e industriales se encuentra en la forma hexavalente (Cr⁺⁶) que es un estado altamente oxidado. Con esta valencia el cromo se presenta como ion cromato (CrO₄⁻²) y como ion dicromato (Cr₂O₇⁻²), la abundancia relativa de una u otra de estas formas depende del pH del efluente. El ion dicromato prevalece por debajo de pH 6 y se transforma a ion cromato por encima de este valor; ambos son muy estables dentro de esos rangos de pH.

En el caso del efluente que estamos tratando podemos considerar que se trata de una solución que contiene iones cromato ya que el pH de esta es de 7.74, por lo tanto de ahora en adelante se considerará la precipitación del ion CrO_4^{-2} .

En resumen ante la presencia de iones hidrogeno, los cromatos se convierten en dicromatos; estos últimos dan soluciones acuosas rojo anaranjadas. La transformación inversa es producida por los iones oxhidrilo:

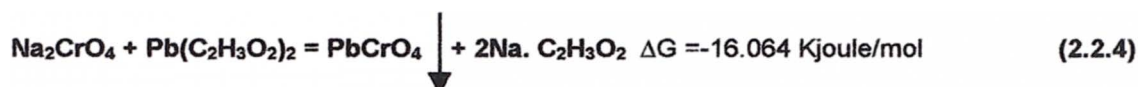


Las reacciones se pueden expresar también de la siguiente manera:

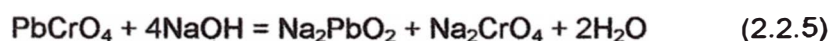


Con respecto a su solubilidad los cromatos de los metales alcalinos, de calcio y de magnesio son solubles en agua; el cromato de estroncio es escasamente soluble. Muchos otros cromatos son insolubles en agua. Los dicromatos de sodio, potasio y amonio son solubles en agua.

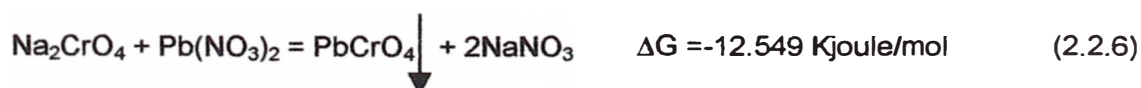
Ahora si a una solución de cromato de sodio se le añade acetato de plomo se produce un precipitado amarillo de cromato de plomo, PbCrO_4 , insoluble en ácido acético y agua caliente o fría; pero soluble en ácido nítrico diluido.



La reacción 2.2.4 es una reacción homogénea, donde las sustancias reaccionantes se encuentran en una sola fase, también se le considera una ecuación química ya que su energía de activación es de 10.5kcal (los procesos físicos generalmente tienen valores bajos de E_a menores de 5kcal y las reacciones químicas normalmente tienen valores de E_a entre 10 y 25 kcal). De la ecuación 2.2.4 el precipitado es soluble en solución de hidróxido de sodio; la solubilidad en solución de hidróxido de sodio se debe a la formación de plumbito de sodio, Na_2PbO_2 , que reduce la concentración del ion Pb^{+2} en un grado tal que no llega a alcanzar el producto de solubilidad del cromato de plomo y, en consecuencia, este se disuelve:



Si a esta misma solución se le añade nitrato de plomo, también se produce un precipitado de cromato de plomo, según la siguiente reacción química:



Para la precipitación del ion cromato CrO_4^{-2} , se pueda considerar la adición de cloruro de bario, obteniéndose un precipitado de cromato de bario, según la siguiente ecuación:



En las tres situaciones presentadas se obtiene buenos resultados en lo que respecta a eliminación de cromo, obteniéndose un precipitado con características comerciales y un efluente final que cumple con los reglamentos medioambientales vigentes. Los pigmentos obtenidos el PbCrO_4 y el BaCrO_4 son muy usados en la industria de la pintura, por lo tanto, la venta de estos podría cubrir los costos de tratamiento e incluso obtener ganancias, dependiendo de los costos de tratamiento, es aquí donde se tiene una diferencia entre uno y otro precipitante, la conveniencia de emplear acetato de plomo con respecto a los otros dos precipitantes es notoria en lo que a costos se refiere, debido a los bajos costos del acetato de plomo, se eligió este reactivo para este proyecto, que a diferencia de otras alternativas medioambientales que son una carga para la empresa debido a sus altos costos de operación, este proyecto además de solucionar un problema medioambiental produciría ganancias a la empresa que lo aplique.

Aunque las reglas pueden identificar una sal que precipitará, la precipitación real dependerá de la concentración molar de los iones en la mezcla. El

producto de la concentración molar de los iones debe ser mayor que la constante de producto de solubilidad, K_{ps} .

Si el producto de la concentración molar de los iones $< K_{ps}$ entonces ninguna precipitación ocurrirá aunque la sal puede ser insoluble según las reglas de solubilidad. Eso es porque la concentración molar de los iones no es lo bastante grande para comenzar el proceso de cristalización, para que la precipitación pueda ocurrir. Inicialmente, cuando la precipitación empieza se forman cristales microscópicos los cuales sirven como semilla para la formación de otros cristales y así lograr una total precipitación. Después de esto los cristales precipitan debido a la fuerza de gravedad al fondo del vaso de la reacción.

Si por otro lado el producto de la concentración molar de los iones $> K_{ps}$ la concentración molar de los iones será bastante grande para que la precipitación pueda ocurrir. Calculando el producto de la concentración molar de los iones después de mezclar las soluciones se compara ese producto y el K_{ps} de la sal, entonces uno puede predecir si la precipitación ocurrirá.

$$K_{ps} \text{ PbCrO}_4 = 1.8 \cdot 10^{-14}$$

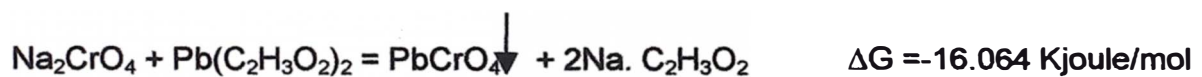
Entonces para que la precipitación pueda ocurrir:



Además para comprobar la espontaneidad de la reacción se recurrió a los criterios de Gibbs.

1. Si ΔG es menor que 0, entonces la reacción es espontanea.
2. Si ΔG es mayor que 0, entonces la reacción no es espontanea.
3. Si ΔG es igual a 0, entonces la reacción está en equilibrio, ningún cambio ocurre.

Entonces para la reacción de precipitación:



Como el ΔG es < 0 podemos concluir que la reacción es espontanea y por lo tanto se producirá la precipitación del cromato de plomo, habiendo comprobado la posibilidad de realizar las pruebas, se empezó el trabajo de laboratorio.

CAPITULO III

INGENIERIA DEL PROYECTO

3.1 Introducción

El trabajo de laboratorio se realizó en los laboratorios de las Compañías CONSULCONT y SMALLVILL; las pruebas tuvieron como finalidad comprobar la viabilidad práctica de obtener un producto comercial de grado industrial como es el cromato de plomo con un mínimo de 90% de pureza, a partir de una solución con alto contenido de cromo hexavalente. Las pruebas realizadas también sirvieron para seleccionar el equipo, realizar el balance de materiales, dimensionar el equipo, y en suma realizar el Diseño de la Planta de Tratamiento al nivel de Ingeniería Básica.

Las pruebas se realizaron empleando el efluente una planta concentradora de polimetálicos cuyas características fisicoquímicas y concentración de metales se presenta en la tabla 3.1.1

Tabla 3.1.1 Características Físicas y Químicas del efluente de cromo.

Caudal m ³ /día	pH	Conductividad μS	Eh mV	Concentración, mg/l				
				Cr	Cu	Pb	Zn	Fe
560	7.74	1374	85	117.4	0.01	0.02	<0.01	<0.01

Se realizaron muchas pruebas de tratamiento del efluente de cromo seguida de sus respectivas pruebas de sedimentación y análisis químico realizadas en el Laboratorio de Absorción Atómica de Smallvill Multiservice S.A.C.

Las pruebas fueron realizadas empleando un agitador orbital múltiple, y un agitador magnético. Se determinaron parámetros relevantes como pH, conductividad, velocidad y tiempo de agitación, volumen, concentración y velocidad de sedimentación del precipitado obtenido, consumo de reactivos, contenido de metales disueltos, entre otros.

3.2 Pruebas experimentales: análisis y discusión de resultados de diferentes opciones de tratamiento

3.2.1 Con Nitrato de plomo industrial.

Una vez que se obtuvieron los productos finales, es decir el precipitado de cromato de plomo (pigmento amarillo) y el efluente final estos fueron analizados para determinar la cantidad de cromo en ellos.

Para obtener la cantidad de reactivo que se va a añadir se hicieron una serie de pruebas de consumo de nitrato de plomo, hasta lograr una concentración de cromo por debajo del límite máximo permisible.

Después de esta serie de pruebas se logró en el efluente final una concentración de cromo de 0.08 mg/l muy por debajo del límite máximo permisible que es de un 1.00mg/l, este resultado se obtiene después de añadir 1.13kg de nitrato de plomo industrial por m³ de efluente.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de esta opción y por lo tanto su aplicación industrial en el tratamiento de efluentes que contienen iones cromato.

En la tabla 3.2.1.1 se ilustran los resultados obtenidos después del tratamiento.

Tabla 3.2.1.1 Consumo de nitrato de plomo industrial

Nit.Pb/Efluente Kg/m ³	Agitación (min)	pH	μS	Concentración de Cr en el efluente tratado, mg/l
Cabeza	---	7.74	1374	117.4
0.75	5	7.44	1278	12.09
0.95	5	7.20	1281	2.80
1.13	5	6.67	1287	0.08
L.M.P				1.00

3.2.2 Con Acetato de plomo industrial.

Esta vez se añadió acetato de plomo grado industrial al efluente obteniéndose el precipitado de cromato de plomo (pigmento amarillo) y el efluente final, los cuales fueron analizados para determinar la cantidad de cromo en ellos.

Para obtener la cantidad de reactivo que se va a añadir se hicieron una serie de pruebas de consumo de acetato de plomo, hasta lograr una concentración de cromo por debajo del límite máximo permisible.

Después de esta serie de pruebas se logró en el efluente final una concentración de cromo de 0.88 mg/l, resultado por debajo del límite máximo permisible que es de un 1.00mg/l, este resultado se logró después de añadir 0.85 kg de acetato de plomo industrial por m³ de efluente. Además en el efluente final se forma otro producto como es el $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ el cual es biodegradable y no afecta la calidad ambiental del efluente.

Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad de esta opción y por lo tanto su aplicación industrial en el tratamiento de efluentes que contienen iones cromato.

En la tabla 3.2.2.1 se ilustran los resultados obtenidos después del tratamiento comprobándose la efectividad del método.

Tabla 3.2.2.1 Consumo de acetato de plomo industrial

Ac.Pb/Efluente Kg/m ³	Agitación (min)	pH	μS	Concentración de Cr en el efluente tratado, mg/l
Cabeza	---	7.74	1374	117.4
0.75	5	7.50	1274	8.36
0.85	5	7.40	1275	0.88
0.95	5	7.20	1280	0.10
1.00	5	6.90	1291	0.08
L.M.P				1.00

3.2.3 Con Acetato de plomo sintetizado en laboratorio.

Para la realización de estas pruebas se hicieron una serie de pruebas de consumo de acetato de plomo sintetizado en laboratorio (ver flow sheet en el Anexo 2), hasta lograr una concentración de cromo por debajo del límite máximo permisible, lográndose resultados similares a los estequiométricos.

Después del análisis respectivo en el efluente final se tiene 0.17 mg/l de cromo, concentración que está muy por debajo del límite máximo permisible que es de un 1.00 mg/l, este resultado se logró después de añadir 0.85kg de acetato de plomo industrial por m³ de efluente. Además se logra un efluente final con un pH de 7.21 y otro producto

como es el $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$ el cual es biodegradable y no afecta la calidad ambiental del efluente.

Los resultados obtenidos demuestran la buena calidad del acetato de plomo sintetizado en laboratorio y por lo tanto la viabilidad de esta opción y su aplicación industrial en el tratamiento de efluentes que contienen iones cromato.

En la tabla 3.2.3.1 se ilustran los resultados obtenidos después del tratamiento, comprobándose la efectividad del método en lo medioambiental y económico.

Tabla 3.2.3.1 Consumo de acetato de plomo sintetizado en laboratorio

Ac.Pb/Efluente Kg/m ³	Agitación (min)	pH	μS	Concentración de Cr en el efluente tratado, mg/l
Cabeza	---	7.74	1374	117.4
0.75	5	7.40	1264	8.34
0.85	5	7.21	1296	0.17
0.95	5	7.01	1311	0.11
1.00	5	6.83	1315	0.10
L.M.P				1.00

En la figura 3.1.1 se hace una comparación de los consumos de los diferentes reactivos y su efectividad en la eliminación de cromo hexavalente.

3.3 Separación sólido-liquido.

Inmediatamente después de realizadas las pruebas de eliminación de cromo se realizaron pruebas de sedimentación, (volúmenes de 1 litro por prueba).

Las pruebas de sedimentación que complementaron a otras pruebas sustentan el diagrama de flujo y balance metalúrgico que ha servido para el diseño de la Planta de tratamiento de efluentes de cromo.

El volumen del sedimento (precipitado) es un elemento importante en el diseño de una Planta de tratamiento de aguas, es por eso que se tuvo mucho cuidado en la elaboración de estas pruebas.

Se hicieron 3 tipos pruebas de sedimentación: con coagulación y floculación, solo floculación y sedimentación sin asistencia de coagulantes y/o floculantes.

El O/F observado a 5 minutos de sedimentación en la prueba de coagulación/floculación es totalmente cristalino, lo mismo sucedió en la prueba de floculación donde a 5 minutos se observó un O/F cristalino, mientras que en la prueba de sedimentación donde no se añadió reactivo alguno, el O/F observado a los 5 minutos tuvo una tonalidad amarillenta debido a la gran cantidad de partículas de precipitado en suspensión. De la observación de los O/F se concluyó que no se necesita una coagulación

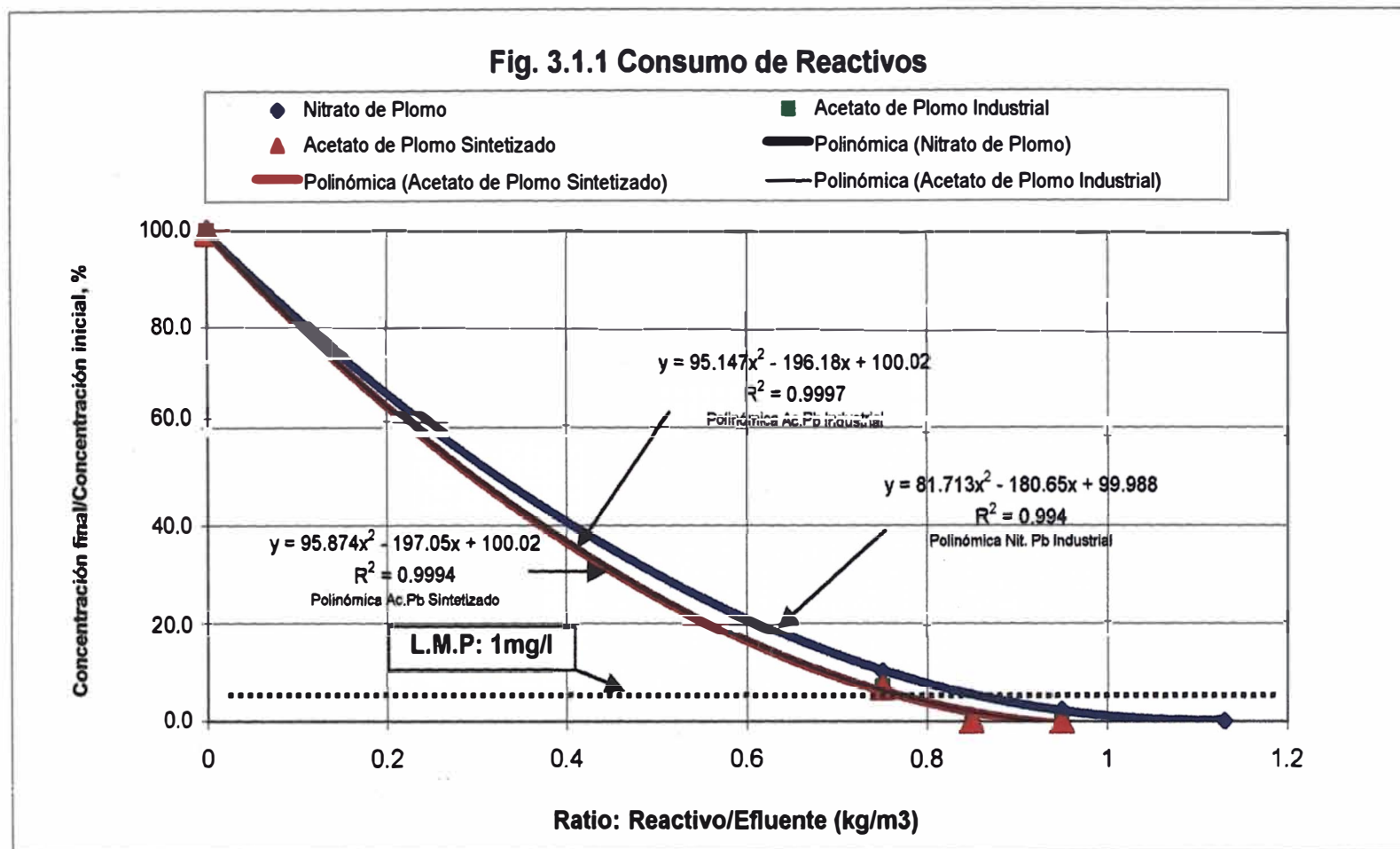


Fig. 3.1.1. Consumo de reactivos. En esta figura se observa la disminución de Cr en el efluente conforme aumenta el ratio: Reactivo/Efluente expresado en kg/m³; esta prueba de consumo de reactivos tuvo la finalidad de encontrar una adición óptima de reactivos para que la concentración final de Cr en el efluente sea menor al Límite máximo Permissible (LMP) que es de 1mg/l, es decir lograr la precipitación de cromo hexavalente como cromato de plomo y por lo tanto eliminar la presencia de este elemento nocivo del efluente. La concentración inicial de Cr tomada como referencia es de 117,4mg/l la cual disminuye hasta valores menores de 0.10mg/l.

previa para obtener una buena separación, ya que los resultados de las pruebas de floculación son muy buenos a tiempos de 5, 10 y 30 minutos muy similares a los resultados obtenidos en la prueba de coagulación/floculación.

En la tabla 3.3.1 se puede observar los resultados de las pruebas de sedimentación (separación sólido-liquido) lograda con asistencia de polímeros, más pruebas como las que se detallan en la tabla 3.3.1 se pueden ver en los Anexos, así como las gráficas de estas, las cuales sustentan los diseños presentados.

Tabla 3.3.1 Pruebas de sedimentación

Prueba de Coagulación/Floculación		Prueba de Floculación		Prueba sin Coagulación y/o Floculación	
t (min)	Vsedimento(cm ³)	t (min)	Vsedimento(cm ³)	t (min)	Vsedimento(cm ³)
0	1000	0	1000	0	1000
1	30	1	33	1	35
2	29	2	31	2	35
5	26	5	28	5	34
10	26	10	27	10	30
30	26	30	27	30	28

Coagulante: Sulfato de Aluminio (10g/l); Floculante: A110 (0.5g/l)

*Prueba Coagulación/Floculación: Ratio Coagulante/Efluente : 1m/l
Ratio Floculante/Efluente : 1m/l*

Prueba Floculación: Ratio Floculante/Efluente : 1m/l

Tiempo de coagulación y/o floculación 1 minuto.

3.4 Caracterización del pigmento.

Después de la separación sólido-líquido se hicieron los análisis respectivos de los pigmentos obtenidos empleando para la precipitación acetato de plomo Q.P. , industrial y sintetizado en laboratorio, dando los resultados que se muestran en la tabla 3.4.1.

Tabla 3.4.1 Análisis Cuantitativo del Pigmento

Acetato	Composición Química Pigmento, %		
	Cr, %	Pb, %	PbCrO ₄ , %
Q.P	15.8	62.9	98.1
Industrial	15.3	60.0	95.0
Sintetizado	15.6	60.4	96.9

Los resultados demuestran la calidad del pigmento, se observa de la tabla 3.3.2 que el pigmento cumple con las características físicas y químicas (incluido color) del pigmento conocido como Medium Chrome Yellow (Pigmento Amarillo Medio de Cromo).

Tabla 3.4.2 Propiedades de los pigmentos de cromo.

Propiedades	Pigmento Lemon Chrome Yellow	Pigmento Deep Chrome Yellow	Pigmento Light Chrome Yellow	Pigmento Orange Chrome Yellow	Pigmento Medium Chrome Yellow	Pigmento Sintetizado
Materia Volátil, %	Máx. 3	Máx. 1	Máx. 2	Máx. 1	Máx. 1	0.10
Materia soluble en agua, %	Máx. 1	Máx. 1	Máx. 1	Máx. 1	Máx. 1	<<. 1
PbCrO ₄ , %	~ 50	~ 85	~ 60	~ 55	~ 90	96.9
pH	5-8	6-8	4-7	6-8	6-8	7.20
-45um, mesh residue	Máx. 0.5	Máx. 0.5	Máx. 0.5	Máx. 0.5	Máx. 0.5	0.0

3.5 Diseño de la Planta de tratamiento de efluentes con contenido de iones cromato.

3.5.1 Esquema de la Planta de tratamiento continuo.

Basado en los resultados de las pruebas de laboratorio, se desarrolló un esquema para la Planta de tratamiento continuo que emplea poca energía y labor. El diseño propuesto consta de 2 tanques y un sedimentador. La figura 3.5.1.1 muestra la disposición de los equipos mencionados.

3.5.2 Balance de Materiales.

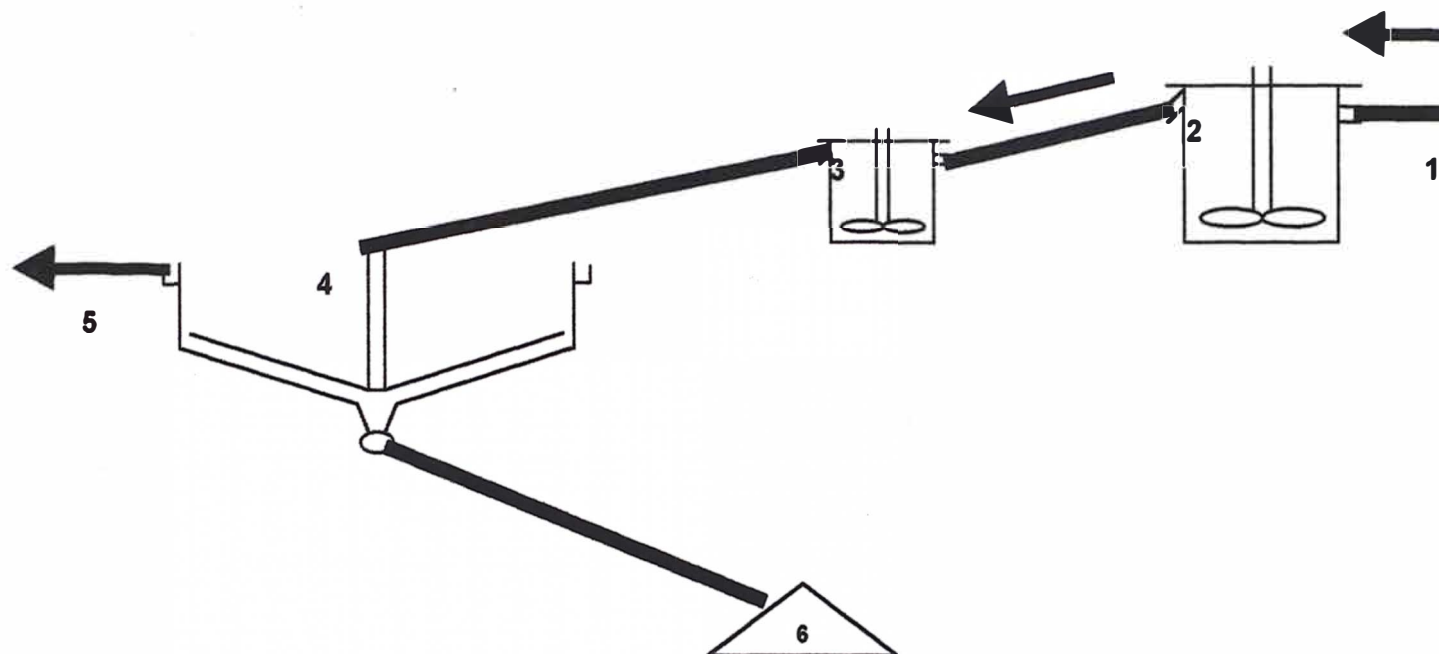
En la figura 3.5.2.1 se presenta diagrama de flujo y balance de materiales del esquema propuesto.

3.5.3 Parámetros de Diseño Básico.

Para el diseño se consideró los siguientes factores:

- Un caudal de diseño equivalente al 50% más del caudal promedio, esto es $840\text{m}^3/\text{día}$.

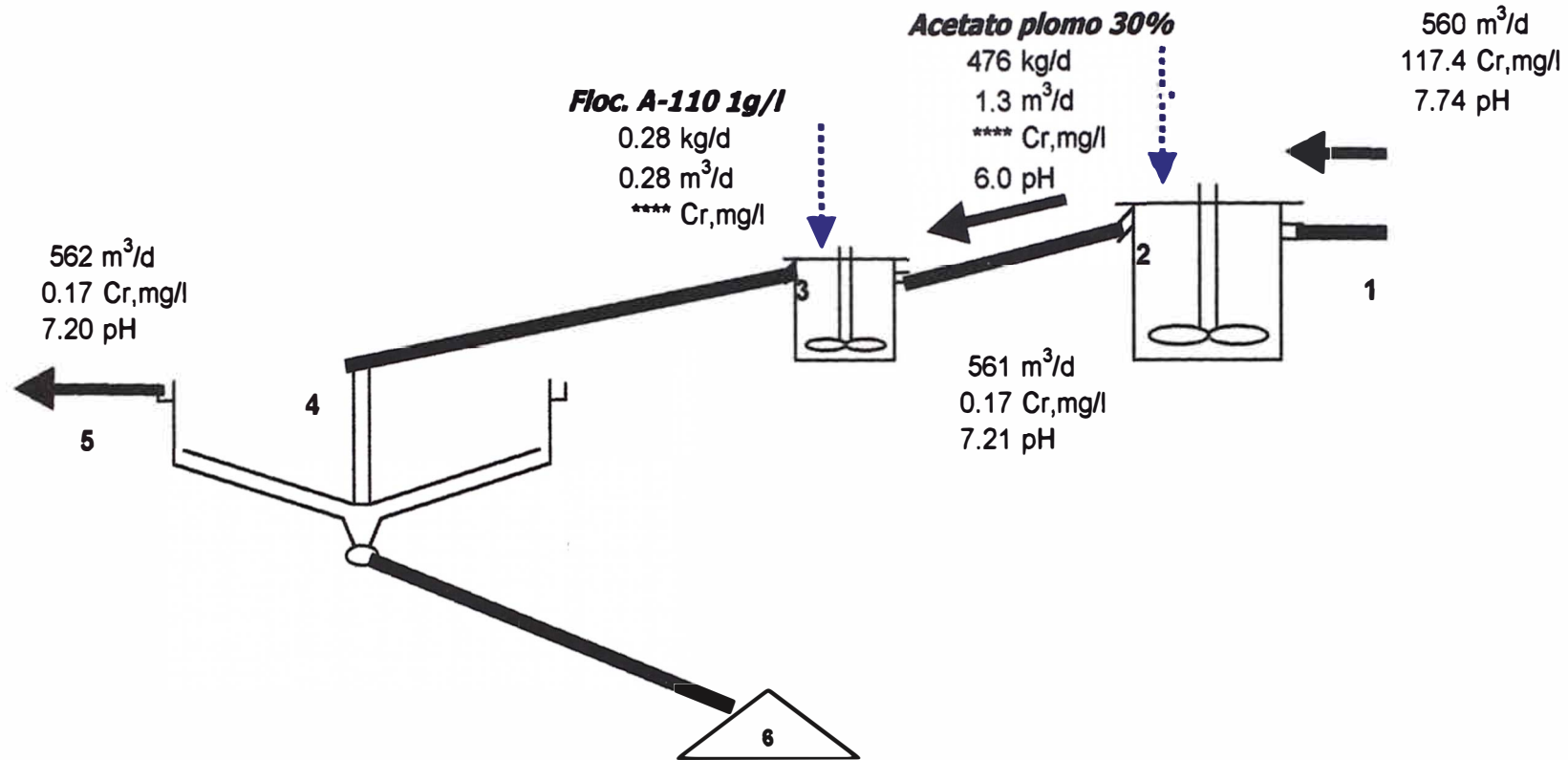
Figura 3.5.1.1 Esquema de la planta de tratamiento continuo - Diseño básico



No	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	Efluente de cromo	*****
2	Tanque de precipitación 6´*6´	1
3	Tanque mezclador 4´*4´	1
4	Sedimentador convencional, 5m*2.4m	1
5	efluente tratado	1
6	Cromato de plomo	*****

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica	
TESIS: "ELIMINACIÓN DE IONES CROMO(VI) CONTENIDOS EN EFLUENTES METALÚRGICOS MEDIANTE SU PRECIPITACIÓN COMO CROMATO DE PLOMO"	
TÍTULO: ESQUEMA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO CONTINUO	
DISEÑO Y DIBUJO: JASON ROMERO TERRONES	
ESCALA: 1/85	FECHA: ENERO 2003

Figura 3.5.2.1 Esquema de la planta de tratamiento continuo - Diseño básico



No	DESCRIPCIÓN	CANT.
1	Efluente de cromo	*****
2	Tanque de precipitación 6'x6'	1
3	Tanque mezclador 4'x4'	1
4	Sedimentador convencional, 5m*2.4m	1
5	efluente tratado	1
6	Cromato de plomo	*****

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA	
Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica	
TESIS: "ELIMINACIÓN DE IONES CROMO(VI) CONTENIDOS EN EFLUENTES METALÚRGICOS MEDIANTE SU PRECIPITACIÓN COMO CROMATO DE PLOMO"	
TÍTULO: ESQUEMA DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO CONTINUO	
DISEÑO Y DIBUJO: JASON ROMERO TERRONES	
ESCALA: 1/85	FECHA: ENERO 2003

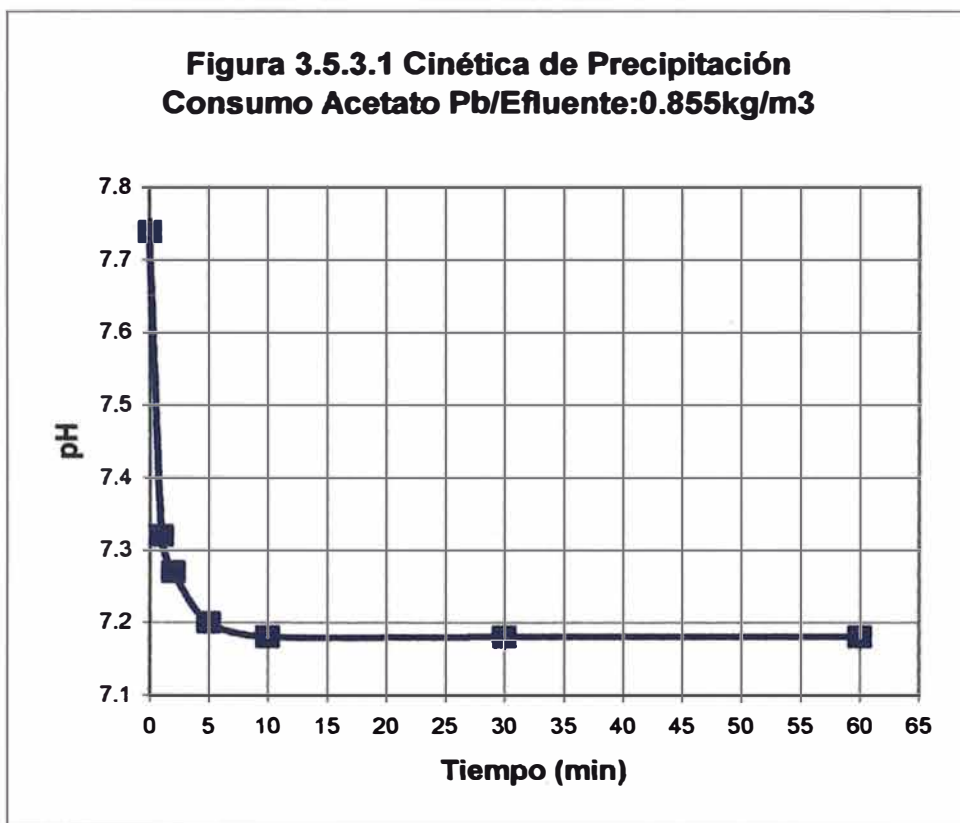


Figura 3.5.3.1 En esta figura se presenta la variación de pH respecto al tiempo después de añadir el acetato de plomo, como se puede observar después de 5 minutos de agitación el pH se mantiene constante por encima de 7.1, cumpliendo con las normas ambientales vigentes, que exigen valores por encima de 5.5. Esta prueba nos permite comprobar la calidad final del agua con un pH de 7.1.

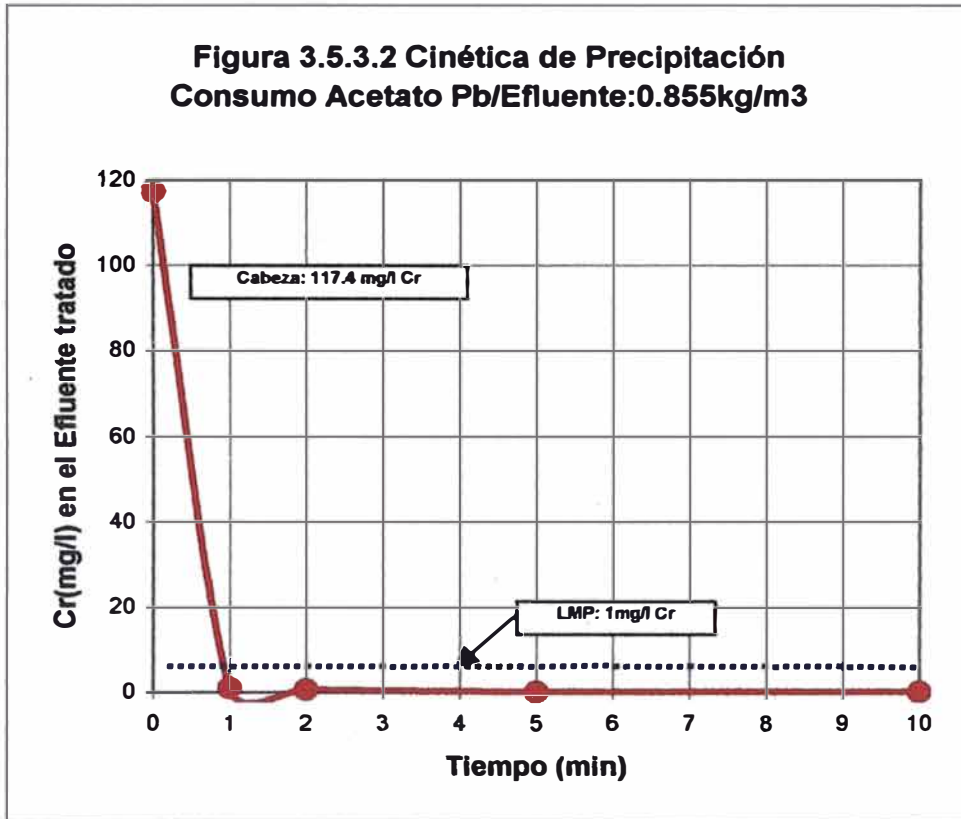


Figura 3.5.3.2 En esta figura se presenta la cinética de precipitación del cromo hexavalente; después de la adición del acetato de plomo se produce la precipitación de cromato de plomo, se observa que la concentración de cromo hexavalente en el efluente disminuye al haber mayor tiempo de agitación. Del gráfico se puede observar que a los 2 minutos de agitación la concentración de cromo está por debajo del LMP.

- Empleo de acetato de plomo como reactivo necesario en la eliminación de cromo. Un pH final mínimo de 7.0 para el efluente final.
- Tiempo corto de reacción esto es (ver figuras 3.5.3.1 y 3.5.3.2):
Precipitación de iones cromato con acetato de plomo: 5 minutos.
Para el diseño este tiempo es 50% más es decir 7.5 minutos.
- Tiempo corto de floculación esto es:
Floculación con A110: 1 minuto.
Para el diseño este tiempo es 50% más, es decir 1.5 minutos.
- Separación sólido-liquido asistida por polímeros (floculante A110), y empleo de sedimentadores convencionales para aprovechar su alta capacidad de retención de sólidos. Para el diseño del sedimentador se consideró 10 minutos de retención en laboratorio y 15 minutos para el diseño final.
- Fácil operación de la Planta, materiales, equipos e instrumentos disponibles en el mercado.
- Flexibilidad del circuito para implementarse su automatización.

3.6 Dimensionamiento y Selección del equipo principal.

Basándose en los resultados de las pruebas el dimensionamiento se empleó un factor de sobredimensionamiento de 1.5 y tablas de diseño (ver Anexo 3). En la tabla 3.6.1 se presenta el equipo básico y las características principales de la Planta de tratamiento continuo.

Tabla 3.6.1
 DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN DEL EQUIPO PRINCIPAL-DISEÑO BÁSICO
 Caudal de Diseño 840m³/d

Descripción	Nº	HP	Dimensiones			T _{RET} , min 840m ³ /d
			D=L, pies	H, pies	V, m ³	
Tanque agitador para Precipitación-Acero Inoxidable	1	3.0	6	6	4.8	7.5
Tanque mezclador	1	1.5	4	4	1.4	1.5
Sedimentador convencional de fierro con bomba de difragma	1	0.5	5	2.4		15
TOTAL		5.0				

CAPITULO IV EVALUACIÓN ECONÓMICA

4.1 Determinación de la inversión.

Para la determinación de la inversión, se tuvo en cuenta el consumo de energía el cual es 5 HP, determinado a partir del caudal de diseño (50% más que el caudal promedio). En la tabla 4.1.1 también se incluye el costo de adquisición e instalación del equipo básico. Se calcula que la construcción de la Planta costará US\$ 40669 referido a su capacidad máxima (840m³/d).

El financiamiento de la inversión se puede lograr con un préstamo a largo plazo con un banco, o autofinanciado con el presupuesto de la empresa que se dirige a protección del medio ambiente.

4.2 Costo de la eliminación de cromo.

En la tabla 4.2.1 se presenta los costos operativos de la eliminación de cromo usando nitrato de plomo y acetato de plomo industrial en donde los costos resultan US\$6.487/m³_{efluente} y US\$2.922/m³_{efluente} respectivamente,

mientras que empleando acetato de plomo sintetizado resulta US\$0.981/m³_{efluente} , es decir, de tres a seis veces más que la opción propuesta, lo que hace factible la utilización de este reactivo sintetizado. En la tabla 4.2.2 se hace una comparación de los beneficios que resultarían de la utilización del reactivo sintetizado, teniendo un precio de venta mínimo (mercado chino) de US\$1.812/kg pigmento, obtendríamos ingresos de alrededor US\$ 96,353 anuales, y con respecto al mercado norteamericano con un precio de venta de US\$ 2.4/kg de pigmento obtendríamos ingresos de aproximadamente US\$ 191,778 anuales, mientras que usando nitrato de plomo y acetato de plomo industrial obtendríamos pérdidas de aproximadamente US\$1'013,699 y US\$295,034 anuales respectivamente. Este factor económico es otra de las ventajas del método propuesto en esta tesis, ya que normalmente los proyectos de tratamientos de aguas contaminadas producen gastos a la empresa mermando las utilidades de esta, mientras que esta alternativa además de solucionar un problema medioambiental produce utilidades a favor de la empresa.

En la figura 4.2.1 se puede observar claramente los beneficios económicos de emplear acetato de plomo sintetizado con respecto a usar acetato de plomo industrial. Se observa que para lograr una concentración de cromo en el efluente tratado de 0.17mg/l, mucho menor al L.M.P (1mg/l) se necesita 0.85kg de acetato de plomo sintetizado por m³ de efluente que da un gasto de US\$0.981 por m³ de efluente, el cual significa que nuestro costo de producción es de US1.218 por kilogramo de pigmento, con lo que se obtiene

una ganancia mínima de US\$0.594 y máxima de US\$1.182 por kilogramo de pigmento vendido.

Considerando un proyecto de 5 años de vida se construyó la tabla 4.2.3 que corresponde a la evaluación económica, donde los valores del VAN y el TIR confirman la factibilidad del proyecto.

Tabla 4.1.1
 COSTO DE INVERSIÓN DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO CONTINUO-DISEÑO BÁSICO
 Caudal de Diseño 840m³/d

Descripción	Nº	HP	Dimensiones			T _{RET} , min 840m ³ /d	Costo, US\$	
			D=L, pies	H, pies	V, m ³		Unitario	Total
Tanque agitador para Precipitación-Acero Inoxidable	1	3.0	6	6	4.8	7.5	12617	12617
Tanque mezclador	1	1.5	4	4	1.4	1.5	5607	5607
Sedimentador convencional de fierro con bomba de diafragma	1	0.5	5	2.4		15	17140	17140
Sub-Total								35364
Instalación(tanques,tuberías,conexiones eléctricas,etc)							10%	3536
Imprevistos							5%	1768
TOTAL		5.0						40669

Tabla 4.2.1 Costos de operación (Eliminación del cromo)

Elemento de costo	Unidades	Tratamiento con nitrato de plomo industrial		Tratamiento con acetato de plomo industrial		Tratamiento con acetato de plomo sintetizado	
		Q Efuyente= 560m ³ /d	Q Efuyente= 840m ³ /d	Q Efuyente= 560m ³ /d	Q Efuyente= 840m ³ /d	Q Efuyente= 560m ³ /d	Q Efuyente= 840m ³ /d
Consumo reactivo	kg/m3	1.13	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
Floculante A-110	g/m3	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Potencia Total	HP	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Costo reactivo	US\$/m3	6.370	4.791	2.805	2.805	0.864	0.864
Consumo Energía	kw-h/m3	0.1600	0.1065	0.1600	0.1065	0.1600	0.1065
Costo Energía	US\$/m3	0.0131	0.0087	0.0131	0.0087	0.0131	0.0087
Mantenimiento	US\$/m3	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010	0.0010
Labor	US\$/m3	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000	0.1000
Floculante A-110	US\$/m3	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030	0.0030
Costo Total	US\$/m3	6.487	4.904	2.922	2.918	0.981	0.976

Tabla 4.2.2 Conveniencia de emplear acetato de plomo sintetizado

	Unidades	Tratamiento con nitrato de plomo industrial		Tratamiento con acetato de plomo industrial		Tratamiento con acetato de plomo sintetizado en laboratorio		
		US\$ 1.812 / kg PbCrO ₄	US\$ 3.0 / kg PbCrO ₄	US\$ 1.812 / kg PbCrO ₄	US\$ 3.0 / kg PbCrO ₄	US\$ 1.812 / kg PbCrO ₄	US\$ 2.4 / kg PbCrO ₄	US\$ 3.0 / kg PbCrO ₄
Producción PbCrO ₄	kg/m ³	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805	0.805
Producción PbCrO ₄	US\$/m ³	1.45866	2.415	1.45866	2.415	1.45866	1.932	2.415
Producción PbCrO ₄	US\$/año	294065.856	486864	294065.856	486864	294065.856	389491.2	486864
Producción PbCrO ₄	t/año	162.288	162.288	162.288	162.288	162.288	162.288	162.288
Consumo Reactivo	g/m ³	1130	1130	850	850	850	850	850
Consumo Reactivo	kg/d	633	633	476	476	476	476	476
Costo Operación	US\$/m ³	6.487	6.487	2.922	2.922	0.98072	0.98072	0.98072
Costo Operación	US\$/año	1307765.088	1307765.09	589099.392	589099.392	197713.152	197713.152	197713.152
Utilidad Anual	US\$/año	-1013699	-820901	-295034	-102235	96353	191778	289151
Costo Producción	US\$/kg PbCrO ₄	8.058	8.058	3.630	3.630	1.218	1.218	1.218

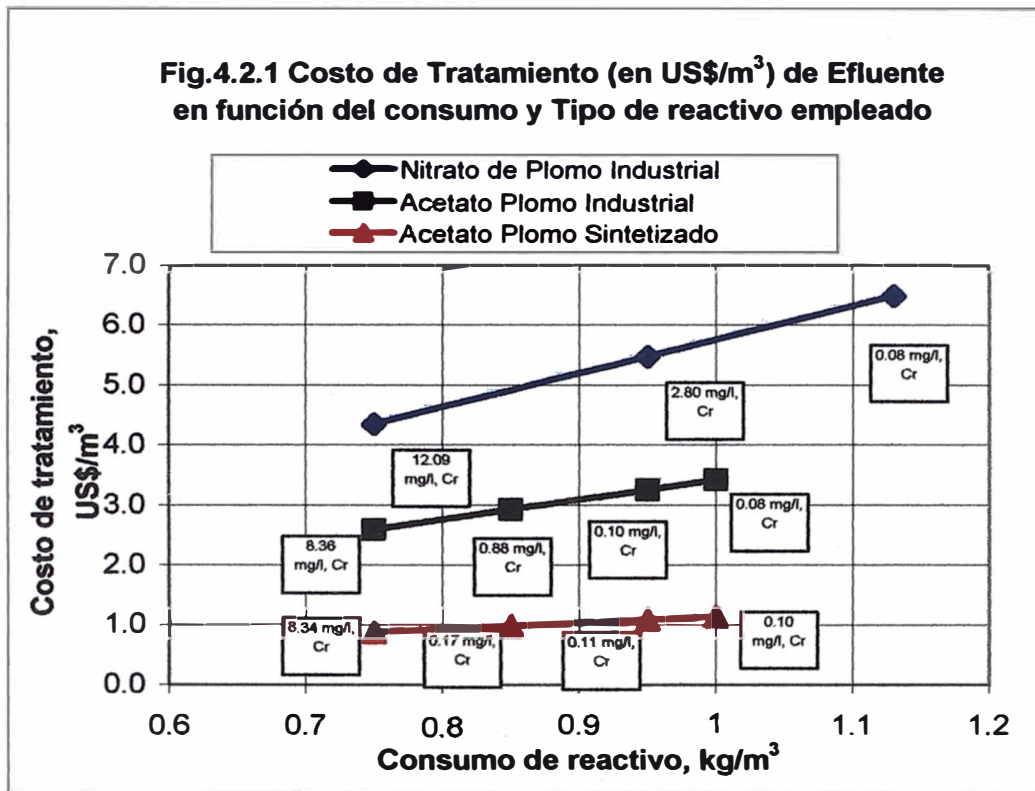


Fig.4.2.1 En esta gráfica se puede observar la conveniencia económica de emplear acetato de plomo sintetizado en el tratamiento del efluente de cromo. Se puede observar que para llegar a los mismos resultados en la eliminación de cromo, los costos de tratamiento empleando otros reactivos son de 3 a 6 veces más caros.

Tabla 4.2.3

Costo de producción:	US\$	230025	Plazo de depreciación (años)	5
Costos administrativos y ventas:	US\$	23003	Valor de rescate de los activos :	0.3 %
Inversión de activos fijos inicial:	US\$	40669	Capital de trabajo inicial	19169 US\$
Vida útil del proyecto:	(años)	5	Tasa de crecimiento del consumo	0 %
			Tasa marginal impositiva :	30 %
			CPPC (Anual) :	15 %

Variables en el tiempo	0	1	2	3	4	5
Consumo		0	0	0	0	0
Capital de trabajo total		19169	19169	19169	19169	19169
Capital de trabajo incremental						
Depreciación		8134	8134	8134	8134	8134

Flujo de capital	0	1	2	3	4	5
Inversión inicial	-40669					
Capital de trabajo	-19169	0	0	0	0	0
Recuperación del C.T.						0
Valor rescate Maq.						12201
Imp. Venta de activo fijo						-3660
Flujo de Caja de Capital	-59838					8541

FLUJO OPERATIVO	0	1	2	3	4	5
Ingresos		294065	294065	294065	294065	294065
Egresos						
Costos totales		253028	253028	253028	253028	253028
Depreciación		8134	8134	8134	8134	8134
Total Egresos		261162	261162	261162	261162	261162
U.A.I.		32904	32904	32904	32904	32904
Distribución Laboral		2632	2632	2632	2632	2632
Impuestos		9081	9081	9081	9081	9081
Utilidad Neta		23822	23822	23822	23822	23822
(-) Distribución Laboral		2632	2632	2632	2632	2632
(+) Depreciación		8134	8134	8134	8134	8134
Fondos Generados		31956	31956	31956	31956	31956
Flujo de caja total	0	1	2	3	4	5
Operativo		31956	31956	31956	31956	31956
De Capitales	-59838	0	0	0	0	8540
Total	-59838	31956	31956	31956	31956	40496

VAN:	\$60,548
TIR:	46.46%

CAPITULO V

ASPECTOS AMBIENTALES

5.1 Calidad de efluentes finales.

En la tabla 5.1.1 se observa el resultado de los análisis cuantitativos del efluente final.

Tabla 5.1.1 resultados análisis cuantitativo efluente final.

Efluente	pH	Concentración, mg/l				
		Cr	Cu	Pb	Zn	Fe
Inicial	7.74	117.4	0.01	0.02	<0.01	<0.01
Final	7.20	0.17	0.01	0.18	<0.01	<0.01
E. Final + Relave	11.0	0.03	<0.01	0.02	<0.01	<0.01
L.M.P	>5.50	1.00	0.50	1.00	3.00	2.00

Se observa en la tabla 5.1.1 que la concentración de los metales en el efluente están muy por debajo de los límites permisibles, además de la reacción entre el acetato de plomo y el efluente que contiene iones cromato, según la ecuación de precipitación 5.1.1 se deduce la formación de acetato de sodio ($\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2$) en el efluente, el cual no es tóxico y además es biodegradable por lo tanto no afecta la calidad del efluente ya tratado.



En la misma tabla se puede observar el resultado de mezclar el efluente tratado con el caudal de relave general que es de 5.5 veces m\u00e1s caudaloso, lo que produce un nuevo efluente con concentraciones aun muy por debajo de los limites permisibles. En el aspecto medioambiental estos resultados confirman la ventaja de emplear esta opci\u00f3n.

5.2 Elaboraci\u00f3n del plan de contingencia durante la operaci\u00f3n.

Normalmente la paralizaci\u00f3n temporal, intempestiva o programada de una Planta de producci\u00f3n, da\u00f1a la rentabilidad de la actividad mas no afecta el entorno ambiental, pero la paralizaci\u00f3n de una Planta de tratamiento como la que se est\u00e1 proponiendo, que procesa un efluente altamente contaminante, afectar\u00e1 severa e inmediatamente el entorno ambiental, pues la contaminaci\u00f3n de una laguna o r\u00edo rehabilitado ser\u00e1 de un impacto mayor que el que se ocasionaba antes de la instalaci\u00f3n de la Planta.

Es por eso el plan de contingencia considera medidas para evitar la paralizaci\u00f3n de la Planta y as\u00ed evitar el vertimiento del efluente contaminante al medio receptor.

A continuaci\u00f3n se presentan las contingencias previsibles y las medidas que se han programado para hacerlas frente.

- **Corte de energía total en la Unidad de Producción.**

Con el corte total de energía se produciría la paralización de la planta concentradora, esto puede ocurrir por cortes programados con anticipación o repentinamente, producido por caídas de torres de alta tensión; en tal caso no habrá suministro de energía en por lo menos 24 horas.

Para ello la acción inmediata es derivar el efluente al Estanque de emergencia de 560m³ suficiente para albergar por 24 horas hasta que el caudal sea cero, ya que la planta no producirá mas efluente fresco y solo rebosará el que está retenido en los espesadores.

- **Aforo o desperfecto de equipos de planta.**

En caso de desperfecto de un tanque este se derivaría al que está en Stand-by o en caso extremo el efluente se derivaría al Estanque de emergencia, hasta la reparación de la falla.

- **Paralización programada para mantenimiento de equipos.**

El mantenimiento preventivo será realizado conjuntamente con el mantenimiento general de la Planta, ya que al paralizar las operaciones no se producirá efluente fresco, por lo tanto el efluente remanente se puede

almacenar en el estanque de emergencia; este mantenimiento será cada 6 meses o de acuerdo al plan general del área de mantenimiento.

- **Destrucción total o parcial de la Planta por sismos.**

En caso de destrucción total la prioridad la tendrán los trabajadores que resulten en un caso hipotético heridos, como la Planta concentradora estaría sin operar solo se procuraría derivar el efluente remanente al estanque de emergencia, en caso de destrucción parcial la primera acción es derivar el efluente al estanque de emergencia hasta normalizar las operaciones.

5.3 Plan de cierre.

La vida útil de la Planta de tratamiento está ligada directamente con la vida de la Planta Concentradora y esta a su vez de la vida de la mina, esto quiere decir que al no tener mineral que procesar tampoco habrá efluente el cual tratar, ya que el generador de este efluente, osea la Planta Concentradora tendría que paralizar sus operaciones o en todo caso cerrar.

Por lo tanto un cierre general de mina involucra finalmente olvidarnos de los problemas de contaminación que ocasionan los efluentes de cromo.

El financiamiento del cierre de operaciones puede financiarse con las ganancias obtenidas por la venta del pigmento producido a lo largo de la vida útil de la Planta.

CONCLUSIONES

- Al ser el efluente de cromo un producto derivado de las plantas concentradoras, los metalurgistas estábamos en la obligación de encontrar propuestas de como resolver este problema, de allí que los resultados obtenidos durante el trabajo de laboratorio, al aplicar la propuesta resultaron de mucha importancia ya que demostraron la factibilidad técnica y económica de esta. Se trata pues de un ejemplo de lo que puede hacerse aplicando el ingenio y la creatividad para estabilizar residuos peligrosos, aplicando “tecnologías limpias” que se adecuan a nuestra realidad.
- Se desarrolló una propuesta económicamente viable, en donde el tratamiento del efluente se auto-financia al obtener un producto comercial, lo que al contrario de otros métodos este produce ganancias mas no gastos.
- Para que la sociedad en general y los industriales o procesadores en particular, tiendan a la creación de procesos “más limpios” y a la reutilización de desechos, es necesario crear una conciencia ecológica. Esto, evidentemente, requiere de mucho tiempo, por ello, al corto plazo,

una opción puede ser la de estabilizar los residuos e incluso generar subproductos útiles (como es el caso de la propuesta presentada en este proyecto) para hacer procesos de estabilización atractivos a los responsables de su generación y consecuentemente de su tratamiento y disposición.

- Los resultados de la operación de tratamiento se muestran en la siguiente tabla

Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Concentración Cr, mg/l		
	Efluente sin tratar	Efluente tratado	Efluente Tratado + Relave
0.85	117.4	0,17	0.03

- La inversión inicial requerida para construir una Planta de tratamiento de efluentes de cromo con un caudal de 560 m³/d es US\$ 40669, siendo un costo muy por debajo a otras plantas de tratamiento que bordean el millón de dólares. El costo de operación anual es de 1.141US\$/m³.
- El producto obtenido del tratamiento es un pigmento cuyo nombre comercial es amarillo medio de cromo, producto muy usado en la industria de la pintura. El año 2001 las importaciones de pigmentos de cromo fueron de aproximadamente 260 toneladas (Fuente: ADUANAS) a un precio de compra promedio de 2.222 US\$/kg, y según cálculos la

planta propuesta produciría anualmente 162 toneladas a un costo de producción de 1.417 US\$/kg, entonces estamos ante un mercado que podría consumir lo que se produciría, además que el precio de venta sería mucho menor.

RECOMENDACIONES

- Los resultados obtenidos pueden ser complementados realizando pruebas piloto.
- Se recomienda tener un control estricto de la concentración de cromo en el efluente, tanto en el efluente que llega a la Planta como el ya tratado, esto se puede realizar implementando un espectrofotómetro en los laboratorios de la planta. Este equipo es de fácil uso y asequible.
- Para tener un pigmento limpio, el efluente previamente debe pasar por unas pozas de sedimentación con un tiempo mínimo de retención de 30 minutos, en donde las partículas en suspensión sedimentan sin la necesidad de floculante.
- Ya que el producto que se ha obtenido es de muy buena calidad y pensando que el mercado peruano podría resultar pequeño, entonces se podría pensar en exportar al mercado de la comunidad andina, ya que estos países son también consumidores de pigmento importado, especialmente el chino y estadounidense, y al encontrar estos un

mercado cercano los precios de exportación e importación bajarían sustancialmente.

- Para reducir los costos de operación, se podría usar concentrados de plomo como el de Compañía Minera SIMSA con una ley de plomo de 63% para la preparación del acetato de plomo, el uso de esta fuente de plomo reduciría los costos de operación de 1.141 US\$/m³ a 0.989 US\$/m³, es decir en un 13.3%, lo que significaría mayores a la empresa.
- Para reducir costos en la instalación de la Planta de tratamiento se puede hacer uso de equipos que la Planta concentradora no esté utilizando, es decir, tanques de flotación fuera de uso, que puedan usarse para la precipitación y floculación, lo que podría reducir los costos de inversión hasta en un 50%, esto es un ahorro de aproximadamente US\$20 000.
- El impacto ocasionado por este efluente en el medio ambiente debe ser completamente entendido por los operadores de la Planta, ya que de ellos depende finalmente el buen desempeño de esta. Se debe tomar las máximas precauciones porque el daño que el vertimiento de aguas contaminadas ocasionen al entorno rehabilitado en el futuro será mucho más severo que el que ocurre actualmente.

BIBLIOGRAFÍA

1. **BAZÚA-DURÁN, María del Carmen;** *“Reutilización de residuos ácidos de cromo, una metodología aplicable en ámbitos académicos e industriales”*, Facultad de Química, UNAM, México, D.F. (1994).
2. **GARRELS, Robert M.; CHRIST, Charles L.** *“ Solutions, Minerals, and Equilibria”*, Segunda edición, EE.UU (1965).
3. **HURLBURT, Cornelius S. Jr.; KLEIN, Cornelis;** *“Manual de Mineralogía de Dana”*, Tercera edición, Editorial Reverté, EE.UU (1985).
4. **IRWIN, Roy; VAN MOUWERICK, Mark; STEVENS, Lynette; SEESE, Marion Dubler, BASHAM, Wendy;** *“Environmental Contaminants Encyclopedia Hexavalent Chromium”* , EE:UU (1997)
5. **KUBASCHEWSKI, O.** *“Material Thermochemistry”*, Sexta Edición (1993).
6. **LANGE, Robert M.,** *“Handbook of Chemistry”*.

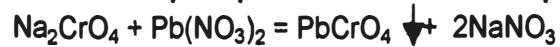
7. **LEVENSPIEL, Octave;** *"Ingeniería de las Reacciones Químicas"*, Segunda Edición, Editorial Reverté (1990).
8. **LONGO, Frederick R.;** *"Química General"*, Primera Edición, Libros Mac Graw Hill de México (1975).
9. **RINGBOOM, A.J. ;** *"Formación de complejos en química analítica"*, Alhambra, S.A. Madrid, España (1979).
10. **VILLACHICA LEÓN, Carlos A.** *"Control de la contaminación de cromo en el efluente de la Planta Concentradora Bema de la Compañía Minera Casapalca"*, Smallvill S.A.C., Lima - Perú (2000).
11. **VILLACHICA LEÓN, Carlos A.** *"Tratamiento de aguas ácidas del efluente del Túnel Victoria"*, Smallvill S.A.C., Lima - Perú (2001).
12. **VOGEL, Arthur,** *"Química Analítica Cualitativa"*, Editorial Kapelusz (1960).

ANEXOS

ANEXO 1

PRUEBAS DE LABORATORIO

Pruebas de precipitación con nitrato de plomo industrial



Serie de pruebas de precipitación comprobándose la reproducibilidad del método

Especificaciones:

Volumen Muestra Efluente: 200ml

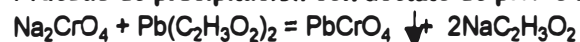
se usó agitador orbital múltiple (shaker) a 300RPM

No	Prueba	Nit.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(NO ₃) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
1	P-NPb1	0.41	5	7.44	43.01	0.45	0.91
2	P-NPb2	0.79	5	7.20	9.71	0.80	0.99
3	P-NPb3	1.13	5	6.67	0.08	1.10	1.03
Cabeza				7.74	117.4		

No	Prueba	Nit.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(NO ₃) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
4	P-NPb4	0.41	5	7.50	42.6	0.46	0.90
5	P-NPb5	0.79	5	7.26	9.52	0.81	0.98
6	P-NPb6	1.13	5	6.70	0.08	1.10	1.03
Cabeza				7.74	117.4		

No	Prueba	Nit.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(NO ₃) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
7	P-NPb7	0.79	5	7.44	9.71	0.80	0.99
8	P-NPb8	1.00	5	7.20	1.81	0.99	1.01
9	P-NPb9	1.13	5	6.67	0.08	1.10	1.03
Cabeza				7.74	117.4		

Pruebas de precipitación con acetato de plomo industrial



Serie de pruebas de precipitación comprobándose la reproducibilidad del método

Especificaciones:

Volumen Muestra Efluente: 200ml

se usó agitador orbital múltiple (shaker) a 300RPM

No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
10	P-AcPb1	0.050	5	7.70	91.08	0.200	0.250
11	P-AcPb2	0.250	5	7.61	56.87	0.425	0.588
12	P-AcPb3	0.500	5	7.57	12.05	0.745	0.671
13	P-AcPb4	0.750	5	7.52	8.40	0.750	1.000
14	P-AcPb5	0.850	5	7.44	0.87	0.825	1.030
15	P-AcPb6	0.950	5	7.20	0.10	0.875	1.086
Cabeza				7.74	117.4		

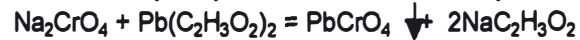
No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
16	P-AcPb7	0.750	5	7.50	8.36	0.753	0.996
17	P-AcPb8	0.850	5	7.40	0.88	0.820	1.037
18	P-AcPb9	0.950	5	7.20	0.10	0.881	1.078
19	P-AcPb10	1.000	5	6.90	0.08	0.927	1.079
Cabeza				7.74	117.4		

No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
20	P-AcPb11	0.750	5	7.52	8.41	0.750	1.000
21	P-AcPb12	0.850	5	7.40	0.87	0.825	1.030
22	P-AcPb13	0.950	5	7.23	0.11	0.875	1.086
23	P-AcPb14	1.000	5	7.00	0.07	0.925	1.081
Cabeza				7.74	117.4		

* El objetivo de estas pruebas fue el de encontrar la cantidad de acetato de plomo que se debe añadir para lograr un efluente libre de cromo hexavalente y por lo tanto cumplir con las normas vigentes.

Al repetirse las pruebas se comprobó además la reproducibilidad del método.

Pruebas de precipitación con acetato de plomo sintetizado en laboratorio



Serie de pruebas de precipitación comprobándose la reproducibilidad del método

Especificaciones:

Volumen Muestra Efluente: 200ml

se usó agitador orbital múltiple (shaker) a 300RPM

No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
24	P-APLab1	0.750	5	7.40	8.34	0.765	0.980
25	P-APLab2	0.850	5	7.21	0.17	0.800	1.063
26	P-APLab3	0.950	5	7.01	0.11	0.865	1.098
27	P-APLab4	1.050	5	6.83	0.10	0.890	1.180
Cabeza				7.74	117.4		

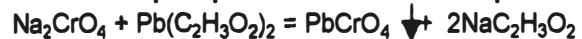
No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
28	P-APLab5	0.750	5	7.45	8.41	0.735	1.020
29	P-APLab6	0.850	5	7.38	0.11	0.780	1.090
30	P-APLab7	0.950	5	7.26	0.19	0.855	1.111
31	P-APLab8	1.050	5	6.89	0.07	0.880	1.193
Cabeza				7.74	117.4		

No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
32	P-APLab9	0.750	5	7.41	8.63	0.730	1.027
33	P-APLab10	0.850	5	7.34	0.13	0.785	1.083
34	P-APLab11	0.950	5	7.19	0.17	0.860	1.105
35	P-APLab12	1.050	5	6.98	0.08	0.890	1.180
Cabeza				7.74	117.4		

* El objetivo de estas pruebas fue el de encontrar la cantidad de acetato de plomo que se debe añadir para lograr un efluente libre de cromo hexavalente y por lo tanto cumplir con las normas vigentes.

Al repetirse las pruebas se comprobó además la reproducibilidad del método.

Pruebas de precipitación con acetato de plomo sintetizado en laboratorio



Serie de pruebas de precipitación comprobándose la reproducibilidad del método

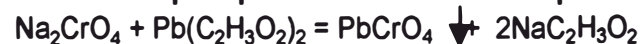
Especificaciones:

Volumen Muestra Efluente: 1000ml

Se usó agitador magnético a 300RPM

No	Prueba	Ac.Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr,mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
36	PR-APLab1	0.85	5	7.21	0.12	0.810	1.049
37	PR-APLab2	0.85	5	7.32	0.17	0.809	1.051
38	PR-APLab3	0.85	5	7.22	0.18	0.809	1.051
39	PR-APLab4	0.85	5	7.19	0.12	0.809	1.050
40	PR-APLab5	0.85	5	7.16	0.09	0.821	1.035
41	PR-APLab6	0.85	5	7.31	0.22	0.798	1.065
42	PR-APLab7	0.85	5	7.26	0.21	0.809	1.051
43	PR-APLab8	0.85	5	7.29	0.19	0.801	1.061
44	PR-APLab9	0.85	5	7.26	0.19	0.795	1.069
45	PR-APLab10	0.85	5	7.36	0.2	0.786	1.081
46	PR-APLab11	0.85	5	7.20	0.14	0.809	1.050
47	PR-APLab12	0.85	5	7.10	0.08	0.810	1.050
48	PR-APLab13	0.85	5	7.37	0.18	0.795	1.069
49	PR-APLab14	0.85	5	7.33	0.18	0.805	1.056
50	PR-APLab15	0.85	5	7.35	0.21	0.809	1.051
51	PR-APLab16	0.85	5	7.31	0.17	0.811	1.048
52	PR-APLab17	0.85	5	7.38	0.18	0.810	1.049
53	PR-APLab18	0.85	5	7.13	0.11	0.810	1.050
54	PR-APLab19	0.85	5	7.30	0.17	0.809	1.051
55	PR-APLab20	0.85	5	7.25	0.13	0.809	1.050
56	PR-APLab21	0.85	5	7.22	0.17	0.809	1.051
57	PR-APLab22	0.85	5	7.36	0.17	0.822	1.034
58	PR-APLab23	0.85	5	7.10	0.08	0.821	1.035
59	PR-APLab24	0.85	5	7.28	0.24	0.783	1.086
60	PR-APLab25	0.85	5	7.36	0.23	0.780	1.090
Cabeza				7.74	117.4		

* Al comprobarse que la cantidad de acetato de plomo que se debe añadir fue de 0.85kg/m³ de efluente, entonces se procedió a repetir esta prueba para confirmar los resultados anteriores, comprobándose la reproducibilidad del método.

Pruebas de precipitación con acetato de plomo sintetizado en laboratorio

Pruebas de precipitación con volúmenes más grandes que las anteriores pruebas, comprobándose la reproducibilidad de las pruebas.

Especificaciones:

Volumen Muestra Efluente: 4000ml

Agitación a 300RPM

No	Prueba	Ac. Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr, mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
61	PR-APLab26	0.85	5	7.11	0.23	0.811	1.048
62	PR-APLab27	0.85	5	7.13	0.17	0.825	1.030
63	PR-APLab28	0.85	5	7.18	0.20	0.821	1.035
64	PR-APLab29	0.85	5	7.14	0.19	0.803	1.059

Especificaciones:

Volumen Muestra Efluente: 6000ml

Agitación a 300RPM

No	Prueba	Ac. Pb/Efluente kg/m ³	Agitación (min)	pH	Cr, mg/l	PbCrO ₄ obt./Efluente kg/m ³	Pb(C ₂ H ₃ O ₂) ₂ /PbCrO ₄ obt. kg/kg
65	PR-APLab30	0.85	5	7.13	0.19	0.817	1.040
66	PR-APLab31	0.85	5	7.16	0.18	0.806	1.055

Pruebas de Sedimentación y Dimensionamiento de espesador

$A_u = T_u / (H_o \times C_o)$

Producción PbCrO4

0.5 TMPD

Ratio Coagulante (Sulfato de Aluminio-10g/l)/Efluente: 1ml/l

$H_u \times C_u = H_o \times C_o$

Ratio Floculante (A110-0.5g/l)/Efluente: 1ml/l

Sedimentación PR-APLab1 Coagulación/Floculación				Sedimentación PR-APLab2 Floculación				Sedimentación PR-APLab3 Sin Coag. y/o Floculación			
t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm
0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9
1	1.08	30	27.9	1	1.18	33	27.9	1	1.26	35	27.9
2	1.04	29	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.26	35	27.9
5	0.93	26	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.22	34	27.9
10	0.93	26	27.9	10	0.97	27	27.9	10	1.08	30	27.9
30	0.93	26	27.9	30	0.97	27	27.9	30	1.01	28	27.9
			27.9				27.9				27.9
V _{muestra} (ml):		1000		V _{muestra} (ml):		1000		V _{muestra} (ml):		1000	
W _{sólidos} (g)		0.8		W _{sólidos} (g)		0.8		W _{sólidos} (g)		0.8	
H _{o,m} =		0.36		H _{o,m} =		0.36		H _{o,m} =		0.36	
C _o =		0.8 g/l		C _o =		0.8 g/l		C _o =		0.8 g/l	
C _o =		0.1 %		C _o =		0.1 %		C _o =		0.1 %	
T _u =		5 min		T _u =		5 min		T _u =		5 min	
(C _u) _{5'} =		31 g/l		(C _u) _{5'} =		28 g/l		(C _u) _{5'} =		24 g/l	
(C _u) _{5'} =		3.0 %		(C _u) _{5'} =		2.8 %		(C _u) _{5'} =		2.3 %	
A _u =		12.09 m ² /T/d		A _u =		12.09 m ² /T/d		A _u =		12.09 m ² /T/d	
D =		2.8 m		D =		2.8 m		D =		2.8 m	
T _u =		10 min		T _u =		10 min		T _u =		10 min	
(C _u) _{10'} =		31 g/l		(C _u) _{10'} =		30 g/l		(C _u) _{10'} =		27 g/l	
(C _u) _{10'} =		3.0 %		(C _u) _{10'} =		2.9 %		(C _u) _{10'} =		2.6 %	
A _u =		24.18 m ² /T/d		A _u =		24.18 m ² /T/d		A _u =		24.18 m ² /T/d	
D =		3.9 m		D =		3.9 m		D =		3.9 m	
T _u =		30 min		T _u =		30 min		T _u =		30 min	
(C _u) _{30'} =		31 g/l		(C _u) _{30'} =		30 g/l		(C _u) _{30'} =		28 g/l	
(C _u) _{30'} =		3.0 %		(C _u) _{30'} =		2.9 %		(C _u) _{30'} =		2.8 %	
A _u =		72.54 m ² /T/d		A _u =		72.54 m ² /T/d		A _u =		72.54 m ² /T/d	
D =		6.8 m		D =		6.8 m		D =		6.8 m	

Pruebas de Sedimentación y Dimensionamiento de espesador

Sedimentación PR-APLab4 Floculación				Sedimentación PR-APLab5 Floculación				Sedimentación PR-APLab6 Floculación				Sedimentación PR-APLab7 Floculación				Sedimentación PR-APLab8 Floculación				Sedimentación PR-APLab9 Floculación			
t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm
0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9
1	1.26	35	27.9	1	1.18	33	27.9	1	1.29	36	27.9	1	1.18	33	27.9	1	1.22	34	27.9	1	1.26	35	27.9
2	1.08	30	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.08	30	27.9
5	0.97	27	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9	5	0.97	27	27.9
10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9
30	0.97	27	27.9	30	0.97	27	27.9	30	0.97	27	27.9	30	0.93	26	27.9	30	0.93	26	27.9	30	0.93	26	27.9
			27.9				27.9				27.9				27.9				27.9				27.9
V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000							
W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8							
H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36							
C _O = 0.8 g/l				C _O = 0.8 g/l				C _O = 0.8 g/l				C _O = 0.8 g/l				C _O = 0.8 g/l							
C _O = 0.1 %				C _O = 0.1 %				C _O = 0.1 %				C _O = 0.1 %				C _O = 0.1 %							
T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min							
(C _U) _{5'} = 30 g/l				(C _U) _{5'} = 28 g/l				(C _U) _{5'} = 28 g/l				(C _U) _{5'} = 28 g/l				(C _U) _{5'} = 28 g/l							
(C _U) _{5'} = 2.9 %				(C _U) _{5'} = 2.8 %				(C _U) _{5'} = 2.8 %				(C _U) _{5'} = 2.8 %				(C _U) _{5'} = 2.8 %							
A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d							
D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m							
T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min							
(C _U) _{10'} = 30 g/l				(C _U) _{10'} = 30 g/l				(C _U) _{10'} = 30 g/l				(C _U) _{10'} = 30 g/l				(C _U) _{10'} = 30 g/l							
(C _U) _{10'} = 2.9 %				(C _U) _{10'} = 2.9 %				(C _U) _{10'} = 2.9 %				(C _U) _{10'} = 2.9 %				(C _U) _{10'} = 2.9 %							
A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d							
D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m							
T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min							
(C _U) _{30'} = 30 g/l				(C _U) _{30'} = 30 g/l				(C _U) _{30'} = 30 g/l				(C _U) _{30'} = 31 g/l				(C _U) _{30'} = 31 g/l							
(C _U) _{30'} = 2.9 %				(C _U) _{30'} = 2.9 %				(C _U) _{30'} = 2.9 %				(C _U) _{30'} = 3.0 %				(C _U) _{30'} = 3.0 %							
A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d							
D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m							

Pruebas de Sedimentación y Dimensionamiento de espesador

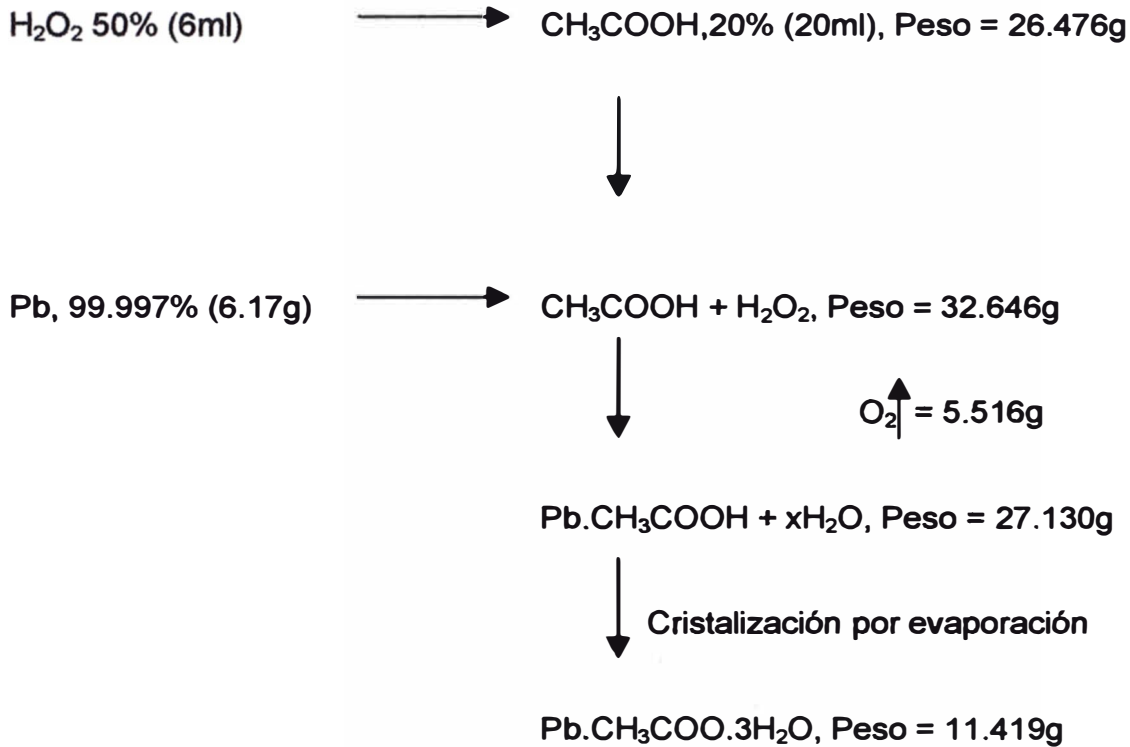
Sedimentación PR-APLab10				Sedimentación PR-APLab11				Sedimentación PR-APLab12				Sedimentación PR-APLab13				Sedimentación PR-APLab14				Sedimentación PR-APLab15			
Floculación				Floculación				Floculación				Floculación				Floculación				Floculación			
t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm
0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9
1	1.22	34	27.9	1	1.18	33	27.9	1	1.26	35	27.9	1	1.26	35	27.9	1	1.20	33	27.9	1	1.19	33	27.9
2	1.15	32	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.11	31	27.9	2	1.13	32	27.9	2	1.04	29	27.9
5	1.04	29	27.9	5	0.97	27	27.9	5	1.08	30	27.9	5	1.04	29	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9
10	1.01	28	27.9	10	0.97	27	27.9	10	1.01	28	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9
30	0.97	27	27.9	30	0.93	26	27.9	30	0.97	27	27.9	30	0.93	26	27.9	30	0.93	26	27.9	30	0.97	27	27.9
			27.9				27.9				27.9				27.9				27.9				27.9
V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000							
W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8							
H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36							
C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l							
C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %							
T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min							
(C _U) ₅ = 28 g/l				(C _U) ₅ = 30 g/l				(C _U) ₅ = 27 g/l				(C _U) ₅ = 28 g/l				(C _U) ₅ = 28 g/l							
(C _U) ₅ = 2.7 %				(C _U) ₅ = 2.9 %				(C _U) ₅ = 2.6 %				(C _U) ₅ = 2.7 %				(C _U) ₅ = 2.8 %							
A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d							
D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m							
T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min							
(C _U) ₁₀ = 28 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l				(C _U) ₁₀ = 28 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l							
(C _U) ₁₀ = 2.8 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %				(C _U) ₁₀ = 2.8 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %							
A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d							
D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m							
T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min							
(C _U) ₃₀ = 30 g/l				(C _U) ₃₀ = 31 g/l				(C _U) ₃₀ = 30 g/l				(C _U) ₃₀ = 31 g/l				(C _U) ₃₀ = 31 g/l							
(C _U) ₃₀ = 2.9 %				(C _U) ₃₀ = 3.0 %				(C _U) ₃₀ = 2.9 %				(C _U) ₃₀ = 3.0 %				(C _U) ₃₀ = 3.0 %							
A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d							
D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m							

Pruebas de Sedimentación y Dimensionamiento de espesador

Sedimentación PR-APLab16				Sedimentación PR-APLab17				Sedimentación PR-APLab18				Sedimentación PR-APLab19				Sedimentación PR-APLab20			
Floculación				Floculación				Floculación				Floculación				Floculación			
t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm	t(min)	H(cm)	Vol(ml)	ml/cm
0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9	0	35.9	1000	27.9
1	1.18	33	27.9	1	1.26	35	27.9	1	1.27	35	27.9	1	1.22	34	27.9	1	1.24	35	27.9
2	1.08	30	27.9	2	1.08	30	27.9	2	1.13	32	27.9	2	1.08	30	27.9	2	1.11	31	27.9
5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.01	28	27.9	5	1.05	29	27.9
10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9	10	0.97	27	27.9
30	0.97	27	27.9	30	0.97	27	27.9	30	0.97	27	27.9	30	0.97	27	27.9	30	0.97	27	27.9
			27.9				27.9				27.9				27.9				27.9
V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000				V _{muestra} (ml): 1000			
W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8				W _{sólidos} (g) 0.8			
H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36				H _{0,m} = 0.36			
C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l				C ₀ = 0.8 g/l			
C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %				C ₀ = 0.1 %			
T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min				T _U = 5 min			
(C _U) ₅ = 28 g/l				(C _U) ₅ = 28 g/l				(C _U) ₅ = 28 g/l				(C _U) ₅ = 28 g/l				(C _U) ₅ = 27 g/l			
(C _U) ₅ = 2.8 %				(C _U) ₅ = 2.8 %				(C _U) ₅ = 2.8 %				(C _U) ₅ = 2.8 %				(C _U) ₅ = 2.7 %			
A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d				A _U = 12.09 m ² /T/d			
D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m				D = 2.8 m			
T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min				T _U = 10 min			
(C _U) ₁₀ = 30 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l				(C _U) ₁₀ = 30 g/l			
(C _U) ₁₀ = 2.9 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %				(C _U) ₁₀ = 2.9 %			
A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d				A _U = 24.18 m ² /T/d			
D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m				D = 3.9 m			
T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min				T _U = 30 min			
(C _U) ₃₀ = 30 g/l				(C _U) ₃₀ = 30 g/l				(C _U) ₃₀ = 30 g/l				(C _U) ₃₀ = 30 g/l				(C _U) ₃₀ = 30 g/l			
(C _U) ₃₀ = 2.9 %				(C _U) ₃₀ = 2.9 %				(C _U) ₃₀ = 2.9 %				(C _U) ₃₀ = 2.9 %				(C _U) ₃₀ = 2.9 %			
A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d				A _U = 72.54 m ² /T/d			
D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m				D = 6.8 m			

ANEXO 2

Diagrama de Sintetización de Acetato de Plomo



Costos de reactivos US\$/kg, Inc. IGV

Pb metálico 99.99%, Centromin	:	0.57
Acido acético 99%, Quimex	:	1.18
H_2O_2 50%, Comercial Líder	:	0.52

Costo de Sintetización US\$/kg

<u>Reactivo</u>	<u>Costo Unitario, US\$</u>	<u>Costo relativo, %</u>
Pb metálico	0.00352	30.3
Acido Acético	0.00472	40.7
H_2O_2	0.00336	29.0
Total	0.01160	100.0

Costo de $\text{Pb} \cdot \text{CH}_3\text{COO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, US\$/kg: 1.016

ANEXO 3
TABLAS DE DISEÑO

AGITADORES

Tipo de Mecanismo	%Sólidos en Peso	G.E. del sólido	G.E. del líquido	Tamaño de partículas
Extraliviano	10	2.5	1.1	-150 mallas
Liviano	20	3	1.1	-100 mallas
Estándar	25	3	1.15	-65 mallas
Pesado	50	4	1.2	-28 mallas

Tamaño del agitador			Propulsor de turbina			Motor	Velocidad Reductor	Radio	Diámetro del eje
Servicio Ligero Motor HP	Servicio Mediano Motor HP	Servicio Pesado Motor HP	Diámetro	100% pitch RPM	150% pitch RPM	RPM	Nº		
4' 4'	3' 3'		12"	376	286	1800	3	5/1	1-7/16"
5' 5'	4' 4'	3' 3'	12"	376	286	1800	3.5	5/1	1-11/16"
6' 6'	5' 5'	4' 4'	18"	254	193	1800	3.5	5/1	1-11/16"
7' 7'	6' 6'	5' 5'	18"	254	193	1800	3.5	5/1	1-11/16"
8' 8'	7' 7'	6' 6'	24"	190	141	1800	4	5/1	2-3/16"
10' 10'	8' 8'	7' 7'	24"	190	141	1800	5	5/1	2-3/16"
12' 12'	10' 10'	8' 8'	30"	155	116	1800	5	5/1	2-3/16"
14' 14'	12' 12'	10' 10'	36"	126	97	1800	6	5/1	2-7/16"
16' 16'	14' 14'	12' 12'	42"	109	82	1800	7	5/1	2-15/16"

Agitadores con Hélice MIL

Utilice propulsores MIL (bajo empuje) para 1200 RPM

Diámetro del Tubo de aire	Tamaño del Agitador	Propulsor MIL		Eje Diámetro	Motor		Fajas	Trans. Fajas en V	
		Diámetro	RPM		HP	RPM		Motor	Accesorios
16"	3' x 3'	12"	376	1 - 15/16"	1	1800	(2)3V - 750	4.12	19
16"	4' x 4'	12"	376	1 - 15/16"	1	1800	(2)3V - 750	4.12	19
23"	5' x 5'	18"	254	1 - 15/16"	2	1800	(2)3V - 850	2.80	19
23"	6' x 6'	18"	254	1 - 15/16"	2	1800	(2)3V - 850	2.80	19
29"	7' x 7'	24"	190	2 - 15/16"	3	1200	(3)3V - 850	3.15	19
29"	8' x 8'	24"	190	2 - 15/16"	3	1200	(3)3V - 850	3.15	19
37"	10' x 10'	30"	155	2 - 15/16"	5	900	(3)3V - 1250	6.00	33
44"	12' x 12'	36"	129	2 - 15/16"	7 1/2	900	(3)3V - 1250	5.00	33
51"	13' x 13'	42"	109	2 - 15/16"	10	720	(2)5V - 2000	8.00	50
51"	14' x 14'	42"	109	2 - 15/16"	10	720	(2)5V - 2000	8.00	50

Utilice propulsores MIL 9 (alto empuje) para 900 RPM

Tamaño del Agitador	Propulsor MIL		Eje Diámetro	Motor		Fajas	Trans. Fajas en V	
	Diámetro	RPM		HP	RPM		Motor	Accesorios
3' x 3'	12"	286	1 - 15/16"	1	1800	(2)3V - 750	3.15	19.0
4' x 4'	12"	286	1 - 15/16"	1	1800	(2)3V - 750	3.15	19.0
5' x 5'	18"	193	1 - 15/16"	2	1800	(2)3V - 950	2.80	25.0
6' x 6'	18"	193	1 - 15/16"	2	1800	(2)3V - 950	2.80	25.0
7' x 7'	24"	141	2 - 15/16"	3	1200	(3)3V - 1180	4.12	33.5
8' x 8'	24"	141	2 - 15/16"	3	1200	(3)3V - 1180	4.12	3.5
10' x 10'	30"	116	2 - 15/16"	5	900	(3)3V - 1180	4.50	33.5
12' x 12'	36"	97	2 - 15/16"	7 1/2	600	(3)5V - 2120	8.50	50.0
13' x 13'	42"	Utilice agitadores con reductores						
14' x 14'	42"							

Potencia requerida por el motor

Tamaño de la Bomba		Gravedad específica de la pulpa				
		1.0	1.2	1.5	2.0	2.3
1"	Simplex	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	Duplex	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4
1 1/2"	Simplex	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2
	Duplex	1/2	3/4	3/4	3/4	3/4
2"	Simplex	1/2	1/2	1/2	3/4	3/4
	Duplex	3/4	3/4	3/4	1	1 1/2
3"	Simplex	1/2	3/4	3/4	1	1
	Duplex	1	1	1 1/2	2	2
4"	Simplex	3/4	1	1	1 1/2	1 1/2
	Duplex	1 1/2	2	2	3	3
5"	Simplex	1 1/2	1 1/2	2	3	3
	Duplex	3	3	5	5	7 1/2
6"	Simplex	2	2	3	5	5
	Duplex	5	5	5	7 1/2	7 1/2
8"	Simplex	3	5	5	7 1/2	7 1/2
	Duplex	7 1/2	7 1/2	10	15	15
10"	Simplex	5	7 1/2	7 1/2	10	10
	Duplex	10	15	15	20	20

Profundidades Estándares del Espesador

Diámetro del Espesador (m)	1.5	1.8	2.4	3.0	3.5-5.5	6-15	16-23	24-26	27-38	38-42	43-46	47-49	50-52	53-55
Profundidad estándar (m) (en el centro)	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.6	4.6	5.2	5.5	5.8	7.0	7.3	7.6
Profundidad mínima (m) (en el centro)	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.7	3.0	4.3	4.9	4.9	5.2	5.8	6.4	6.7

Utilice profundidad estándar en flujos volumétricos de alimentación más grandes a $1.2 \text{ m}^3/\text{h}$ por m^2 de área de espesador.

Para flujos más pequeños utilice profundidad mínima.

Todas las profundidades asumen los rastrillos a 0.6m del cono.

Especificaciones de las bombas de Diafragma

Tamaño y Tipo de Bomba		Capacidad de agua GPM Carrera mínima	Capacidad de agua GPM Carrera máxima	Potencia del motor	Carreras por minuto	Peso en libras
1"	Simplex	2 1/2	6	1/2	45	360
	Duplex	5	12	3/4	45	575
1 1/2"	Simplex	5	12	1/2	45	360
	Duplex	10	24	1/2	45	575
2"	Simplex	11	25	1/2	45	480
	Duplex	22	50	3/4	45	830
3"	Simplex	20	46	3/4	45	480
	Duplex	40	92	1	45	830
4"	Simplex	25	70	1	45	765
	Duplex	50	140	2	45	1265
5"	Simplex	65	130	2	35	2915
	Duplex	130	260	3	35	4686
6"	Simplex	90	180	3	35	2915
	Duplex	180	360	5	35	4686
8"	Simplex	165	330	5	30	5700
	Duplex	330	660	7 1/2	30	9490
10"	Simplex	250	500	5	30	5700
	Duplex	500	1000	10	30	9490

Capacidades de las bombas en TC por hora a un % de sólidos, máxima carrera y velocidad normal

G.E del sólido seco	1.4	1.4	2.7	2.7	2.7	4.2	4.2	4.2	5	5
Densidad de pulpa	1.129	1.167	1.337	1.459	1.607	1.615	1.842	2.143	1.923	2.273
% Sólidos	40	50	40	50	60	50	60	70	60	70

Tamaño de bomba	Tipo	RPM	Ajuste de carrera											
1"	Simplex	45	1 1/2" - 3/4"	0.65	0.80	0.78	1.01	1.25	1.11	1.42	1.82	1.52	2.00	
	Duplex	45	1 1/2" - 3/4"	1.30	1.60	1.56	2.02	2.50	2.22	2.84	3.64	3.04	4.00	
1 1/2"	Simplex	45	1 3/4" - 7/8"	1.30	1.58	1.56	1.99	2.50	2.17	2.83	3.63	3.06	4.00	
	Duplex	45	1 3/4" - 7/8"	2.60	3.16	3.12	3.98	5.00	4.34	5.66	7.26	6.12	8.00	
2"	Simplex	45	1 1/2" - 3/4"	2.70	3.30	3.22	4.16	5.12	4.58	5.83	7.58	6.25	8.33	
	Duplex	45	1 1/2" - 3/4"	5.40	6.60	6.44	8.32	10.24	9.16	11.66	15.16	12.50	16.66	
3"	Simplex	45	2 1/2" - 1 1/4"	4.96	6.04	5.92	7.62	9.33	8.33	10.50	13.60	11.30	15.00	
	Duplex	45	2 1/2" - 1 1/4"	9.92	12.08	11.84	15.24	18.66	16.66	21.00	27.20	22.60	30.00	
4"	Simplex	45	3" - 1 1/2"	7.66	9.33	9.12	11.80	14.70	12.90	16.70	21.40	17.80	23.30	
	Duplex	45	3" - 1 1/2"	15.32	18.66	18.24	23.60	29.40	25.80	33.40	42.80	35.60	46.60	
5"	Simplex	35	3 1/2 - 1 3/4"	14.20	17.40	16.90	21.90	26.90	24.00	30.50	39.40	32.70	43.30	
	Duplex	35	3 1/2 - 1 3/4"	28.40	34.80	33.80	43.80	53.80	48.00	61.00	78.80	65.40	86.60	
6"	Simplex	35	4" - 2"	17.60	23.90	22.40	30.50	37.50	33.00	42.50	54.60	45.40	60.00	
	Duplex	35	4" - 2"	35.20	47.80	44.80	61.00	75.00	66.00	85.00	109.20	90.80	120.00	
8"	Simplex	30	6" - 3"	36.00	44.00	43.00	56.00	69.00	61.00	78.00	100.00	84.00	110.00	
	Duplex	30	6" - 3"	72.00	88.00	86.00	112.00	138.00	122.00	156.00	200.00	168.00	220.00	
10"	Simplex	30	8" - 4"	54.60	66.00	65.00	84.00	104.00	92.00	118.00	152.00	126.00	167.00	
	Duplex	30	8" - 4"	109.20	132.00	130.00	168.00	208.00	184.00	238.00	304.00	252.00	334.00	

ANEXO 4

FOTOGRAFÍAS

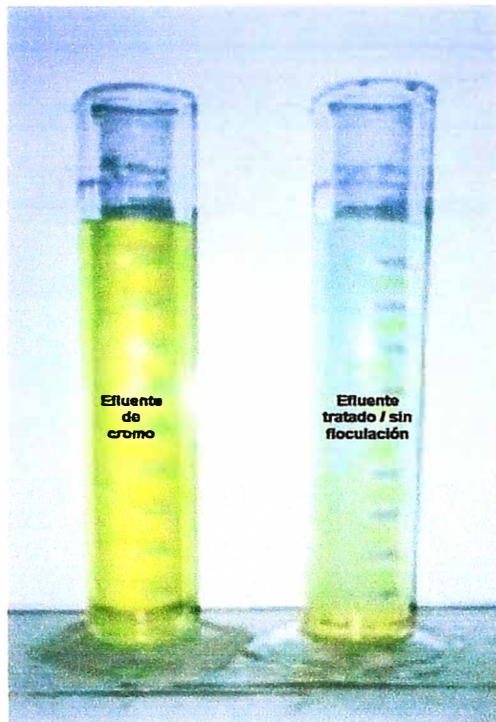


Realización de las pruebas de precipitación de cromato de plomo

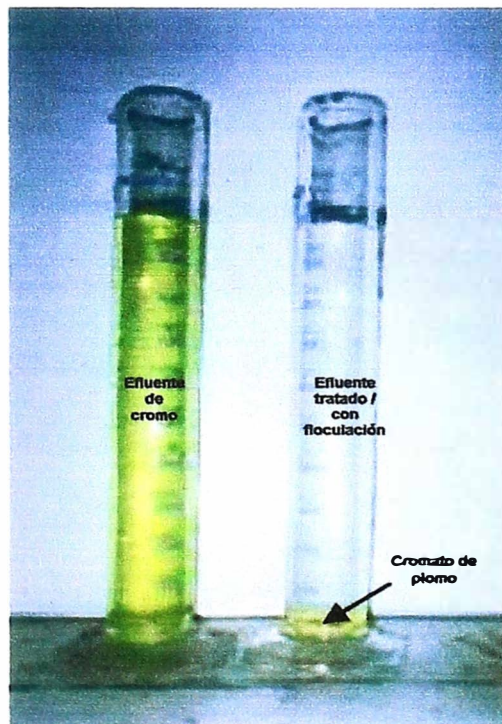


Agitador orbital múltiple (shaker)

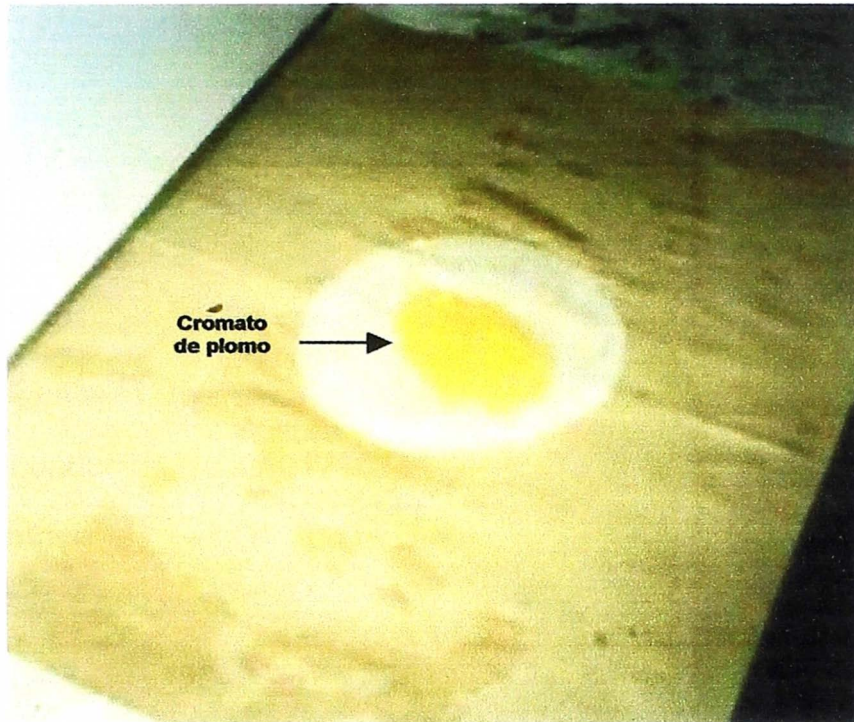
Precipitación de cromato de plomo en agitador orbital múltiple



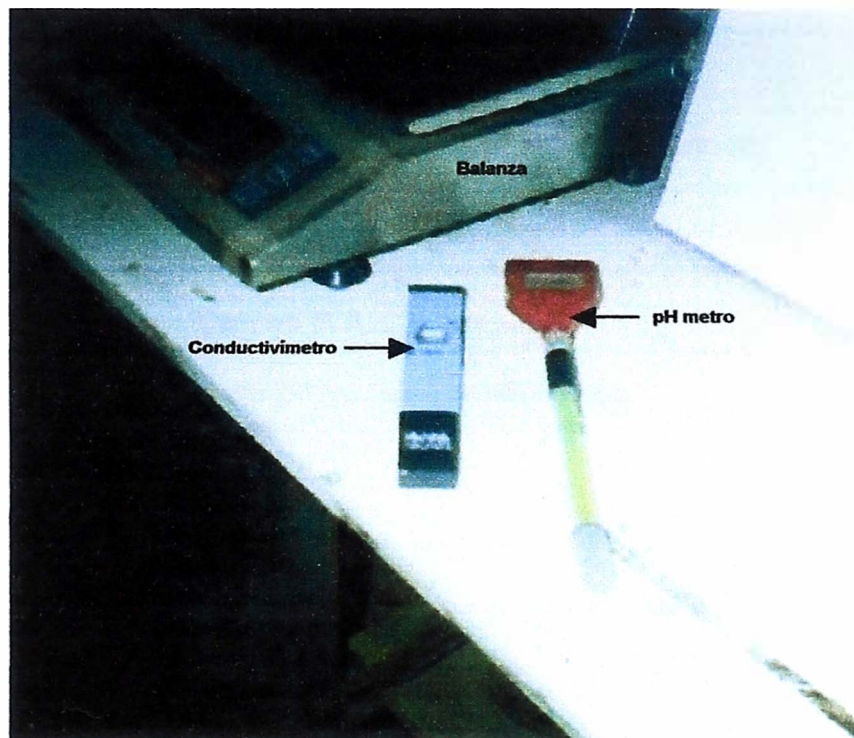
Sedimentación del cromato de plomo, sin floculación.



Sedimentación del cromato de plomo, con floculación.



Pigmento amarillo de cromo



Equipo de medición