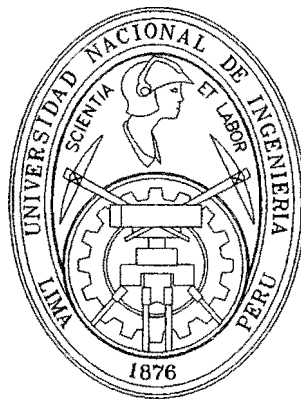


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y MANUFACTURERA**



**EMPLEO DE ARCILLAS MODIFICADAS EN EL  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES GALVÁNICOS**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTADO POR**

**GODOFREDO RUBEN HERNÁNDEZ PEVES**

**JANET ROJAS OROSCO**

**LIMA – PERÚ**

**2001**

**A Dios , a mis padres y hermanos**

**Rubén**

**Con mucho amor y gratitud dedico este trabajo a Dios, a mis padres  
Cristina y Víctor y a mi esposo Ricardo.**

**Janet**

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a nuestra asesora Dra. María del Rosario Sun Kou por haber compartido con nosotros sus valiosos conocimientos en esta área de investigación, así como por su orientación y ayuda brindada en todo este tiempo.

A los siguientes profesores y personal administrativo de la Facultad de Ingeniería Química y Manufacturera – UNI: Ing. Warren Reátegui, Ing. Enrique Neira y Sra. Soledad Viza por su ayuda prestada en la ejecución de este trabajo.

Al Instituto Peruano de Energía Nuclear IPEN, en especial a la Ing. Paula Olivera, Ing. Eduardo Montoya e Ing. Blanca Torres por la realización de los análisis de composición química mediante Activación Neutrónica de las muestras que forman parte de esta investigación.

## INDICE

I. INTRODUCCIÓN.....	8
II. RESÚMEN.....	12
III. LA INDUSTRIA GALVÁNICA.....	16
III.1. Procesos y Fuentes de Contaminación.....	17
III.2. Efectos en el Medio Ambiente y la Salud.....	23
III.3. Legislación Peruana.....	30
III.4. Límites de Contaminación.....	34
III.5. Tratamientos Convencionales de Efluentes Galvánicos..	37
III.5.1. Tratamiento de Cianuros.....	39
III.5.2. Tratamiento de Cromo Hexavalente.....	41
III.5.3. Precipitación con Hidróxidos.....	42
III.6. Empleo de Arcillas Modificadas como alternativa en el Tratamiento de Efluentes.....	44
IV. TÉCNICAS EXPERIMENTALES.....	47
IV.1. Activación Neutrónica.....	48
IV.2. Adsorción – Desorción de N <sub>2</sub> .....	50
IV.3. Difracción de Rayos X (DRX).....	51
IV.4. Espectroscopía Infrarroja.....	51
IV.5. Espectroscopía Ultravioleta – Visible.....	52

<b>V. MATERIALES.</b> .....	<b>53</b>
<b>V.1. Bentonita – Generalidades.</b> .....	<b>54</b>
<b>V.1.1. Características de la materia prima.</b> .....	<b>57</b>
<b>V.2. Tratamientos de modificación de la arcilla.</b> .....	<b>64</b>
<b>V.2.1. Tratamiento Termoácido.</b> .....	<b>65</b>
<b>V.2.2. Apilaramiento.</b> .....	<b>67</b>
<b>V.3. Caracterización de las arcillas modificadas.</b> .....	<b>69</b>
<b>V.3.1. Análisis Elemental.</b> .....	<b>69</b>
<b>V.3.2. Análisis Mineralógico.</b> .....	<b>70</b>
<b>V.3.3. Análisis Textural.</b> .....	<b>73</b>
<b>V.3.4. Análisis Estructural.</b> .....	<b>74</b>
<b>VI. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCIÓN DE CROMO, COBRE, NÍQUEL Y ZINC EN ARCILLAS MODIFICADAS.</b> .....	<b>76</b>
<b>VI.1. Soluciones de la miniplanta instalada en el Laboratorio         de Electroquímica FIQM – UNI.</b> .....	<b>78</b>
<b>VI.2. Soluciones provenientes de una Planta Industrial.</b> .....	<b>85</b>
<b>VI.3. Ensayos con mezclas de Efluentes.</b> .....	<b>96</b>
<b>VI.4. Caracterización de la arcilla después del contacto con         el efluente.</b> .....	<b>103</b>
<b>VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS.</b> .....	<b>109</b>
<b>VII.1. Preferencia del ión metálico por un tipo de arcilla         modificada.</b> .....	<b>110</b>

<b>VII.2. Determinación de las condiciones óptimas de adsorción.</b> .....	<b>114</b>
<b>VII.2.1 Tiempo de mayor adsorción.</b> .....	<b>114</b>
<b>VII.2.2 Influencia del pH en el proceso de adsorción.</b> . . .	<b>115</b>
<b>VII.3. Mezclas.</b> .....	<b>118</b>
<b>VII.4. Arcillas después del contacto con el efluente.</b> .....	<b>120</b>
<b>VIII. DISEÑO Y COSTOS DE UNA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES GALVÁNICOS EMPLEANDO ARCILLAS MODIFICADAS.</b> .....	<b>129</b>
<b>VIII.1 Diseño del Proyecto.</b> .....	<b>130</b>
<b>VIII.1.1 Importancia del Proyecto.</b> .....	<b>130</b>
<b>VIII.1.2 Descripción del proceso seleccionado.</b> .....	<b>131</b>
<b>VIII.1.2.1 Planteamiento de los parámetros de Diseño.</b> .....	<b>131</b>
<b>VIII.1.2.2 Descripción del proceso.</b> .....	<b>133</b>
<b>Primera etapa: Eliminación de cianuros, Reducción de Cr (VI), tratamiento de aguas ácidas y neutralización - precipitación.</b> .....	<b>133</b>
<b>Segunda etapa: Tratamiento con arcilla modificada.</b> .....	<b>136</b>
<b>VIII.1.2.3 Diseño de equipos del proceso.</b> .....	<b>139</b>

VIII.1.3 Distribución de Planta. ....	139
VIII.2 Costos. ....	144
VIII.2.1 Inversión de Capital Fijo. ....	144
VIII.2.2 Costos de operación. ....	144
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	149
IX.1. Conclusiones. ....	150
IX.2. Recomendaciones. ....	152
X. GLOSARIO. ....	153
XI. BIBLIOGRAFÍA. ....	158
XII ANEXOS. ....	163
XII.1. Plantas Galvánicas por Distritos en la Provincia de Lima. ....	164
XII.2. Datos Experimentales del Equipo BET. ....	165
XII.3. Espaciado Basal de compuestos según fichas ASTM. .	179
XII.4. Curvas de Calibración del Cromo, Cobre, Níquel y Zinc para análisis por Espectroscopía Ultravioleta. ...	182
XII.5 Eliminación de interferencias para la determinación de cianuros y Cr (VI). ....	191
XII.6 Cálculos para el Diseño y Costo de equipos. ....	193

## **I. INTRODUCCIÓN**



## I. INTRODUCCIÓN

Según estadísticas del Ministerio de Industria, Turismo e Integración hasta Octubre de 1999 existían más de 1400 establecimientos galvánicos registrados en la Ciudad de Lima (Tabla N° XII.1). Estos establecimientos en su mayoría de pequeña y mediana capacidad productiva no cuentan con un tratamiento final de sus efluentes posterior al proceso de galvanizado, por dicha razón representan un peligro potencial para la salud humana y el medio ambiente, por contener sustancias tóxicas: cianuros, metales pesados, etc, que afectan el ecosistema (García, 1997).

Existen varias técnicas convencionales como neutralización precipitación (De Lora, 1978), que reducen los contaminantes a niveles bajos, pero no se ha logrado hasta el momento eliminarlos en su totalidad. Surge entonces la necesidad de utilizar otras técnicas (como el intercambio iónico y la adsorción) que permitan lograr dicho fin. Sobre esta última técnica, existen muchos trabajos que actualmente

experimentan con nuevos materiales que tengan características texturales y de acidez adecuadas para ser empleadas como adsorbentes en la retención de metales pesados, y que además sean baratos y abundantes, tales materiales pueden ser: arcillas, zeolitas, carbón activado, etc; de los cuales la arcilla es para nosotros de especial interés por ser una materia prima abundante en el país y además porque este material presenta muchas propiedades poco conocidas como: capacidad de cambio catiónico, acidez y área superficial, que pueden ser potenciadas a través de diversos tratamientos (Sun Kou, 1996), y utilizarse como adsorbentes de metales y otras sustancias.

En la literatura hay numerosos artículos relativos a las arcillas, así tenemos: Helios-Rybicke (Helios-Rybicke, 1983) estudiaron la adsorción de zinc, cadmio y magnesio en arcillas tipo montmorillonitas, beidellitas, illitas y caolinitas; ellos encontraron que usando arcillas de la serie esmectitas se conseguía entre un 80 % a 90 % de remoción de dichos metales. Srivastava (Srivastava, 1989) encontró que la montmorillonita es mejor adsorbente para el Pb (II) y Cd (II), comparada con la caolinita. Barnes, et al. (Barnes, Dorairaja y Zela, 1990) utilizaron caolinitas y bentonitas para la remoción de cromo en los desechos del Estado de New Jersey, encontrando que las bentonitas adsorben mejor el cromo que las caolinitas a pH bajos. Viraraghavan et al. (Viraraghavan y Kapoor, 1993) usaron bentonitas para remover mercurio de desechos municipales.

A nivel nacional, son pocas las investigaciones de aplicación de materiales arcillosos en el tratamiento de efluentes. Así, Lechuga (Lechuga, 1996) hizo el estudio de la remoción de Hg (II) utilizando una bentonita peruana. Así también, Fayad (Fayad,1998), realizó un estudio para la adsorción de cromo de efluentes de una curtiembre con arcillas activadas.

En base a todas estas investigaciones y teniendo en cuenta que en el Perú existen importantes depósitos naturales de arcilla del tipo bentonita, el presente trabajo pretende estudiar el uso de una arcilla nacional para la remoción de metales pesados provenientes de efluentes galvánicos y darle un mayor valor agregado a este material, que tras previa purificación y aplicación de dos procesos de transformación: tratamiento termoácido y apilamiento con aluminio, pueda aplicarse como adsorbente de metales contenidos en efluentes industriales.

## **II. RESÚMEN**

## II. RESÚMEN

Esta investigación tiene por finalidad el uso de arcillas modificadas, que tras previa purificación y mediante un tratamiento termoácido o con la introducción de oligocaciones de aluminio entre las láminas, proceso conocido en la literatura como PILC (Pillared Interlayer Clay), sirvan como adsorbentes en la retención de metales pesados contenidos en los efluentes de una miniplanta industrial galvánica.

Se ha experimentado con una bentonita nacional, tomando muestras de efluentes de: a) soluciones de una miniplanta galvánica instalada en el Laboratorio de Electroquímica FIQM-UNI y b) muestras provenientes de una planta galvánica industrial.

El proceso se realizó a escala Batch, tomando en consideración variables como: concentración del metal a adsorber, tiempo, pH, cantidad de arcilla y volumen de efluente. Los metales estudiados fueron cromo, cobre, níquel y zinc. Para cada metal se realizaron ensayos de adsorción

similares, tanto con la arcilla termoactivada como con la apilarada, para determinar la selectividad de cada uno de los metales en un tipo de arcilla modificada. Los resultados mostraron que existe una mayor retención por parte de la arcilla termoactivada para los metales Cr (III) y Cu (II) con tiempos de contacto de 12 y 10 horas respectivamente y a pH = 3 - 3.5 en ambos casos. Por otra parte, la arcilla apilarada mostró mayor retención del Ni (II) y Zn (II) contenidos en los efluentes, con tiempos de contacto de 10 y 12 horas y a pH en el rango de 5 - 5.5 en ambos metales. Esta selectividad también se cumplió en soluciones que contenían mezclas de metales.

Se observó que la variable que más afecta a la retención metálica por la arcilla modificada es el pH de la solución, debido a la posibilidad de formación de diversos complejos metálicos acuosos que se forman a diferentes pH. Se aplicaron diversas técnicas de caracterización a la arcilla tanto en estado natural como a las modificadas por el tratamiento ácido y apilarado, y a las muestras obtenidas después del contacto con el efluente, determinándose la composición química mediante activación neutrónica, área superficial por el Método BET y espaciado basal  $d_{001}$  mediante DRX.

La concentración de los metales en el efluente fue analizada por Espectroscopía Ultravioleta (UV), antes y después del contacto con la arcilla modificada, estos resultados permitieron determinar la masa de metal adsorbida por gramo de adsorbente ( $q$ ).

Los estudios realizados por activación neutrónica, parecen indicar que se presenta un fenómeno de intercambio iónico adicional al proceso de adsorción, donde ambos parecen competir en la retención del metal en estudio. Así, para el caso del cromo aparecen los dos fenómenos y para el zinc parece predominar más el proceso de adsorción.

El estudio de diseño y costos fue realizado en base al volumen de efluente que se produce en la miniplanta galvánica del Lab. de Electroquímica FIQM-UNI, con el fin de establecer un proceso de tratamiento de sus aguas de recuperación y enjuague empleando arcilla modificada como adsorbente. El proceso fue dividido en dos etapas: a) eliminación de cianuros, reducción de cromo y neutralización de aguas ácidas y b) tratamiento con la arcilla modificada; al final de los cuales, se verificó mediante análisis que las concentraciones metálicas estaban dentro de los límites permisibles.

### **III. LA INDUSTRIA GALVÁNICA**



### **III. LA INDUSTRIA GALVÁNICA**

La Industria galvánica tiene por finalidad el tratamiento de superficies metálicas por procesos químicos o electroquímicos con el objeto de proteger las piezas contra la corrosión, mejorar su resistencia, apariencia y durabilidad.

En la Ciudad de Lima, existen alrededor de 1500 plantas, en su mayoría en forma artesanal, ubicados en los Distritos de Ate - Vitarte, La Victoria y San Martín de Porras (Anexo N° XII.1). Las aguas residuales que provienen de estas plantas constituyen uno de los desechos inorgánicos de gran poder contaminante debido a la presencia de elevadas concentraciones de cianuros y metales pesados.

#### **III.1. PROCESOS Y FUENTES DE CONTAMINACION**

Los recubrimientos metálicos destinados a la protección y acabado de superficies metálicas se pueden dividir en los siguientes grupos:

1. Recubrimientos metálicos por electrodeposición obtenido de los baños galvanicos mediante el paso de una corriente.
2. Revestimientos metálicos obtenidos por medio de reacciones químicas de intercambio sin el paso de una corriente eléctrica.
3. Recubrimientos metálicos por adhesión directa o por vía térmica generalmente por inmersión del metal base en una fusión metálica, o por exposición del metal base en un medio reductor (un vapor) de sales del metal obligándolo a reducirse, depositándose en la superficie del metal base.
4. Recubrimientos por conversión obtenidos con el uso de una corriente eléctrica. En este caso la superficie del metal base es transformada alterando su composición, transformándose por ejemplo en óxido en el caso de anodizado del aluminio.
5. Recubrimientos de conversión a través de baños electrolíticos sin el paso de una corriente eléctrica, también por transformación de la superficie formándose una capa protectora con determinadas características físicas, por ejemplo el fosfatado.

Los ciclos de trabajo en la industria galvanica son muy variados, dependen de la característica y propiedades del metal-base y de los requerimientos o exigencias establecidas para el producto terminado. En las Figuras N° III.1.1 a y b se muestran las operaciones necesarias para realizar una electrodeposición adherente de un metal sobre una superficie metálica.

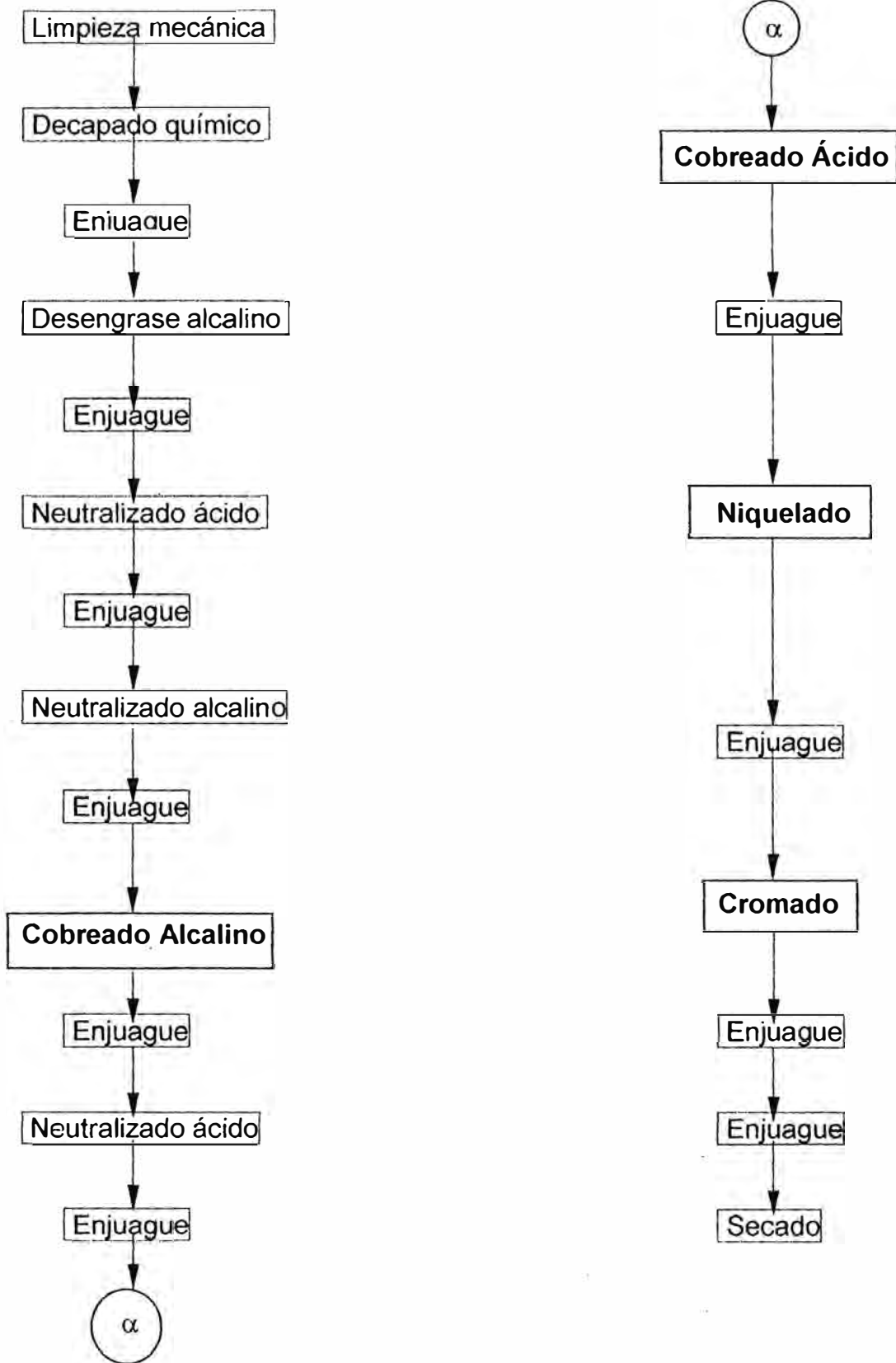


Figura N° III.1.1- a Proceso de Cobreado Alcalino, Cobreado Ácido, Niquelado y Cromado.

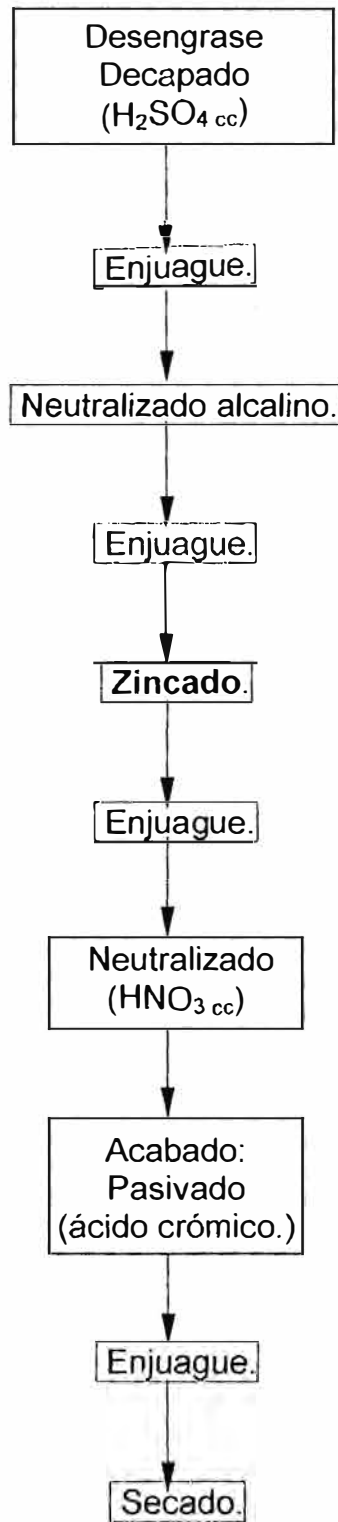


Figura N° III.1.1- b Proceso de Zincado.

Las piezas son inicialmente sometidas a limpieza mecánica y decapado con la finalidad de alejar la herrumbre y escamas de la superficie. El proceso de decapado involucra reacciones con ácidos fuertes, se usan ácidos sulfúrico, clorhídrico o nítrico. Algunos metales pueden ser decapados en soluciones alcalinas como hidróxido de sodio o potasio al 10 - 20%. Las soluciones también pueden contener sales, como NaCl, FeSO<sub>4</sub>, MnSO<sub>4</sub>, MgSO<sub>4</sub>, etc. Las concentraciones de ácido usadas para el decapado son variables, de un 5 - 25% para los metales no ferrosos como el cobre y sus aleaciones pueden llegar al 50%.

El desengrase de la superficie de los metales se realiza con soluciones del 10 - 15% de hidróxido de sodio o carbonato de sodio. En algunos casos se usa solventes orgánicos como el tricloroetileno u otros. Las soluciones de desengrase alcalino consisten en hidróxido de sodio, ortofosfatos, fosfatos complejos, silicatos, carbonatos, emulsificantes orgánicos y agentes humectantes sintéticos.

En la electrodeposición metálica se pone en contacto la superficie metálica con una solución electrolítica (baño) que contiene cationes de un cierto metal que se deposita o adhiere sobre la superficie (cátodo) al paso de la corriente eléctrica continua.

La composición de los baños de electrodeposición depende del tipo de proceso involucrado, pueden contener diversas sustancias como: carbonato de potasio, ácido sulfúrico, hidróxido de sodio, cloruro de sodio, cianuro de cobre (II), cianuro de potasio, cianuro de sodio, sulfato de zinc,

sulfato de cobre (II), sulfato de níquel (II), sulfato de manganeso (II), cromatos, acetato de plomo (II) y diversas sustancias orgánicas como dextrina, sacarina, entre otras. Otros baños como los de pasivado contienen ácido crómico o cromatos, los baños de activación contienen ácido nítrico, igualmente un baño de lustrado electrolítico puede contener ácido crómico.

Cada una de las operaciones de tratamiento de superficies, involucra subsecuentes operaciones de lavado en los cuales parte de las sustancias contenidas en los baños junto a otras impurezas metálicas se dejan en las aguas de descarga. La composición de estas aguas tienen una variación muy elevada con el tiempo ya que la operación de lavado es discontinúa y además por que al cambiar las piezas de trabajo varía el volumen de la solución concentrada adherida a las piezas en su superficie. Por tanto, el volumen y concentración de descarga dependerán de las condiciones de operación de la planta: volumen de producción, tipos de baños usados, número de baños, tipo de piezas de trabajo, diseño y forma de trabajo, modo de uso del agua de enjuague, etc.

Se entiende entonces como efluentes líquidos en la Industria Galvánica a todas las aguas generadas por los enjuagues (lavado) y los baños agotados o exhaustos que no son económicamente recuperables y que por tanto deben ser desechados. Estas aguas contienen todos los componentes - base de los baños usados en precedencia al lavado y además aditivos usados en la totalidad de baños.

La Tabla Nº III.1.1 muestra las diversas fuentes de generación de los contaminantes. Para efectos del presente trabajo, se tomaron en consideración, para su tratamiento, los metales pesados: cromo, cobre, níquel, zinc y cianuros debido a su carácter tóxico.

**Tabla Nº III.1.1 Fuentes de Contaminación en la Industria Galvánica**

<b>Fuente</b>	<b>Contaminantes</b>
Baños de decapado	Acidos nítrico, clorhídrico, sulfúrico
Baños de desengrase	Hidróxido de sodio, carbonato de sodio, silicato de sodio, cianuros, solventes orgánicos.
Baños no cianurados	Cobre, níquel, zinc, cadmio, manganeso, aluminio, hierro, cobalto, cromatos.
Baños al cianuro	Cobre, zinc, cadmio, plata, cianuros.
Baños de lustrado electrolítico	Acidos, cromatos

### **III.2. EFECTOS EN EL MEDIO AMBIENTE Y LA SALUD**

En esta parte se describe los efectos que producen en el ecosistema los contaminantes que son materia de nuestro estudio: cianuros, cromo, cobre, níquel y zinc.

#### **a) Cianuros**

La razón principal de la preocupación respecto a la presencia de cianuros en el agua es su naturaleza sumamente tóxica. Aún a concentraciones bajas pueden destruir la vida marina y las bacterias útiles, trastornando la capacidad natural de purificación de las corrientes y promoviendo la concentración de otros contaminantes orgánicos.

Los cianuros son todos los grupos  $\text{CN}^-$ . Se clasifican en simples y complejos. Los cianuros simples responden a la fórmula  $\text{A}(\text{CN})_x$ , donde A representa un álcali (sodio, potasio, amonio) o un metal, y "x" es la valencia de A y el número de grupos CN. En soluciones acuosas de cianuros alcalinos simples se encuentran presentes  $\text{CN}^-$  y HCN.

Soluciones de cianuros metálicos simples como  $\text{CuCN}$ ,  $\text{AgCN}$  y  $\text{Zn}(\text{CN})_2$  son casi insolubles en agua pero forman cianuros metálicos complejos muy solubles en presencia de cianuros alcalinos.

Los cianuros complejos se caracterizan por la fórmula general  $\text{A}_y[\text{M}(\text{CN})_x]$ , donde A representa un álcali, M el metal pesado (hierro ferroso y férrico, cadmio, cobre, níquel, zinc, plata y otros) y "x" e "y" son los números de radicales de cianuro y de átomos del álcali, respectivamente.

La disociación de un cianuro complejo soluble alcalino metálico da lugar a un anión  $\text{M}(\text{CN})_x^{y-}$  con liberación de  $\text{CN}^-$  y formación de HCN. Este grado de disociación se encuentra en función de la concentración, pH y estabilidad.

Los complejos de cianuro de zinc y cadmio se disocian casi totalmente en soluciones muy diluidas. No ocurre lo mismo con el complejo cianuro de níquel donde existe mucha menor disociación, ni en los iones complejos de cianuro de hierro quienes son muy estables. En la Tabla N° III.2.1 se muestran los efectos tóxicos debido a la exposición a los cianuros en el ser humano.



**Tabla N° III.2.1 Efectos tóxicos debido a la exposición a los cianuros en el ser humano**

Vías de exposición	Efectos
<b>Ingestión</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Dosis letal: 2 - 5 mg/Kg de peso corporal.</li> <li>. Se combinan con el 2% de la metahemoglobina presente en la sangre, impidiendo la captación del oxígeno por parte de los tejidos produciendo la muerte por asfixia. Si la dosis inicial no es mortal el ión cianuro se libera gradualmente rompiendo sus enlaces con la metahemoglobina y convertido en el (relativamente menos peligroso) ión tiocianato se excreta por la vía urinaria.</li> </ul>
<b>Inhalación</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Dosis letal de polvo de cianuro o gas cianhídrico: 150 ppm por 30-60 min y 500 ppm. por pocos minutos.</li> <li>. A bajas concentraciones los compuestos de cianuros halogenados (BrCN, ClCN) se comportan como gases irritantes produciendo lagrimeo, deficiencias respiratorias agudas e incluso edema pulmonar a concentraciones de 10 ppm. El gas cianhídrico es advertido por el olfato (almendras amargas) en concentraciones muy bajas, en concentraciones tóxicas no pueden ser advertidas a causa de la parálisis del nervio olfativo.</li> </ul>
<b>Sistema nervioso central</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Dosis muy bajas de gas cianhídrico producen: debilidad, dolor de cabeza, confusión mental, náusea y vómitos. El envenenamiento grave ocasiona pérdida de conocimiento, convulsiones y muerte</li> </ul>
<b>Aparato cardiovascular</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. En casos leves la presión arterial es normal y el pulso es rápido. La frecuencia respiratoria varía según la intensidad de la exposición: es rápida en exposiciones moderadas y lentas (suspirantes) cuando la exposición es grave.</li> </ul>
<b>Piel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Quemaduras dérmicas.</li> </ul>

## b) Cromo

El cromo fue descubierto en 1797 por Vauquelin, su nombre deriva del griego CHROMA que quiere decir color, pues sus compuestos son generalmente coloreados. Es un metal de transición cuya abundancia en la corteza terrestre es aproximadamente de 200 partes por millón.

El cromo presenta diversos estados de oxidación: los estados 0, II, III y VI son los más comunes, los estados IV y V aunque han sido identificados no tienen mayor importancia práctica. En el máximo estado de oxidación, VI, es altamente oxidante y no existe especie catiónica acuosa que contenga cromo hexavalente. Los compuestos hexavalentes aniónicos más comunes son el cromato y el dicromato. Estos compuestos si son bastante tóxicos, no porque el cromo sea un metal pesado en el mismo sentido que el plomo o el bario sino por el alto poder oxidante del cromo hexavalente. Por dicha razón, el uso del dicromato en medio ácido como oxidante en tratamiento de metales y procesos electrolíticos requiere de mucho cuidado.

El cromo trivalente (III) forma una gran variedad de compuestos, tanto aniónicos como catiónicos y es bastante resistente a la oxidación en medio ácido. En la Tabla N° III. 2.2 se muestran algunas diferencias referentes a los efectos tóxicos producidos por el Cr(III) y Cr(VI).

**Tabla N° III.2.2 Comportamiento metabólico y toxicológico del Cr(III) y Cr(VI) en el ser humano**

Cr(III)	Cr(VI)
<ul style="list-style-type: none"> <li>. Es un integrante del factor nutricional llamado factor de tolerancia de la glucosa (GFT). Suministrado oralmente se absorbe 1%, aumentando este porcentaje de 10 a 15% si es dosificado como GFT.</li> <li>. Es incapaz de superar la membrana eritrocitaria. Se presenta en la sangre asociado a proteínas plasmáticas tipo transferrina.</li> <li>. Enlaces fuertes con proteínas.</li> <li>. Acumulación hepática gradual a las 24 horas.</li> <li>. Toxicidad limitada.</li> <li>. Alteración de la funcionalidad hepática y renal limitada, aún a altas dosis.</li> <li>. Ningún efecto irritante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>. Se absorbe 3 a 5 veces más que el Cr(III).</li> <li>. Penetra en los eritrocitos de la sangre asociándose a la hemoglobina.</li> <li>. Posible reacción con compuestos de bajo peso molecular.</li> <li>. Interacciona con enlaces débiles a pH bajos.</li> <li>. Disminución hepática a las 24 horas.</li> <li>. Acción cancerígena con probable modificación de las bases del ADN.</li> <li>. Daños a nivel hepático y renal.</li> <li>. Ulcera en la piel, efectos corrosivos en la cavidad nasal.</li> </ul>

### c) Cobre

El exceso de cobre resulta altamente tóxico para las plantas marinas e invertebrados, pero es relativamente tóxico para los mamíferos.

Investigaciones en moluscos de agua dulce (Harris, 1982) expuestos a los efluentes de cobre de una planta de galvanizado, demostraron que al colocar estos animales en jaulas, a 100 m. por debajo de la descarga, éstos acumularon 20.64 mg Cu/dm<sup>3</sup> en 14 días y murieron. El estudio reveló que niveles muy bajos de metal eran suficientes para provocar efectos adversos en la fauna de la corriente.

Los efectos tóxicos en el ser humano se describen en la Tabla N° III.2.3.

**Tabla N° III.2.3 Efectos tóxicos en el ser humano debido a la exposición al cobre y sus compuestos**

Vías de exposición	Efectos
Inhalación	La aspiración de cobre y sus compuestos produce irritación nasal y del tracto respiratorio superior, fiebre de vapores metálicos (tos, vómitos, diarrea, bronco-pulmonía y edema pulmonar).
Ingestión	La ingestión de CuSO <sub>4</sub> causa fuertes inflamaciones con dolores abdominales, vómitos, diarrea, hipotensión y coma. En algunos casos anemia hemolítica.
Piel	Dermatitis, quemaduras..

### d) Níquel

Produce cáncer, tumores y es teratogénico en mamíferos. En peces, las larvas soportan mejor los efectos del níquel que los huevos. Sin embargo, en investigaciones realizadas con la especie carpa ciprínido

(Root, 1990) se observa que cuando la aportación de níquel es larga y crónica las larvas son más sensibles.

En la Tabla N° III.2.4 se muestra los efectos tóxicos en el ser humano.

**Tabla N° III.2.4 Efectos tóxicos en el ser humano debido a la exposición a compuestos de Níquel**

Compuesto	Efectos
Cloruro de Níquel $\text{NiCl}_2$	Produce trastornos respiratorios, alérgicos, reacciones asmáticas pulmones. Provoca dermatitis en la piel
Níquel Carbonilo ( $\text{Ni}(\text{CO})_4$ )	Nauseas, dolor de cabeza, dolor en el pecho, tos, pulmonía intersticial, efectos cerebrales y muerte.
$\text{Ni}_2\text{S}_3$ y $\text{NiO}$	Aumento de riesgo de cáncer a la laringe.

### e) Zinc

Reduce el nivel de oxígeno de la sangre que fluye por las branquias de los peces afectando el mecanismo de transporte de la membrana branquial, haciendo que el pez muera por falta de oxígeno.

La concentración letal calculada para el zinc es de  $600 \mu\text{g}/\text{dm}^3$ . Concentraciones menores provocan retraso en el crecimiento de peces como *Lepomis macrochirus* (branquias azules) y *Pimephales promelas* (pez globo) (Root, 1990).

El polvo de zinc es muy tóxico en los vegetales, aunque existen diferentes niveles de sensibilidad a este elemento en las plantas. La planta

es afectada debido a la obturación de los estomas por partículas de óxidos, lo que disminuye el proceso respiratorio, fotosintético y de transpiración; todo ello le produce un envejecimiento prematuro y causa su muerte lentamente. Los efectos tóxicos en el ser humano se muestran en la Tabla N° III.2.5.

**Tabla N° III.2.5 Efectos tóxicos en el ser humano debido a la exposición a compuestos de Zinc**

Compuesto	Efectos
ZnO	Pulmonar: fiebre de humos metálicos con dolor de cabeza, fiebre, sudoración, dolor de pecho y extremidades. Pulmonía y edema pulmonar fatal. Gastrointestinal: náuseas, vómitos, diarrea, calambres abdominales.
ZnCl <sub>2</sub>	Mutagénico y teratogénico: aberraciones cromosómicas en linfocitos humanos.

### III.3 LEGISLACION PERUANA

En la Tabla N° III.3.1 se muestran las normas de control dadas por el Estado Peruano en materia ambiental (1960 - 1997).

Entre los más importantes se encuentran el Decreto Legislativo N°613: (07/09/90) Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales (CMARN), el cual introduce la necesidad de los Estudios de Impacto Ambiental (EIA), o estudios de tipo predictivo a fin de determinar los efectos de la ejecución de un proyecto sobre las personas y el medio ambiente. En 1991 se da el D. Leg. 757: Ley Marco para el crecimiento

**Tabla N° III.3.1 Legislación Ambiental en el Perú.**

Fecha	Norma Legal	Contenido
29-11-60	D.S. 28/60 ASPL	Fija estrictamente los límites permisibles de contaminantes que debe tener un líquido o residuo industrial para que pueda ser admitida en un colector público.
24-07-69	D. Ley 17752	Ley General de Aguas Protege y fija la calidad de los cuerpos de agua terrestre y marítima respecto a los diferentes usos.
09-04-87	D.S. 002-87 MA	Reglamento de capitanías y actividades marítimas, fluviales y lacustres.- Establece el control para prevenir y mitigar los efectos de la contaminación del mar, ríos y lagos navegables y sobre todo aquella que ocasione perjuicio ecológico.
13-11-91	D. Leg. 757	Ley Marco para el Crecimiento de la Inversión Privada: Establece el equilibrio racional entre el desarrollo socio-económico, la conservación del medio ambiente y el uso sostenido de los recursos naturales, garantizando la seguridad jurídica a los inversionistas con normas claras de protección ambiental.

**Tabla N° III.3.1 (Continuación)**

Fecha	Norma Legal	Contenido
12-11-93	D.S. 046-93-EM	Ministerio de Energía y Minas: Reglamento para la Protección Ambiental en las Actividades de Hidrocarburos. Establece los requerimientos de EIA y la adecuación de las actividades en marcha a través de un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental.
15-01-94	D.S. 01-94-PE	Ministerio de Pesquería: Reglamento de la Ley General de Pesca. Incluye la reglamentación del Título VIII (De la Protección del Medio Ambiente) donde establece los requerimientos de EIA y la adecuación de las actividades en marcha a través de un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental.
08-06-94	D.S. 29-94-EM	Ministerio de Energía y Minas: Reglamento de Protección Ambiental en las Actividades Eléctricas. Establece los requerimientos de EIA y la adecuación de las actividades en marcha a través de un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental.
19-10-94	D.S. 049-94	Autoridad Autónoma de la Cuenca Hidrográfica del Chillón, Rímac y Lurín: Máximo Organismo decisorio en materia de uso y conservación de los recursos agua y suelo en su respectivo ámbito jurisdiccional que comprende las Cuencas Hidrográficas de los ríos Chillón, Rímac y Lurín.
16-12-94	R.M. 478-94-PE	Ministerio de Pesquería: Fijan límites permisibles de emisión de desechos al medio ambiente marino para la actividad pesquera de consumo humano indirecto.



Tabla N° III.3.1 (Continuación)

Fecha	Norma Legal	Contenido
26-12-94	Ley 26410	Ley del Consejo Nacional del Ambiente - CONAM Se crea el CONAM como entidad responsable de la formulación, dirección y control de la política ambiental del país.
13-01-96	R.M. 011-96-EM/VMM	Ministerio de Energía y Minas: Establece los límites máximos permisibles para efluentes líquidos de las actividades minerometalúrgicas.
01-10-97	D.S. 019-97-MITINCI	Ministerio de Industria, Turismo, Integración y Negociaciones Comerciales Internacionales: Reglamento de Protección Ambiental para el desarrollo de actividades de la Industria Manufacturera.  Capítulo I: Obligaciones de los Titulares de actividades de la Industria Manufacturera, Consultores y Auditores Ambientales.  Capítulo II: Requerimientos para nuevas actividades y ampliaciones o modificaciones. Presentar un EIA (Estudio de Impacto Ambiental) o DAP (Diagnóstico Ambiental Preliminar).  Capítulo III: Requerimientos para las actividades en curso. Presentar un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA)  Disposiciones Transitorias: Presentar informe ambiental. Cumplir una etapa de monitoreo (agua, aire o suelos). Presentar el diagnóstico ambiental preliminar (DAP): contiene resultados, identificación de los problemas y efectos ambientales. Evaluación del DAP por la autoridad competente.

de la Inversión Privada, en donde se modifica el CMARN dando la facultad al Ministerio del Sector de establecer si se requiere el EIA. Posteriormente se crea el Consejo Nacional del Ambiente CONAM (Ley 26410 - 26/12/94) como entidad responsable de llevar a la práctica el Código del Medio Ambiente, así como los convenios internacionales suscritos y ratificados por el Perú. En la actualidad, el Ministerio de Energía y Minas es el que tiene más avanzada su legislación contando con un programa de Estudios de Impacto Ambiental, Programa de Fiscalización a través de terceros, Programas de Monitoreo y Programas de Adecuación y Manejo Ambiental.

#### **III.4 LÍMITES DE CONTAMINACIÓN**

Es importante notar la diferencia que existe entre los límites máximos de emisión y los límites de calidad ambiental; los últimos están referidos a las concentraciones máximas permitidas de sustancias potencialmente contaminantes en los cuerpos que pueden recibir las descargas de desecho tales como los cuerpos de agua.

Actualmente nuestro país sólo cuenta con los límites máximos permisibles de emisión para efluentes líquidos provenientes de actividades pesqueras (R.M.478-94-PE 16/12/94) y mineras (R.M.011-96-EM/VMM 13/01/96) que norman las concentraciones máximas de sustancias potencialmente contaminantes en dichas corrientes. No existe, por tanto, una norma oficial que establezca los límites máximos permisibles de emisión para actividades particulares como la Industria Galvánica, sólo se

establece algunos parámetros para efluentes industriales vertidos a colectores públicos, sin considerar los límites para sustancias tóxicas (Tabla N° III.4.1: D.S. 28/60 - ASPL - 29/11/60). Además la calidad del agua está reglamentada por el D.S. 007-83-SA- 11/03/83 que modifica el Reglamento de la Ley General de Aguas de 1969 (Tabla N° III.4.2).

**Tabla N° III.4.1 Límites permisibles para las descargas industriales que se vierten a los colectores públicos  
D.S. 28/60 - ASPL (29/11/60) - PERÚ**

<b>Parámetros</b>	<b>Límites permisibles</b>
Temperatura	< 35 °C
pH	5 - 8.5
DBO <sub>5</sub>	< 1000 mg/L
Grasas	< 100 mg/L
Sustancias inflamables	< 1000 mg/L
Pto. de ignición de las sustancias inflamables	> 90 °C
Sólidos Sedimentables	< 8.5 mL/L/h

En la tabla N° III.4.3 se muestra un cuadro comparativo de límites de descarga para aguas residuales galvánicas en países como Francia, Suecia, Suiza y U.S.A.

Por otro lado, siendo de vital importancia la calidad del agua para el mantenimiento de la vida acuática, se presentan los niveles de seguridad para metales: cromo, cobre, níquel y zinc, para especies particulares de animales (truchas, salmones) y vegetales presentes en los cuerpos hídricos (Tabla N° III.4.4).

**Tabla N° III.4.2 Límite de sustancias potencialmente peligrosas en mg/L  
(Ley General de Aguas 11-03-83 PERÚ)**

Parámetro	I	II	III	V	VI
DBO	5	5	15	10	10
Cianuros (CN <sup>-</sup> )	0.2	0.2	0.001	0.005	0.005
Cromo	0.05	0.05	1	0.05	0.05
Cobre	1	1	0.5	0.01	*
Níquel	0.002	0.002	0.001	0.002	**
Zinc	5	5	25	0.02	**

**CLASES:**

- I Agua de abastecimiento doméstico con simple desinfección.
  - II Aguas de abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación y cloración, aprobados por el Ministerio de Salud.
  - III Aguas para riego de vegetales de consumo crudo y bebida de animales.
  - V Aguas de zonas de pesca de mariscos bivalvos.
  - VI Aguas de zonas de preservación de fauna acuática y pesca recreativa o comercial.
- \* Pruebas de 96 horas LC50 (dosis letal para provocar 50% de muertes) multiplicada por 0.1
- \*\* Pruebas de 96 horas multiplicada por 0.2

**Tabla N° III.4.3 Cuadro comparativo de Límites de descarga para aguas residuales galvánicas**

Parámetro	Francia (1985)	Suecia (1985)	Suiza (1975)	U.S.A. (1984) máx. por día
pH	6.5 - 9	ND	6.5 - 8.5 (30°C)	6 - 9
DBO(1), DQO(2) (mg/L)	150 (2)	ND	20 (1)	ND
Materias en susp. (mg/L)	15	10	20	60
Aceites (mg/L)	5	ND	20	52
Cianuro libre (mg/L)	0.1	0.1	0.1	0.86
Cianuro total (mg/L)	1.2	1	ND	ND
Cromo libre (mg/L)	0.1	0.1	0.1	ND
Cromo total (mg/L)	2	1	ND	2.77
Cobre (mg/L)	2	1	0.5	3.3
Níquel (mg/L)	5	1	2	3.98
Zinc (mg/L)	5	2	2	2.61
(Zn + Cu + Ni + Al + Fe + Cr + Cd + Pb + Sn) (mg/L)	15	ND	ND	ND

ND: no determinado.

### III.5 TRATAMIENTOS CONVENCIONALES DE EFLUENTES GALVÁNICOS

La gran variedad de procesos empleados en la Industria Galvánica determina que la composición de las aguas residuales producidas varíe y por lo tanto varíen también los métodos de desintoxicación de las aguas. La elección debe orientarse en función del comportamiento químico de los elementos tóxicos contenidos en las aguas residuales. A este respecto, las aguas residuales galvánicas pueden dividirse en los siguientes grupos:

**Tabla N° III.4.4 Niveles de Seguridad y Factores de aplicación para metales  
en relación a la conservación de la vida acuática.**

ELEMENTOS	Niveles de Seguridad (mg/L) y factores de aplicación (f) relativos a 96 hLD50		OBSERVACIONES
	Agua dulce	Agua Marina	
Cr (III)	0.1 (EPA); 0.1 (AFS)	0.1 (EPA); 0.05 (AFS)	
Cr (VI)	0.1 (EPA); 0.025 (AFS)	0.1 (EPA); 0.025 (AFS)	
Cu	0.001 - 0.112 (EIFAC) <sup>a</sup>	f = 0.1 (EPA); 0.01 (NAS)	<sup>a</sup> Dependencia con la dureza del agua.
Ni	f = 0.01 (EPA) <sup>b</sup>	0,002 (NAS)	<sup>b</sup> Incompatibilidad con el (AFS)
Zn	0.03 - 2 (EIFAC) <sup>c</sup>	0.05 (AFS)	<sup>c</sup> Dependencia con la dureza del agua

EPA = Environmental Protection Agency

AFS = American Fisheries Society

NAS = National Academy of Science

EIFAC = European Inland Fisheries Advisory commission

96 hLD50 = En un tiempo de 96 horas resulta letal para el 50% de los organismos en exámen.

- Aguas residuales que contienen cianuros simples o complejos cianurados.
- Aguas residuales que contienen ácido crómico.
- Aguas residuales con metales en solución ácida.

A continuación se describen algunas tecnologías usadas para su tratamiento.

### III.5.1 TRATAMIENTO DE CIANUROS

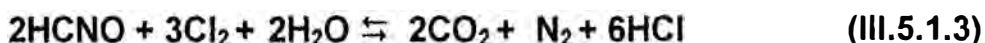
La descomposición del ión cianuro se realiza por oxidación con cloro, produciéndose varias reacciones simultáneamente. En primer lugar se forma cloruro de cianógeno según la reacción:



Esta reacción transcurre rápidamente, y aunque el cloruro de cianógeno es relativamente estable en solución acuosa a pH inferiores a 7, aun en presencia del cloro en exceso, se descompone por hidrólisis con formación de cianatos con tanto más rapidez cuanto mayor sea el desplazamiento del pH a la zona alcalina, de acuerdo con la reacción:



El cloro puede descomponer el cianato formado en función del pH y del tiempo para dar anhídrido carbónico y nitrógeno de acuerdo con la reacción:



Aunque en la zona ácida esta reacción se efectúa instantáneamente, un pH básico prácticamente la impide. En este caso se necesita una

cantidad de cloro tres veces mayor que el contenido de cianógeno. Sin embargo, como los cianatos son relativamente poco tóxicos, para alcanzar una toxicidad equivalente a la de los cianuros, se necesita una cantidad de varios centenares de veces mayor que la de estos. En las concentraciones que se presentan en estos casos, los productos finales de la descomposición de los cianatos son totalmente inofensivos.

En resumen, inicialmente se requiere operar con reacción alcalina para transformar rápida y totalmente el cloruro de cianógeno formado inicialmente a partir de los cianuros en cianatos. Si transcurre a un pH de 10 o superior, la reacción toca a su fin en unos minutos con un ligero exceso de cloro. En estas condiciones la detección del cloro libre en el agua residual proporciona la seguridad de que la eliminación de los cianuros ha sido total. El cloro y los hipocloritos atacan a los complejos cianurados de cinc y cadmio del mismo modo que los cianuros simples de sodio y potasio. El complejo de cobre se descompone en forma análoga, pero en este caso el cobre se presenta en forma de óxido. En cambio, en presencia del cloro, los complejos de hierro son estables, mientras que el ferrocianuro tan solo se transforma en ferricianuro. La estabilidad de los complejos de hierro merece especial atención ya que puede descomponerse por la acción de la luz, que libera cianuro, y aumentar la toxicidad de la solución. Según una patente norteamericana (2.981.682 Lancy Lab. Inc), el cloro en exceso descompone el ferricianuro potásico a temperaturas superiores a 70 °C en medio alcalino. Las aguas residuales

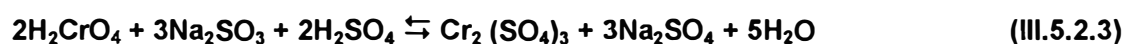
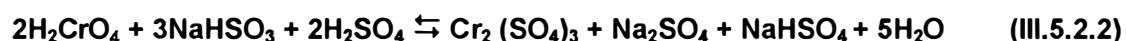


se tratan como se describió anteriormente y, a continuación, se eleva la temperatura para descomponer el complejo de hierro. El tiempo de reacción es de 3 a 4h y el exceso de cloro de 1 a 2 g/L.

### III.5.2 TRATAMIENTO DE CROMO HEXAVALENTE

El tratamiento de aguas residuales que contienen ácido crómico se realiza con anhídrido sulfuroso o bisulfito sódico. Estas sustancias reducen el cromo hexavalente a trivalente en forma de sal cromosa, disminuyendo considerablemente la toxicidad de las aguas residuales. La reacción entre el ácido crómico y el ácido sulfuroso es función del pH y se efectúa cuantitativamente y con bastante rapidez en presencia de un exceso de anhídrido sulfuroso a un pH inferior a 3.

En el desarrollo de la reacción, la conversión se ajusta a una de las siguientes reacciones:



En la primera de estas reacciones los dos ácidos se combinan para formar una sal neutra y agua, el pH se desplaza más allá del punto de neutralización de la reacción, por lo tanto, para acelerar el proceso de reducción y mantener un pH ácido, además del reactivo de desintoxicación, se debe añadir ácido sulfúrico.

En combinación con el oxígeno del agua, el ácido sulfúrico y sus sales se transforman, oxidándose a ácido sulfúrico y sulfatos, por ello es

necesario añadir más  $\text{SO}_2$  del estequiométricamente necesario. La relación  $\text{SO}_2$ : Cr depende del porcentaje de cromo del agua residual, para un contenido en cromo de 50 mg/L hay que añadir 2.65 veces más de  $\text{SO}_2$ .

Las cifras correspondientes son de 4.24 para el bisulfito sódico ( $\text{NaHSO}_3$ ) y de 5.19 para el sulfito sódico anhidro ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ), si el grado de pureza de estas sales es del 97.5%.

### **III.5.3 PRECIPITACIÓN CON HIDRÓXIDOS**

La desintoxicación de las aguas residuales galvánicas no concluye con el tratamiento para cianuros o cromatos. Es necesario eliminar las sales de los metales pesados en disolución para que las aguas sean menos tóxicas.

En la práctica, los metales pesados precipitan en forma de hidróxidos. Para llevar a cabo esta operación se ajusta el pH entre 8.2 y 8.5 aproximadamente. A continuación se describe los factores que influyen en la precipitación del cobre, níquel, cromo y zinc por adición de sosa, cal y carbonato sódico.

Añadiendo hidróxido de sodio u óxido de calcio a la solución sulfatada, el cobre precipita como sulfato básico; la precipitación se inicia a pH 5.8 y es evaluada cuantitativamente a pH 8.5. El precipitado obtenido con la sosa tiene buenas propiedades filtrantes. Los poliacrilatos y las poliamidas aceleran la formación de precipitados. No debe emplearse solución de carbonato sódico como reactivo de precipitación,

ya que produce soluciones turbias y aumenta el consumo de reactivos; además, la solubilidad del carbonato básico de cobre es más elevada que la del sulfato básico.

En solución de sulfatos, el níquel también precipita bien con la sosa y la lechada de cal, pero no tan bien con el carbonato sódico. La zona de precipitación está comprendida entre los pH de 7.8 y 9.5, y se supone que el precipitado es hidróxido de níquel en presencia de sales neutras absorbidas. Aunque el precipitado filtra bien, su contenido en sólidos es mayor que en el caso del cobre.

El cromo precipita mejor con lechada de cal, pues si se emplea sosa, el carácter anfótero del cromo tiene repercusiones desfavorables por encima de pH 8.5. Si se emplea carbonato sódico se forman complejos carbonatados fácilmente solubles o coloidales. La decantación del precipitado nunca es completa incluso después de haber transcurrido mucho tiempo. La separación mejora con el empleo de polielectrolitos, pero los precipitados son voluminosos. En mezclas con cobre y níquel, la precipitación es satisfactoria a pH 8.5; también se puede emplear sosa como agente precipitante.

El zinc se precipita con sosa o lechada de cal a un pH 7.6 - 9.5 y con carbonato sódico a pH 7.4 - 8.5. El precipitado no tiene un comportamiento uniforme, debido a su estrecha relación con el pH. Los polielectrolitos no influyen mucho en la velocidad de sedimentación.

### III.6 EMPLEO DE ARCILLAS MODIFICADAS COMO ALTERNATIVA EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES

La preocupación por el medio ambiente ha logrado generar numerosas investigaciones para remover los contaminantes de los residuos industriales a través del empleo de materiales económicos tales como las arcillas. Algunos de los estudios realizados son los siguientes:

**Barnes, Dorairaja y Zela (1990)**, utilizaron caolinitas y bentonitas para la remoción del cromo en los desechos del estado de New Jersey, y encontraron que el cromo trivalente precipita a un pH por encima de 5.5, donde el cromo hexavalente no precipita; además demostraron que las bentonitas eran mejores adsorbentes que las caolinitas para dicha adsorción.

**Viraraghavan y Kapoor (1993)**, usaron bentonita para remover mercurio de desagües municipales. Estudios cinéticos batch indicaron un tiempo de equilibrio de 4 horas para la adsorción aproximada de 1 mg/L de Hg(II) en bentonita. Estudios de adsorción batch indicaron que para una concentración inicial de aproximadamente 1ppm, sólo el 34.2% de mercurio era adsorbido por la bentonita. La máxima adsorción de mercurio ocurrió en rangos de pH de 3.0 a 3.5. Los estudios de isotermas fueron realizados a 5, 10, 15 y 21 °C para determinar los efectos de la temperatura en la adsorción del mercurio. La capacidad de adsorción del mercurio se incrementaba con el aumento de la temperatura. Los estudios termodinámicos indicaron que la adsorción era de naturaleza endotérmica.

**Lechuga W. (1996).** Investigación realizada en la Universidad Nacional de San Antonio de Abad del Cuzco – Perú. Emplearon bentonitas como adsorbentes en la remoción del Hg (II) de las aguas contaminadas. Sus resultados mostraban que trabajando a un pH de 8.2 con una concentración inicial de  $23 \text{ mg/dm}^3$  y un peso de adsorbente de 0.5 g por 100 ml de solución, se logró obtener niveles óptimos en la adsorción del ión Hg (II) en la bentonita.

**Fayad, J.H (1998).** Investigación realizada en la Universidad Nacional de Ingeniería, FIQM – Laboratorio 21. Trabajó con bentonitas modificadas mediante tratamiento termoácido estudiando el efecto del pH en la adsorción del cromo hexavalente (soluciones preparadas) siendo favorecidas en el rango de 2.5 a 3.5 siguiendo una isoterma de adsorción que cumplía con el modelo matemático planteado por Freundlich. Sus resultados mostraron que el pre-tratamiento termo-ácido aplicado a las arcillas afectaba el grado de adsorción del cromo en sus distintos estados de oxidación.

**Pires J., Carvalho A., Brotas M. (1998).** Estudiaron la retención del pentaclorofenol (ácido orgánico) de aguas residuales en arcillas apiladas con aluminio (Al – PILC) y cromo (Cr – PILC). Encontraron que a pesar de que Cr – PILC tenía un área específica BET superior a la de Al – PILC las cantidades adsorbidas de pentaclorofenol en Al – PILC son casi el doble de las verificadas para Cr – PILC, alcanzando valores del orden de los  $10 \text{ } \mu\text{mol/g}$  para concentraciones de  $25 \text{ } \mu\text{mol/L}$ , lo que pone en evidencia el

papel determinante de la polaridad y composición de las superficies en la retención de compuestos polares tales como los pentaclorofenoles.

**Beckhauser A., Moreira R. (2000).** Estudiaron la remoción de fierro, manganeso y cromo, en concentraciones bajas (< 50 ppm) en efluentes de la industria del cuero y empresas galvánicas, con un adsorbente de bajo costo (arcilla activada con HCl). Los resultados experimentales mostraron una buena capacidad de adsorción del material (70% ), resultando económicamente viable.

## **IV. TÉCNICAS EXPERIMENTALES**

## **IV. TÉCNICAS EXPERIMENTALES**

A continuación se explican los equipos y técnicas experimentales utilizados en el presente trabajo.

### **IV.1 ACTIVACIÓN NEUTRÓNICA**

Las muestras de arcilla purificada, con tratamiento ácido y apilado y después del contacto con efluentes de Cromo y Zinc fueron analizados por activación neutrónica para determinar su composición química.

El análisis se realizó en el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) según el método K – Sub-cero empleando irradiaciones cortas. Se utilizó el siguiente procedimiento:.

Se prepararon estándares de comparación conteniendo 5000  $\mu\text{g}$  de Sodio ó 300  $\mu\text{g}$  de arsénico. Se depositó mediante micropipeta calibrada 250 $\mu\text{L}$  de solución patrón de NaCl ó  $\text{As}_2\text{O}_3$  en envases de polietileno conteniendo alícuotas de 100 mg de celulosa pura en polvo. La



evaporación se llevó a cabo con una lámpara infrarroja y posteriormente los envases fueron sellados con calor.

Las muestras se envasaron en el mismo tipo de cápsula bajo el mismo procedimiento. Las cápsulas son de conformación especial ya que permiten irradiar y contar tanto estándares y muestras con una geometría discoidal definida de 9 mm. de diámetro y alrededor de 2 mm. de altura.

Cada muestra se irradió conjuntamente con un patrón empleando un sistema neumático de transferencia de muestras terminado en un cabezal de irradiación sometido a un flujo neutrónico térmico de  $1.6 \times 10^{13} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

Después de tiempos adecuados de decaimiento, se midieron las muestras y patrones frente a un detector de germanio intrínseco de 15% de eficiencia relativa y 1.8 Kev de resolución para el fotopico de 1332.5 Kev del  $^{60}\text{Co}$ . Se emplearon distancias de contaje de 12.5 cm. y 5.5 cm. a fin de minimizar los efectos de pérdidas por autocoincidencias gamma-gamma.

La curva de eficiencia del detector fue obtenida con una fuente patrón de  $^{152}\text{Eu}$  a 12.5 cm. de distancia. Todos los espectros fueron adquiridos a través de un analizador multicanal Canberra S-85 y transferidos a una microcomputadora personal para ser procesados mediante el programa DB Gamma Versión 5.0.

Los cálculos de concentración se efectuaron mediante un programa desarrollado en el IPEN y se utilizaron los valores de las constantes nucleares pertinentes publicadas por De Corte (De Corte, 1989).

Los parámetros experimentales utilizados y los elementos determinados se muestran en la Tabla N° IV.1.1.

**Tabla N° IV.1.1 Parámetros experimentales en Activación Neutrónica**

Parámetros	Secuencia A	Secuencia B
Tiempo de irradiación	5s	900s
Tiempo de decaimiento	900s	2 a 6 días
Tiempo de contaje	1000s	1.5 a 555 horas
Distancia de contaje	12.5cm	5.5cm
Patrón	Na	As
Aplicada a	muestras geológicas	muestras geológicas
Elementos analizados	Al, Ca, Mg Na, Ti y V	Br, Ce, Cr, Fe, La, Sc, Sm, Zn

## IV.2 ADSORCIÓN – DESORCIÓN DE N<sub>2</sub>

La determinación del área superficial de las muestras se realizó a partir del estudio de las isothermas de adsorción de nitrógeno en el equipo BET.

El sistema empleando es un equipo volumétrico de vidrio junto a una línea de alto vacío.

Las muestras entre 0.13 - 0.25 g fueron previamente secadas a 100°C por 3 horas y luego desgasificadas a 250 °C por 2 horas a 10<sup>-6</sup> Torr. de presión. Durante el análisis las presiones de nitrógeno (T = 77 K) fueron incrementadas y se anotaron las cantidades adsorbidas en el equilibrio hasta alcanzar la saturación.

El área superficial se obtiene con los datos tomados a presiones relativas entre 0.05 y 0.35, tomando como referencia la superficie transversal de la molécula de nitrógeno (0.162 nm<sup>2</sup>). Los datos experimentales obtenidos y la aplicación de la Ecuación BET (Brunauer,

1938) para todas las muestras analizadas mediante esta técnica se encuentran en el Anexo N° XII.2.

### **IV.3 DIFRACCIÓN DE RAYOS X (DRX)**

El método utilizado es el de polvo cristalino en donde la muestra es sólida y policristalina compuesta por cristales diminutos con orientaciones completamente al azar.

Los diagramas de Difracción de Rayos X se obtuvieron en un difractómetro marca TUR - M62 con radiación de  $\text{CrK}\alpha$ , con una longitud de onda de  $2.29 \text{ \AA}$ , filtro de níquel, 40 Kv y 25 mA. El barrido (entre  $2^\circ$  y  $60^\circ$ ) se hizo a una velocidad de 1 grado por minuto trabajando en un rango de intensidad de  $1 \times 10^3$  y RTC de 2.

### **IV.4 ESPECTROSCOPIA INFRARROJA**

La identificación de los grupos superficiales para el estudio de las bandas de los espectros infrarrojos de las muestras se llevó a cabo en un Espectrómetro infrarrojo Perkin. Elmer – Serie 1600, con un rango espectral de  $4000$  a  $400 \text{ cm}^{-1}$  y resolución de  $4 \text{ cm}^{-1}$ . El detector es de tipo DTGS con una ventana de KBr y una velocidad del interferómetro móvil de  $0.32 \text{ cm/s}$ . Las muestras se prepararon por dilución con KBr (aproximadamente el 98% del total) formando pastillas bajo una presión de  $5.5 \text{ Kg/cm}^2$ .

#### IV.5 ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA VISIBLE

El análisis de los efluentes de Cromo, Cobre, Níquel y Zinc, antes y después del contacto con la arcilla, se determinó mediante Espectroscopía Ultravioleta – Visible en un Espectrofotómetro UV-1601 Shimadzu de doble haz, con un rango de medida de longitud de onda ( $\lambda$ ) de 190 nm a 1100 nm utilizando lámpara de Deuterio o halógena de tungsteno de acuerdo al  $\lambda$  requerido. El equipo tiene una apertura de la ranura del monocromador (resolución) de 2nm y una rejilla de difracción que abarca 900 líneas/mm de desviación. Las celdas usadas fueron de cuarzo con 1cm. de espesor.

Los efluentes analizados fueron sometidos a un tratamiento previo, el cual se explicará en el Capítulo del Estudio Experimental de la Adsorción metálica, con el objetivo de eliminar interferencias presentes o diluir la muestra cuando el contenido del elemento (Cr, Cu, Ni ó Zn) o el pH no estaban dentro del intervalo de trabajo (Anexo N° XII.4).

## **V. MATERIALES**

## V. MATERIALES

### V.1. BENTONITA. GENERALIDADES

La bentonita es un mineral arcilloso compuesto principalmente por montmorillonita, que es un filosilicato de tipo laminar perteneciente al grupo de las esmectitas (Sun Kou, 1994).

La red atómica de los filosilicatos está constituida por tetraedros de Si (O, OH)<sub>4</sub>, y por octaedros de M (O, OH)<sub>6</sub>, con M = Al<sup>+3</sup>, Mg<sup>+2</sup> o Fe<sup>+2, +3</sup> (Figura N° V.1.1). Los tetraedros están unidos, unos a otros, compartiendo los oxígenos situados en sus vértices, y sus bases están en el mismo plano para formar una red hexagonal.

El oxígeno apical situado en el vértice opuesto a la base del tetraedro está orientado en la dirección normal a la lámina y al mismo tiempo forma parte de la lámina octaédrica adyacente. El plano común de unión de las láminas octaédrica y tetraédrica está formado por oxígenos apicales compartidos, más grupos OH no compartidos que se ubican en el

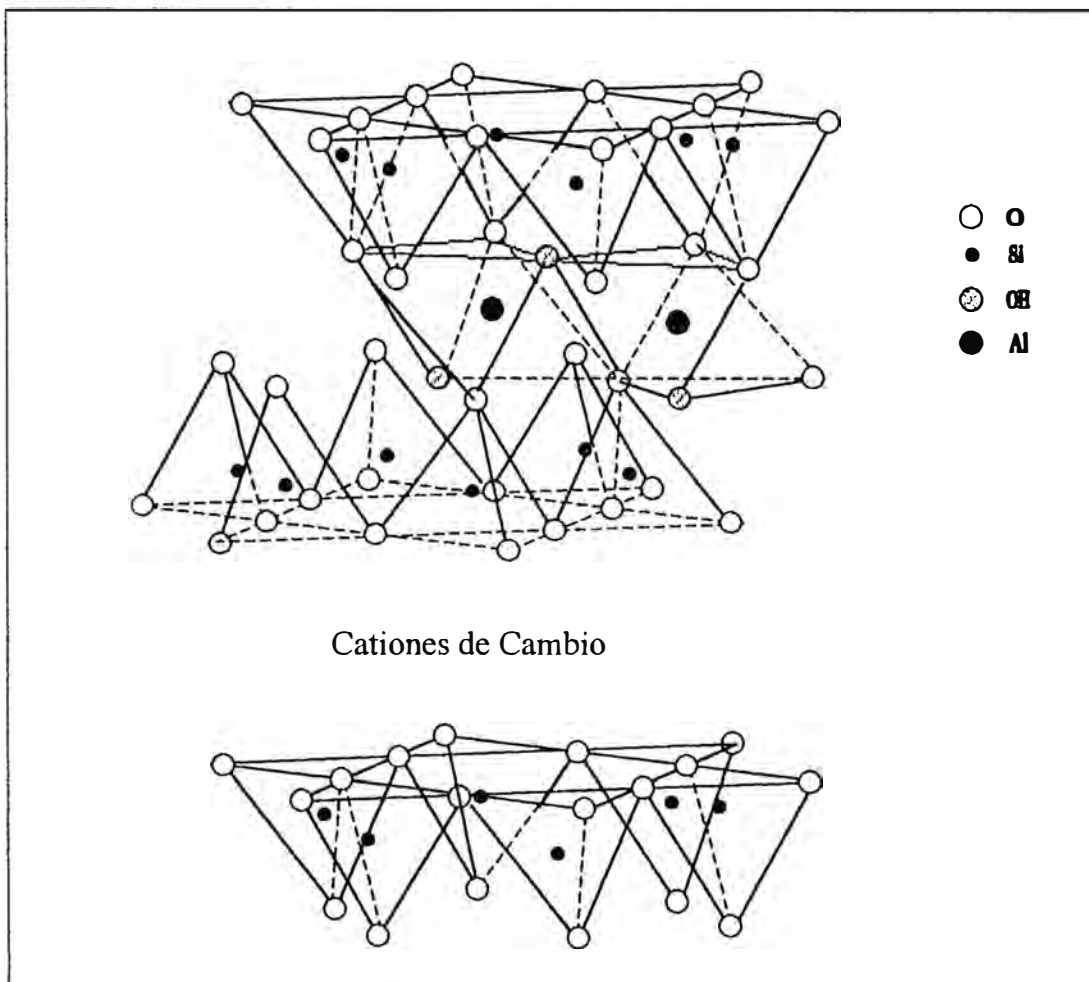
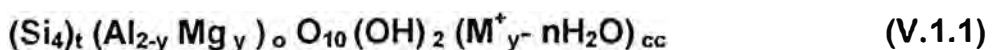


Figura N° V.1.1. Estructura de la Montmorillonita

centro de cada anillo cerrado formado por seis oxígenos apicales y colocados al mismo nivel que ellos.

Estructuralmente la montmorillonita es un silicato laminar del tipo 2:1, formado por una capa de alúmina octaédrica entre dos de sílice tetraédrica, ambas con los vértices dirigidos hacia la capa octaédrica. En la estructura existen cargas negativas debido a sustituciones isomórficas tanto en las capas tetraédricas, de  $\text{Si}^{+4}$  por  $\text{Al}^{+3}$ , como en las octaédricas de  $\text{Al}^{+3}$  por otros cationes divalentes como el  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ , etc., que son compensados por cationes hidratados intercambiables situados entre las láminas. Los cationes presentes más comunes son  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , pero también pueden haber otros cationes, incluso iones orgánicos, que se pueden introducir por intercambio iónico. La cantidad total de estos cationes se determina analíticamente y se denomina capacidad de cambio catiónico de la arcilla (CCC).

La fórmula idealizada de la montmorillonita (Brindley y Brown, 1980), considerando la mitad de la celda elemental y sus sustituciones tetraédricas sería:



donde los cationes intercambiables están como iones monovalentes,  $\text{M}^+$ , y estos se muestran hidratados por  $n\text{-H}_2\text{O}$ , que incluye el agua interlaminar no asociada específicamente con los iones.



La bentonita se muestra como un material de interés para ser estudiado por presentar características de acidez, de intercambio iónico y de hinchamiento adecuadas para adsorción y catálisis.

### **V.1.1 CARACTERÍSTICAS DE LA MATERIA PRIMA**

Para este estudio se ha empleado una bentonita sódica, proporcionada por la Empresa Agregados Calcáreos S.A. La arcilla presenta una coloración ocre claro y es de apariencia pulverulenta. Fue sometida a un proceso de molienda y tamizado con malla Tyler N° 60, posteriormente fue purificada de otros materiales acompañantes (feldespatos, mica, cuarzo y materia orgánica), reteniéndose la fracción menor a 2  $\mu\text{m}$  obtenida por sedimentación controlada (Subcapítulo V.2), y que corresponde mayoritariamente (95 %) a la fracción montmorillonítica; a esta muestra la denominaremos en adelante "B".

La arcilla B presenta las siguientes características:

#### **a) Hinchamiento**

Esta característica fue evaluada mediante el siguiente procedimiento:

En una probeta graduada de 100 ml se colocó un gramo de arcilla seca y tamizada haciendo que se dispersara totalmente en aproximadamente 20 ml de agua. Luego, se completó con agua hasta 100 ml. Se dejó reposar por 24 horas y se registró la diferencia de altura de la suspensión de arcilla al inicio y al final de la prueba.

Se observó que la muestra B. poseía una alta capacidad de hinchamiento (Tabla N° V.1.1.1) característica de una montmorillonita sódica con cationes de intercambio como  $K^+$  y  $Na^+$  (Fayad, 1998).

**Tabla N° V.1.1.1 Prueba de hinchamiento de la Arcilla B**

Muestra	Hinchamiento (ml)	Capacidad de hinchamiento	Observación
B	5.3	7.6 veces	Perranece en suspensión

**b) Medida del pH**

Fue determinada de la siguiente manera:

A 2 g. de arcilla B seca y tamizada se le agregó, en agitación constante, 100 ml. de agua destilada hasta formar una suspensión estable. Previamente el pH del agua fue ajustado a pH neutro, adicionando carbonato de sodio o ácido sulfúrico (1/10). La medición se realizó con un pHmetro marca Cole-Parmer's modelo 5652-10 con electrodo Cole-Parmer modelo 60648.

El resultado (Tabla N° V.1.1.2) da un valor que corresponde a una característica básica.

**Tabla N° V.1.1.2 pH de la Arcilla B**

Muestra	pH (al 2%)	Temp. (°C)
B	9.3	17.2

c) **Capacidad de cambio Catiónico (CCC)**

Como es conocido, la bentonita posee un buen grado de hidratación y una estructura laminar intermitente dentro de la cual existen cationes de cambio, capaces de ser sustituidos isomórficamente por otros cationes, los cuales constituyen la capacidad de cambio catiónico (CCC) de una arcilla. La CCC nos da una guía útil de la tendencia a la intercalación del mineral y es expresada en miliequivalentes de catión intercambiable por 100 g. de arcilla.

El método utilizado fue la prueba del azul de metileno que consistió en preparar una suspensión con 3 g de arcilla seca y tamizada y 300 ml de agua destilada. Se agitó durante 15 minutos, luego se extrajo con una pipeta 50 ml de la muestra que estaba siendo agitada y se llevó a un matraz al cual se le agregó 2 ml de ácido sulfúrico 5 N procediendo seguidamente a titular con una solución de azul de metileno 0.01 N hasta que una gota de la muestra formara una aureola celeste en el papel de filtro común. La CCC en meq/100g fue calculada utilizando la siguiente fórmula:

$$CCC = \text{ml. consumidos} / \text{peso de la muestra} * 15$$

El resultado se muestra en la Tabla N° V.1.1.3

**Tabla N° V.1.1.3 Capacidad de cambio iónico**

Muestra	CCC (meq/100g)	Temp. (°C)
B	117.5	18

d) **Análisis Elemental**

En la Tabla N° V.1.1.4 se registra el resultado del análisis elemental de la muestra B por Absorción Atómica, obtenida de los resultados del trabajo de investigación de Fayad J. H. (Fayad, 1998).

**Tabla N° V.1.1.4 Análisis químico elemental de la muestra B**

Elemento	(% peso)
SiO <sub>2</sub>	62.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.04
CaO	1.79
MgO	2.04
Na <sub>2</sub> O	2.13
K <sub>2</sub> O	0.54
TiO <sub>2</sub>	N.D.
MnO	N.D.
P x C	15.57

Donde:

PxC = son los productos combustibles (volátiles, materia orgánica, humedad).

N.D. = no determinado

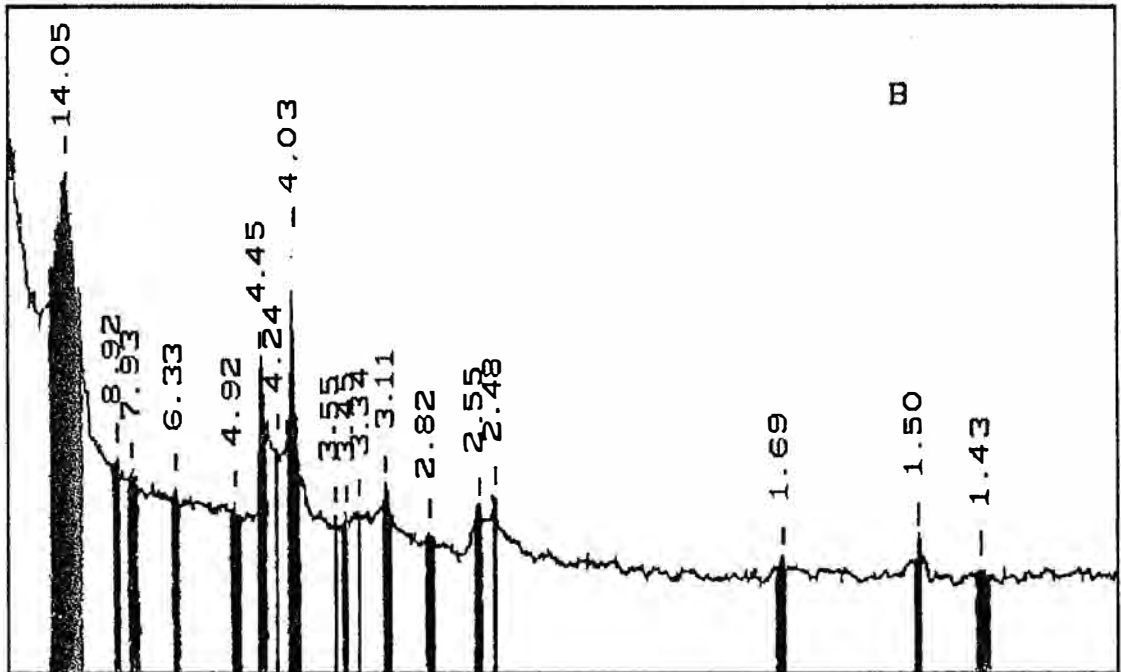
Adicionalmente el contenido de cada elemento se determinó por activación neutrónica siguiendo el procedimiento descrito en el Subcapítulo N° IV.1, los resultados se muestran en la Tabla N° V.1.1.5

**Tabla N° V.1.1.5 Composición química de B mediante análisis por Activación Neutrónica**

Elemento	Símbolo	Unidad	Contenido
Aluminio	Al	%	7.3
Bromo	Br	ppm	4.9
Calcio	Ca	%	0.42
Cerio	Ce	ppm	75.4
Cobre	Cu	ppm	<100
Cromo	Cr	ppm	21.9
Disprobio	Dy	ppm	5.8
Escandio	Sc	ppm	13.75
Hierro	Fe	%	2.76
Iterbio	Yb	ppm	3.4
Lantano	La	ppm	29.4
Magnesio	Mg	%	1.53
Manganeso	Mn	ppm	110
Samarío	Sm	ppm	7.2
Sodio	Na	%	1.92
Titanio	Ti	ppm	0.12
Vanadio	V	ppm	18.5
Zinc	Zn	ppm	121.1

**e) Análisis Mineralógico**

El difractograma de rayos X de la muestra purificada B se da en la Figura N° V.1.1.1. En la Tabla N° V.1.1.6 se registra el valor del espaciado basal  $d_{001}$  (Å) y de otros picos característicos de la arcilla.



**Figura N° V.1.1.1 Difractograma de Rayos X de la muestra B**

De la Figura N° V.1.1.1 se observan picos a 4.03, 2.82 y 2.48 Å que corresponden a fichas ASTM 13-259 y 11-695 pertenecientes a muestras de montmorillonita sódica magnésica.

Una señal a 1.5 Å ( $d_{060}$ ) nos indica la presencia de un mineral octaédrico. También se observan picos que se atribuyen a pequeñas trazas de micas tipo illitas, feldspatos tipo oligoclasa y cuarzos tipo  $\alpha$ -cristobalita ( $\text{SiO}_2$ ).

**Tabla N° V.1.1.6 Espaciado Basal de la muestra B**

Espaciado basal	Å	Ficha ASTM
$d_{001}$	14.05	3 - 0016
$d_{002}$	4.45	3 - 0016
$d_{008}$	2.55	3 - 0016
$d_{060}$	1.5	12 - 219

### f) Análisis Textural

El análisis textural de la muestra B se realizó a partir de las isotermas de adsorción de  $N_2$  a 77 °K. De los datos de adsorción, hasta presiones relativas de 0.35, se obtuvo el área superficial por aplicación de la Ecuación BET, siguiendo el procedimiento explicado en el Anexo N° XII.2.

En la Tabla N° V.1.1.7 se muestra el resultado del área superficial de la arcilla B.

**Tabla N° V.1.1.7 Area Superficial ( $S_{BET}$ )**

Muestra	$S_{BET}(m^2/g.)$	$V_m$	C
B	47.2	10.80	27.74

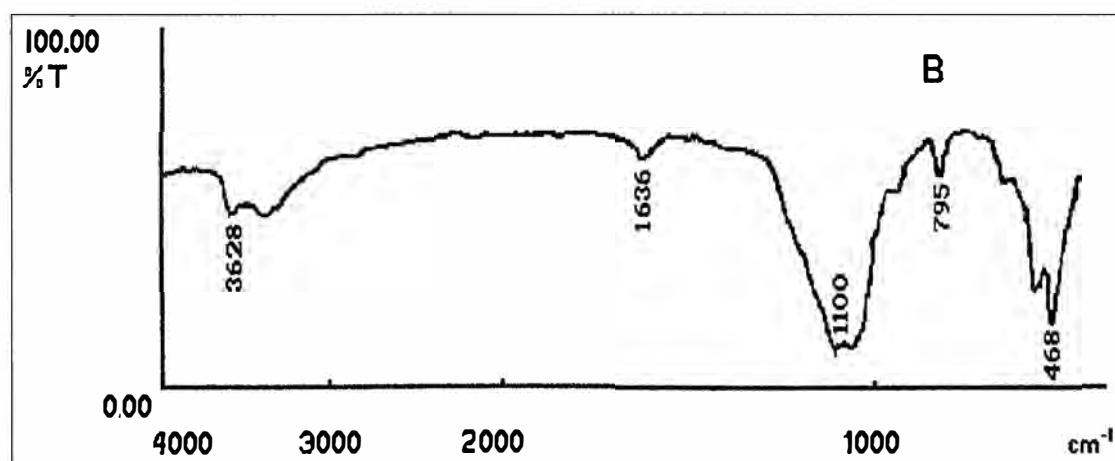
Donde:

$V_m$  = volumen necesario para formar la monocapa (cc/g)

C = constante BET relacionada con los calores de adsorción y calor de evaporación del adsorbato.

### g) Análisis Estructural

La identificación de los grupos superficiales de la muestra B se realizó por Espectroscopía Infrarroja (Figura N° V.1.1.2)



**Figura N° V.1.1.2 Espectrograma IR de la muestra B**

En la Figura N° V.1.1.2 se pueden observar vibraciones de tensión y de deformación a  $3628\text{ cm}^{-1}$  y  $1636\text{ cm}^{-1}$  correspondientes con los enlaces de hidrógeno entre el agua interlaminar y los oxígenos superficiales. A  $1040\text{ cm}^{-1}$  y  $521\text{ cm}^{-1}$  aparecen vibraciones de tensión del enlace Si–O–Si y de deformación del Si–O respectivamente. La señal correspondiente a la sílice libre se presenta a  $795\text{ cm}^{-1}$  y la del enlace Si–O–Mg a  $468\text{ cm}^{-1}$ . Hay un pico intenso a  $1100\text{ cm}^{-1}$  aproximadamente, que se solapa con la señal a  $1040\text{ cm}^{-1}$  (Si – O – Si) y que puede deberse a la señal producida por trazas de  $\alpha$ -cristobalita, confirmadas en el análisis de difracción de rayos X.

## V.2 TRATAMIENTOS DE MODIFICACIÓN DE LA ARCILLA

Se realizaron las siguientes etapas:

### a) Purificación

La bentonita en su estado natural no viene pura sino acompañada de feldespatos, cuarzos, micas, materia orgánica y otros, por esta razón es necesario realizar la purificación de la arcilla a través de varios procesos: la eliminación de materia orgánica que se logra poniendo en contacto con una solución de  $\text{H}_2\text{O}_2$  1N y la eliminación de carbonatos que se realiza poniendo en contacto con una solución de ácido acético 1N. Después de cada uno de estos pasos la arcilla es lavada varias veces con agua destilada. La obtención de la fracción montmorillonítica  $\leq 2\ \mu\text{m}$  se realizó por decantación controlada en probetas de 2 L, separándose cada 16 h los primeros 20 cm que corresponde aproximadamente a un litro de solución,



que por aplicación de la ley de Stokes corresponde a la fracción  $\leq 2 \mu\text{m}$ . Esta operación se repitió tres veces hasta que la fase líquida quedó clara. A la muestra purificada se le denominó B.

#### **b) Tratamientos aplicados**

La modificación de la arcilla B se realizó mediante tratamiento termoácido o apilaramiento. El procedimiento, parámetros y reactivos utilizados se explican en los Subcapítulos N° V.2.1 y V.2.2.

#### **c) Lavado**

El lavado de la arcilla se realizó con agua desionizada en un filtro Buchner a una presión de vacío de 5 torr, hasta alcanzar el agua de lavado, una conductividad de 20 – 30  $\mu\text{s}$ .

#### **d) Secado**

El secado se realizó en una mufla a 60 °C durante 24 horas, la arcilla modificada una vez seca, fue molida y puesta en el desecador hasta el momento de su uso.

### **V.2.1 TERMOÁCIDO**

El tratamiento termoácido o de activación es un tratamiento químico, en el que se remueven los iones que se encuentran en las interláminas de la arcilla como el sodio, magnesio y calcio, intercambiándolos por iones hidrógenos, de esta manera se produce un cierto grado de ataque a la estructura reticular conteniendo sílice y alúmina. La arcilla modificada por tratamiento ácido posee un alto poder adsorbente debido al aumento de

su superficie interna, con creación de poros de gran tamaño y aumento en su capacidad de intercambio.

En la presente tesis se ha tomado como punto de partida el resultado de la investigación realizada por Fayad (Fayad, 1998) donde se muestra que la arcilla modificada con ácido clorhídrico HCl 1M a una temperatura de 100 °C y 1 hora de activación ácida presentaba hasta un 45 % de adsorción trabajando con efluentes de cromo (III) en concentraciones menores a 800 ppm. Sobre esta base se utilizaron estos parámetros óptimos para estudiar el comportamiento de la arcilla en la adsorción no sólo de cromo sino también de cobre, níquel y zinc en efluentes galvánicos (objetivo de la tesis).

El procedimiento empleado fue el siguiente: Se preparó una suspensión de arcilla con agua (relación sólido/líquido = 1/5). Para ello la arcilla fue incorporada y mezclada con agua desionizada poco a poco hasta conseguir una suspensión homogénea. Luego se incorporó el ácido clorhídrico 1M (relación arcilla/ácido = 1/10). Posteriormente la mezcla fue colocada en un reactor con reflujo y mantenida en agitación a temperatura constante de 100 °C durante una hora. Finalmente, la arcilla fue lavada y secada según el procedimiento descrito en el Subcapítulo N° V.2.

La terminología empleada para la denominación de la arcilla sometida a tratamiento ácido fue la siguiente:

BCI / 1 / 100 / 1

Donde:

B = Muestra de arcilla B purificada.

Cl = Tratamiento con ácido clorhídrico.

1 /100 /1 = Concentración molar del ácido / temperatura (° C) / tiempo (h)

## V.2.2 APILARAMIENTO

Tomando en cuenta las propiedades de hinchamiento e intercambio iónico que tiene la arcilla, se puede sustituir los cationes de cambio de la arcilla (subcapítulo V.1) por grandes hidroxilaciones provenientes de la hidrólisis de iones metálicos, los cuales tras un proceso de calcinación se transforman en óxidos que actúan como pilares separando las láminas de la arcilla, y exponiendo de esta manera, una mayor área interna. Esta clase de materiales se denominan en la literatura Pillared Interlayered Clay: PILC.

Los cationes comúnmente utilizados son polihidróxilos, provenientes de iones metálicos (Al, Zr, Fe, Ni y otros) que presenta en disolución características favorables para la hidrólisis. En la Figura N° V.2.2 se muestran las etapas del proceso de apilaramiento.

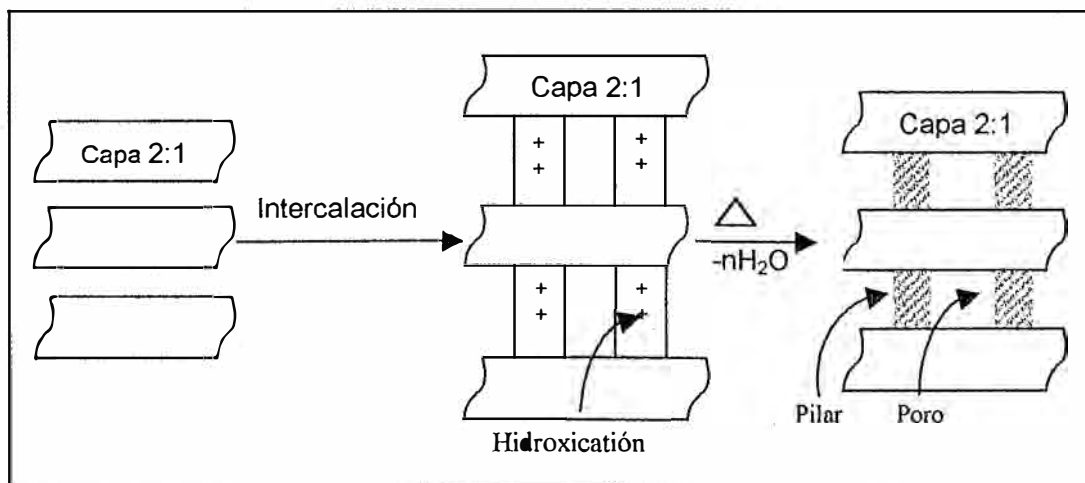


Figura N ° V.2.2 Etapas del proceso de apilaramiento

El procedimiento seguido fue en base al desarrollado por Sun Kou (Sun Kou, 1994). Como agente apilarante se utilizó una solución 0.2 M de  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  la cual fue neutralizada utilizando una solución de NaOH 0.5M, mezclándose en proporciones adecuadas para obtener la relación molar  $\text{OH}/\text{Al} = 2$ . La adición de la base se realizó gota a gota, con agitación constante, para evitar la concentración local de NaOH que pudiera provocar la precipitación del hidróxido de aluminio. La solución obtenida se dejó envejecer durante 3 horas a 40 °C en reflujo.

La intercalación se realizó por intercambio catiónico entre  $\text{Na}^+$  y los policationes de Al, especie polimérica tipo Keggin, mediante adición lenta de la solución apilarante a una relación  $\text{OH}/\text{Al} = 2$ , sobre una suspensión de arcilla B al 2% previamente hidrolizada durante dos días. La relación Al/arcilla ensayada fue de 20 meq/g.

El lavado posterior fue con agua desionizada por filtración al vacío hasta eliminar los cloruros (conductividad menor a 20 – 30  $\mu\text{s}$ ). El sólido se secó en la estufa a 60 °C durante 24 horas.

Finalmente la muestra resultante fue calcinada a 350 °C por 3 horas. La denominación que se utilizará en adelante para la arcilla con tratamiento apilarado será:

BPILC - Al / 20 / 2

Donde: BPILC – Al = Arcilla B apilarada con aluminio:

20 = relación Al/ arcilla de 20 meq/g

2 = relación OH/Al de 2

### V.3 CARACTERIZACIÓN DE LAS ARCILLAS MODIFICADAS

A continuación se presentan los resultados de la caracterización de las arcillas modificadas. Para un mejor análisis de los datos obtenidos por cada tratamiento empleado se han agrupado los resultados correspondientes a cada uno de ellos, incluyéndose con fines comparativos tanto en figuras como en tablas, el perteneciente al material original (arcilla purificada B).

#### V.3.1 ANÁLISIS ELEMENTAL

La composición química de las arcillas se realizó mediante análisis por activación neutrónica, siguiendo el procedimiento descrito en el subcapítulo IV.1, los resultados se muestran en la Tabla N° V.3.1.1

De dicha tabla se observa que el tratamiento con HCl afectó la estructura de la arcilla B, ya que los valores de elementos estructurales como Al, Fe y Mg muestran un decrecimiento. Los valores de los cationes de cambio: Na y Ca de la muestra BCl/1/100/1 fueron inferiores a los de la muestra B, lo cual sugiere que estos cationes que estaban presentes entre las láminas de la montmorillonita, fueron sustituidos por iones  $H_3O^+$  provenientes del ataque ácido.

En la muestra BPILC-Al /20/2 el incremento en la cantidad de Al es consecuencia del apilamiento, en que se sustituyen los iones  $Na^+$  por los policationes de Al de la solución apilarante. También se observa una disminución del contenido de Fe por efecto del intercambio iónico y un

aumento en los contenidos de Ca y Mg; esto último puede provenir de la dureza del agua utilizada en el lavado de la muestra.

**Tabla N° V.3.1.1 Composición química obtenida por activación neutrónica**

Elemento	Unidad	B	BCI/1/100/1	BPILC-AL/20/2
Al	%	7.30	6.99	9.97
Br	ppm	4.90	3.3	1.10
Ca	%	0.42	0.27	2.06
Ce	ppm	75.40	30.56	98.17
Cu	ppm	<100	-	-
Cr	ppm	21.90	10.33	5.9
Dy	ppm	5.80	3.03	5.26
Sc	ppm	13.75	11.2	6.75
Fe	%	2.76	2.01	1.64
Yb	ppm	3.40	3.3	3.17
La	ppm	29.40	12.06	44.63
Mg	%	1.53	0.92	2.01
Mn	ppm	110	39.67	105.33
Sm	ppm	7.20	2.93	7.40
Na	%	1.92	0.35	0.05
Ti	ppm	0.12	0.16	0.12
V	ppm	18.50	20.67	17
Zn	ppm	121.10	57	98.67

### V.3.2 ANÁLISIS MINERALÓGICO

En la Figura N° V.3.2.1 se dan los difractogramas de las muestras: B, BCI / 1 / 100 / 1 y BPILC - AL / 20 / 2. En la Tabla N° V.3.2.1 se dan los valores de sus respectivos espaciados basales  $d_{001}$  en Å.

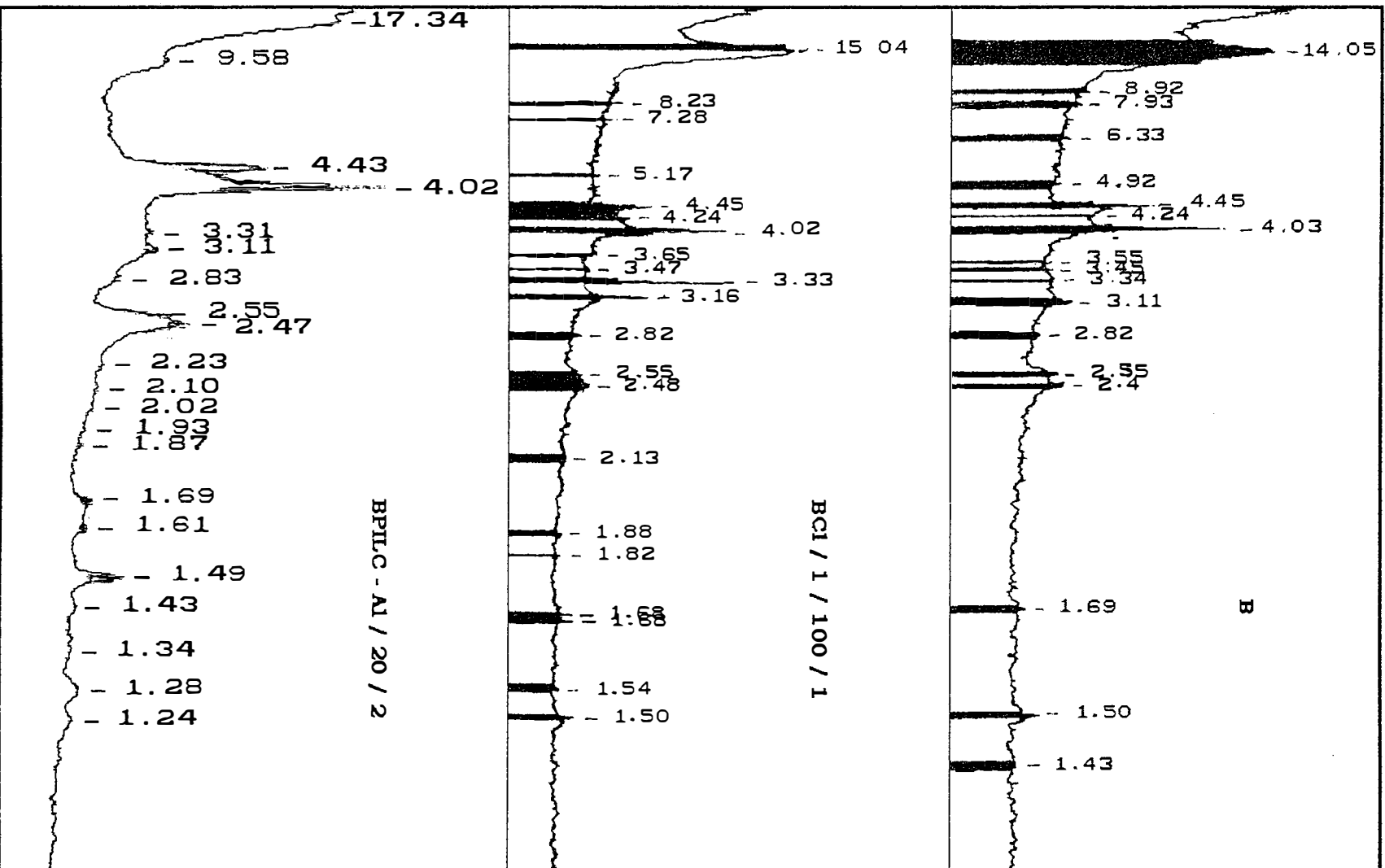


Figura N° V.3.2.1 Difractogramas de Rayos X de las muestras: B, BCI/1/100/1 y BPILC-AI/20/2.

**Tabla N° V.3.2.1 Espaciados Basales  $d_{001}$** 

Muestra	$d_{001}$ (Å)
B	14.05
BCI /1/ 100 / 1	15.04
BPILC -Al / 20 / 2	17.34

De la Figura N° V.3.2.1 vemos que el tratamiento termoácido permite una apertura de los poros, como se observa, la distancia interlaminar se incrementa ligeramente desde un espaciado basal de 14.05 Å de la muestra original hasta 15.04 Å.

Como se indicó anteriormente el tratamiento termoácido puede producir un cierto grado de ataque a la capa octaédrica de Al, así lo evidencia la disminución del contenido de este elemento (Tabla N° V.1.1.5), las nuevas señales a 3.33 y 3.16 Å corresponden a la presencia de  $\alpha$ -cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) confirmándose entonces la creación de poros de mayor tamaño.

En cuanto a la arcilla BPILC-Al/20 /2 (Figura N° V.3.2.1), se observa que el incremento del espaciado basal  $d_{001}$  es mucho mayor que en la arcilla termoactivada incrementándose su valor de 14.05 Å a 17.34 Å.

A diferencia del tratamiento ácido, el método de apilamiento no produce alteración de la estructura de la arcilla (no se presentan nuevas señales en el DRX), por el contrario el incremento del espaciado  $d_{001}$  se debe a la introducción de policationes de Al, cuyos tamaños pueden



oscilar entre 4 - 9 Å (principalmente el ión Keggin de Al tiene un tamaño aproximado de 9 Å).

La poca definición de este espaciado se puede atribuir a la presencia de trazas de otros materiales cuyos picos prevalecen a 4,43 y 4,02 Å (cristobalita) los que estarían ocupando lugares en el espaciado interlaminar no sustituidos por el hidroxidación de Al.

Por otro lado, la mayor acentuación del pico que aparece en las proximidades de 9.58 Å es indicativo de especies de Al que no se han apilado completamente y que se acentúa tras la calcinación de las muestras.

También se observa que prevalecen los picos originales, principalmente el correspondiente al espaciado basal  $d_{060}$  a 1.5 Å típico de las montmorillonitas dioctaédricas. La no modificación de esta señal por el apilamiento confirma que se ha logrado el objetivo buscado, abrir la lámina exponiendo su área interna sin alterar su estructura original.

### V.3.3 ANÁLISIS TEXTURAL

En la Tabla N° V.3.3.1 se muestran los resultados de las áreas superficiales de las arcillas: B, BCI /1/100/1 y BPILC-Al /20/2.

**Tabla N° V.3.3.1 Areas Superficiales**

Muestra	$S_{\text{BET}}$ (m <sup>2</sup> /g)
B	47.2
BCI / 1 / 100 / 1	128.4
BPILC - Al / 20 / 2	181.6

Como puede apreciarse ambos tratamientos incrementan el área superficial de la arcilla, dicho aumento concuerda proporcionalmente con el incremento del espaciado  $d_{001}$ .

En el caso de la muestra BCI /1/100/1 es muy probable que se haya generado mesoporos, por la extracción de los iones de las interláminas, a consecuencia del ataque ácido.

El incremento del área superficial hasta  $181.6 \text{ m}^2/\text{g}$  en la arcilla BPILC-Al/20/2 se relaciona principalmente con la creación de microporos debido al proceso de apilamiento.

#### V.3.4 ANÁLISIS ESTRUCTURAL

En la figura N° V.3.4.1 se muestran los espectrogramas de IR de las arcillas B y BCI/1/100/1.

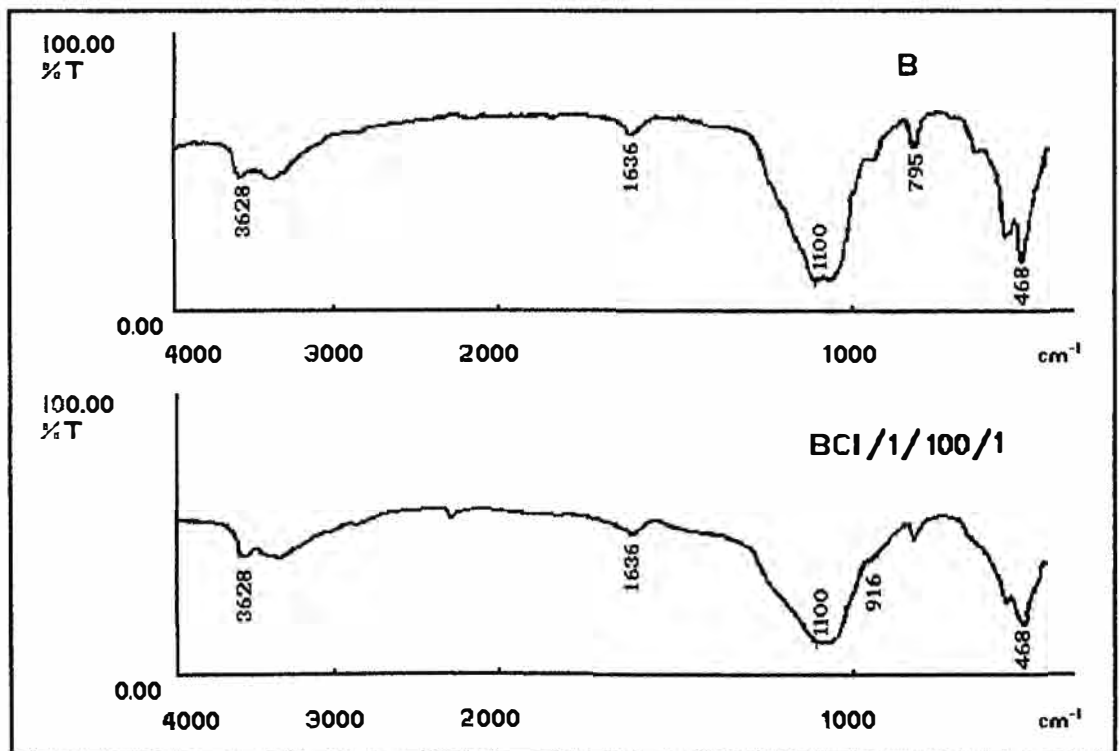


Figura N° V.3.4.1 Espectrogramas IR

De la Figura N° V.3.4.1 se observa que el ataque ácido disminuye las intensidades de las señales en las zonas correspondientes a las vibraciones de tensión ( $3628\text{ cm}^{-1}$ ) y deformación ( $1636\text{ cm}^{-1}$ ) de los grupos hidróxilos OH. En la zona perteneciente a la sílice libre ( $1100\text{ cm}^{-1}$ ) la banda se ensancha, lo cual indica mayor cantidad de sílice libre con respecto al estado inicial de la muestra B o una mayor interferencia debido a trazas de cristobalita. También se observa la desaparición de la señal a  $916\text{ cm}^{-1}$  correspondientes a las vibraciones Al-OH-Al.

La intensidad de la señal Si-O-Mg a  $468\text{ cm}^{-1}$  permanece prácticamente inalterable, lo cual indicaría que el ataque ácido ocurre en forma preferencial hacia los enlaces más débiles Al-OH-Al de la capa octaédrica.

**VI. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCIÓN  
DE CROMO, COBRE, NÍQUEL Y ZINC EN  
ARCILLAS MODIFICADAS**

## **VI. ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA ADSORCIÓN DE CROMO, COBRE, NÍQUEL Y ZINC EN ARCILLAS MODIFICADAS**

En este trabajo se tomaron como efluentes dos tipos de solución:

- 1) Soluciones de la miniplanta instalada en el Lab. de Electroquímica FIQM – UNI.
- 2) Soluciones de una planta galvánica Industrial.

Se tomaron en consideración variables como cantidad de arcilla, volumen de efluente, concentración, tiempo y pH.

El estudio se realizó inicialmente con soluciones conteniendo un solo metal, posteriormente se realizaron ensayos con mezclas de soluciones: Cr-Cu, Cu-Ni, etc., y el estudio se completó con la caracterización de la arcilla después del contacto con un efluente determinado.

## VI.1 SOLUCIONES DE LA MINIPLANTA INSTALADA EN EL LABORATORIO DE ELECTROQUÍMICA FIQM - UNI.

A continuación se muestra la composición de los baños utilizados en el Laboratorio de Electroquímica.

**Tabla N° VI.1.1 Composición de los baños de la miniplanta instalada en el Laboratorio de Electroquímica FIQM - UNI**

Baño	Sustancias	Composición
Cromo	Anhidrido Crómico $\text{CrO}_3$	350 g/L
Cobre Acido	Sulfato de Cobre $\text{CuSO}_4$ Acido Sulfúrico $\text{H}_2\text{SO}_4$	240 g/L 60 g/L
Cobre Alcalino	Cianuro de Cobre $\text{CuCN}$ Cianuro de Sodio $\text{NaCN}$	88 g/L 112 g/L
Níquel	Acido Bórico $\text{H}_3\text{BO}_3$ Sulfato de Níquel $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Cloruro de Níquel $\text{NiCl}_2$	40 g/L 300 g/L 60 g/L
Zinc	Cianuro de Sodio $\text{NaCN}$ Hidróxido de Sodio $\text{NaOH}$ Oxido de Zinc $\text{ZnO}$	50 g/L 100 g/L 20 g/L

Los ensayos de adsorción se realizaron en recipientes a escala batch en contacto con las soluciones preparadas en una relación de peso de arcilla – volumen de efluente = 2.5 g/50 ml, a un tiempo de contacto de 5 horas a diferentes concentraciones iniciales (0 - 400 mg/L) y pH constante (para la arcilla BCI/1/100/1 el pH empleado fue de 3 – 3.5 y para la arcilla BPILC-Al/20/2 el pH estuvo entre 4.5 – 5.5).

Se ensayaron condiciones similares tanto para la arcilla activada BCI/1/100/1 como con la apilada BPILC-Al/20/2 con la finalidad de determinar la capacidad de retención de cada uno de los metales en cada

tipo de arcilla. Los resultados se muestran en las Tablas N° VI.1.2 al VI.1.6.

La concentración de equilibrio del metal en cada una de las soluciones fue analizada mediante Espectroscopía Ultravioleta, diluyendo la muestra cuando el contenido del elemento (Cr, Cu, Ni o Zn) no estaba dentro del intervalo de trabajo de las curvas de calibración (Subcapítulo N° XII.4). Previamente al análisis se realizó la eliminación del cianuro de los baños de cobre alcalino y zinc, y un tratamiento previo al baño de cromo para obtener Cr(III) (en el Anexo N° XII.5, se indica el tratamiento seguido).

Para saber el grado de adsorción ( $q$ ) de cada metal en la arcilla se utilizó la isoterma de Freundlich (Vaccari D., 1990) representado matemáticamente como sigue:

$$q = V(C_i - C_e)/M \quad (\text{VI.1.1})$$

Donde:

$q$  = Masa de metal adsorbido por gramo de adsorbente (mg/g)

$V$  = Volumen de solución usado (L)

$C_i$  = Concentración inicial del metal (mg/L)

$C_e$  = Concentración de equilibrio del metal (mg/L)

$M$  = Peso de arcilla (g)

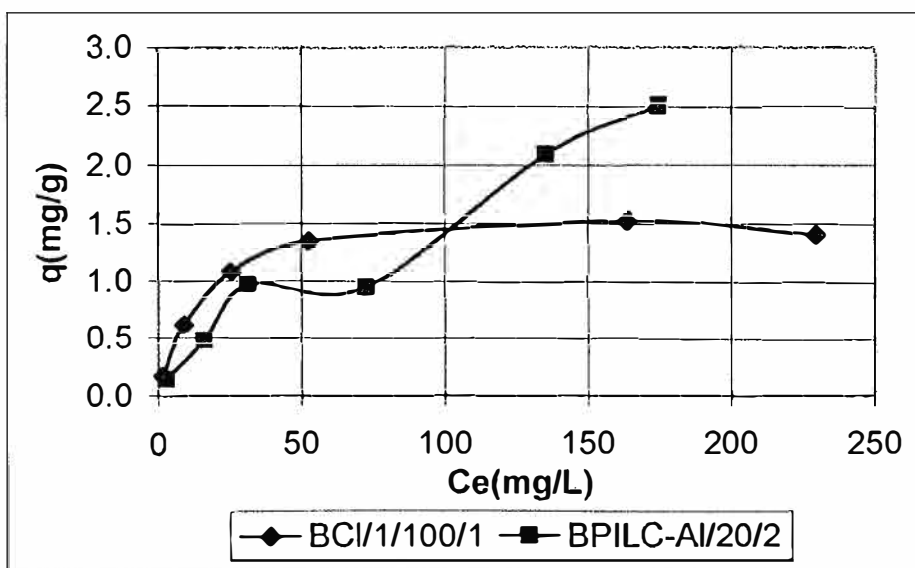
El porcentaje de adsorción en la solución fue calculado utilizando la siguiente ecuación:

$$\%Ads = (C_i - C_e) / C_i * 100 \quad (\text{VI.1.2})$$

Los datos de las isotermas de adsorción para cada metal con los dos tipos de arcilla modificada son representados en las figuras N° VI.1.1 a VI.1.5. Se puede observar que para el cromo, cobre ácido y cobre alcalino hay un mayor % de adsorción en la arcilla ácida y en el caso del níquel y zinc preferentemente se adsorben en la arcilla apilarada. Esta afinidad por un determinado tipo de arcilla modificada fue tomada en cuenta en los posteriores análisis.

**Tabla N° VI.1.2 Adsorción del Cromo sobre las arcillas modificadas**

Arcilla	Efluente/metal	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Cromo Cr(III)	10	1.50	0.170	85.0
		40	8.82	0.624	78.0
		80	25.57	1.089	68.0
		120	52.57	1.349	56.2
		240	163.78	1.524	31.8
		300	229.59	1.408	23.5
BPILC-AI/20/2	Cromo Cr(III)	10	2.77	0.145	72.3
		40	15.84	0.483	60.4
		80	31.35	0.973	60.8
		120	72.56	0.949	39.5
		240	135.27	2.095	43.6
		300	174.45	2.511	41.9

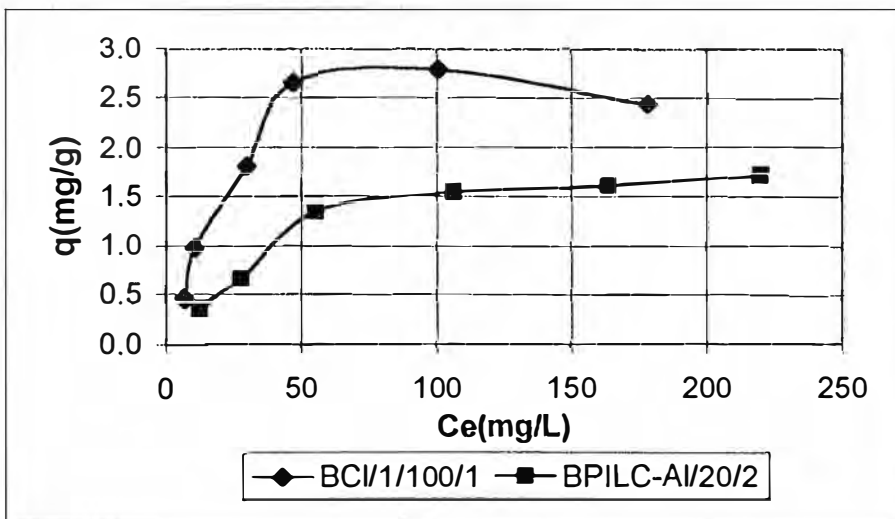


**Figura N° VI.1.1 Adsorción del Cr(III) en la arcilla BCI/1/100/1 y BPILC-AI/20/2**



**Tabla N° VI.1.3 Adsorción del Cobre Acido sobre las arcillas modificadas**

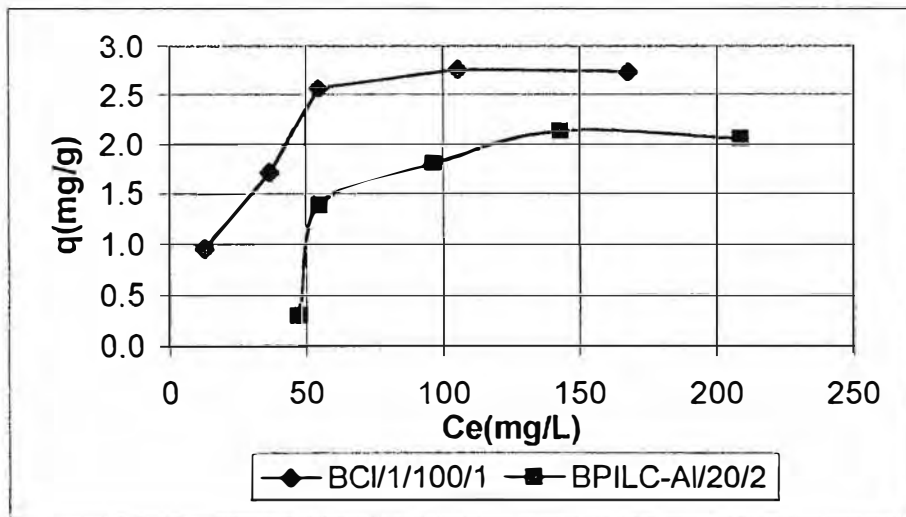
Arcilla	Efluente/metal	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Cobre Acido Cu(II)	30	6.80	0.464	77.3
		60	10.50	0.990	82.5
		120	29.60	1.808	75.3
		180	46.90	2.662	73.9
		240	100.50	2.790	58.1
		300	178.00	2.440	40.7
BPILC-Al/20/2	Cobre Acido Cu(II)	30.5	12.30	0.364	59.7
		61.2	27.60	0.672	54.9
		122.4	54.98	1.348	55.1
		183.6	106.30	1.546	42.1
		244.1	163.60	1.610	33.0
		305.5	219.70	1.716	28.1



**Figura N° VI.1.2 Adsorción del Cu(II) ácido en la arcilla BCI/1/100/1 y BPILC-Al/20/2**

**Tabla N° VI.1.4 Adsorción del Cobre Alcalino sobre las arcillas modificadas**

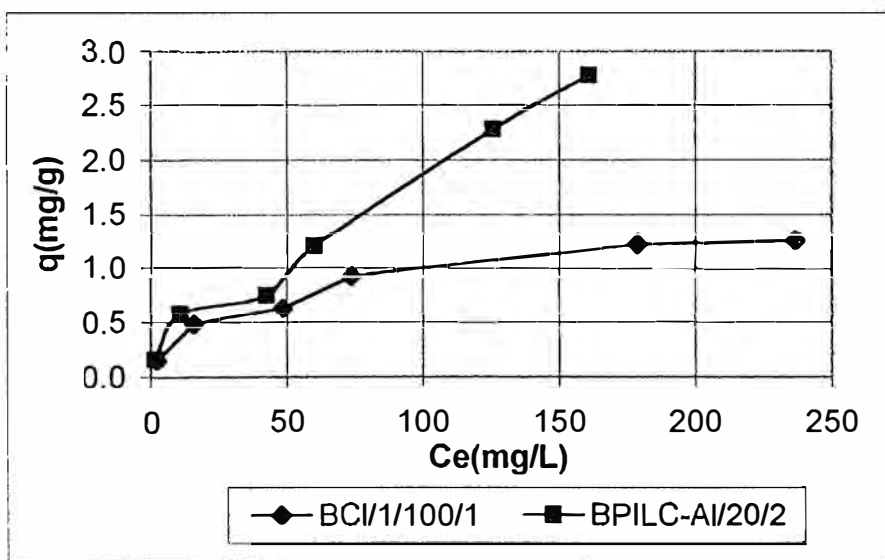
Arcilla	Efluente/metal	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Cobre Alcalino Cu(II)	61	13.00	0.960	78.7
		122	36.50	1.710	70.1
		183	54.60	2.568	70.2
		244	105.80	2.764	56.6
		305	168.00	2.740	44.9
BPILC-AI/20/2	Cobre Alcalino Cu(II)	62.29	47.16	0.303	24.3
		124.58	54.98	1.392	55.9
		186.87	96.54	1.807	48.3
		249.68	143.00	2.134	42.7
		311.46	208.70	2.055	33.0



**Figura N° VI.1.3 Adsorción del Cu(II) alcalino en la arcilla BCI/1/100/1 y BPILC-AI/20/2**

**Tabla N° VI.1.5 Adsorción del Níquel sobre las arcillas modificadas**

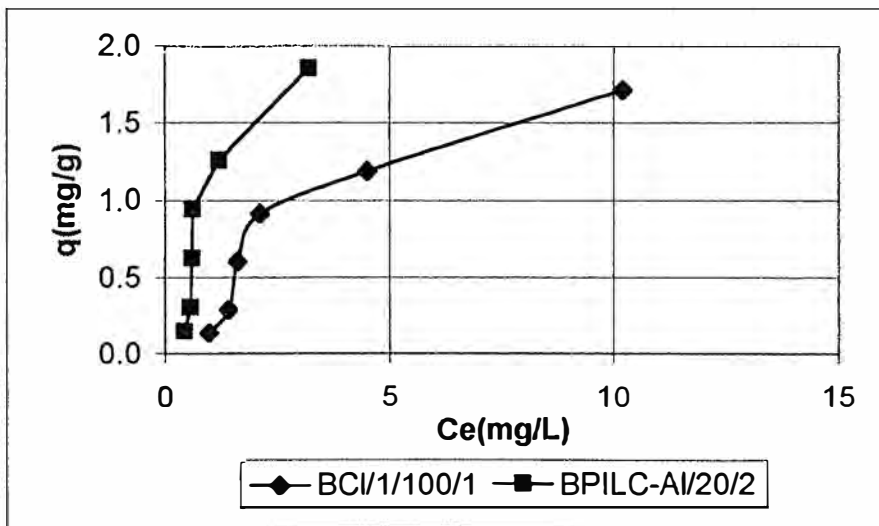
Arcilla	Efluente/metal	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Níquel Ni(II)	10	2.21	0.156	77.9
		40	15.63	0.487	60.9
		80	48.45	0.631	39.4
		120	73.76	0.925	38.5
		240	178.71	1.226	25.5
		300	236.58	1.268	21.1
BPILC-AI/20/2	Níquel Ni(II)	10	1.74	0.165	82.7
		40	10.82	0.584	73.0
		80	42.48	0.750	46.9
		120	59.84	1.203	50.1
		240	125.73	2.286	47.6
		300	161.13	2.778	46.3



**Figura N° VI.1.4 Adsorción del Ni(II) en la arcilla BCI/1/100/1 y BPILC-AI/20/2**

**Tabla N° VI.1.6 Adsorción del Zinc sobre las arcillas modificadas**

Arcilla	Efluente/metal	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Zinc Zn(II)	8	0.98	0.140	87.8
		16	1.41	0.292	91.2
		32	1.61	0.608	95.0
		48	2.12	0.918	95.6
		64	4.50	1.190	93.0
		96	10.20	1.716	89.4
BPILC-AI/20/2	Zinc Zn(II)	8	0.42	0.152	94.8
		16	0.57	0.309	96.4
		32	0.60	0.628	98.1
		48	0.61	0.948	98.7
		64	1.20	1.256	98.1
		96	3.20	1.856	96.7



**Figura N° VI.1.5 Adsorción del Zn(II) en la arcilla BCI/1/100/1 y BPILC-AI/20/2**

## VI.2 SOLUCIONES PROVENIENTES DE UNA PLANTA INDUSTRIAL

Existe un elevado número de establecimientos dedicados a esta actividad (ver Anexo N° XII.1). La planta galvánica en estudio se encuentra ubicada en el distrito de Los Olivos y es de mediana capacidad productiva. La composición de los baños utilizados se muestra en la Tabla N° VI.2.1

**Tabla N° VI.2.1 Composición de los baños de la Planta Galvánica**

Baño	Metal	Concentración (mg/L)
Cromo	Cr (III)	1570.7
Cobre ácido	Cu (II)	1944.7
Cobre alcalino	Cu (II)	8634.2
Níquel	Ni (II)	1635.3
Zinc	Zn (II)	7563.2

Se realizaron ensayos de adsorción con efluentes de los baños de cromo, cobre ácido y cobre alcalino en arcilla BCI/ 1/ 100/ 1 y baños de níquel y zinc en arcilla BPILC-AI/20/2, con una relación de peso de arcilla /volumen de efluente = 1g/50ml a un tiempo de contacto de 5 horas, diferentes concentraciones iniciales (0 - 400 mg/L) y a pH constante.

El baño de cromo fue tratado previamente con bisulfito de sodio para obtener Cr(III) (Anexo N° XII.5) y los baños de cobre alcalino y zinc fueron tratados con hipoclorito de sodio para la eliminación de cianuro (Anexo N° XII.5). Los resultados se encuentran en la Tabla N° VI.2.2. Los datos de las isotermas de adsorción para cada metal son representados en las Figuras N° VI.2.1 al VI.2.5

Tabla N° VI.2.2 Adsorción de metales sobre las arcillas modificadas

Arcilla	Efluente/metal	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Cromo Cr(III)	17.71	12.40	0.266	30.0
		34.95	24.20	0.538	30.8
		76.79	52.07	1.236	32.2
		97.05	68.85	1.410	29.1
		203.85	169.67	1.709	16.8
		313.00	263.50	2.475	15.8
BCI/1/100/1	Cobre Acido Cu(II)	126.00	51.30	3.735	59.3
		175.20	65.60	5.480	62.6
		209.70	103.40	5.315	50.7
		327.30	127.60	9.985	61.0
		407.50	154.90	12.630	62.0
		516.30	272.50	12.190	47.2
BCI/1/100/1	Cobre Alcalino Cu(II)	50.00	17.80	1.610	64.4
		75.00	35.60	1.970	52.5
		125.00	63.20	3.090	49.4
		200.00	126.70	3.665	36.7
		275.00	189.60	4.270	31.1
		325.00	250.60	3.720	22.9
BPILC-AI/20/2	Níquel Ni(II)	9.25	3.00	0.313	67.6
		18.50	8.02	0.524	56.6
		74.02	42.90	1.556	42.0
		111.03	72.99	1.902	34.3
		166.50	109.90	2.830	34.0
		277.00	192.53	4.224	30.5
BPILC-AI/20/2	Zinc Zn(II)	0.89	0.60	0.015	32.6
		2.37	1.61	0.038	32.0
		5.86	3.56	0.115	39.2
		16.75	12.56	0.210	25.0
		32.45	25.80	0.333	20.5
		86.40	66.56	0.992	23.0

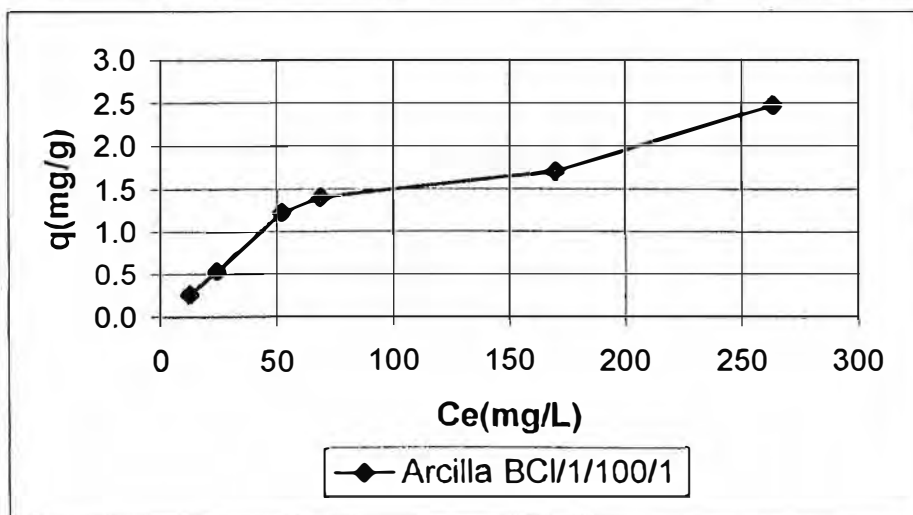


Figura N° VI.2.1 Adsorción del Cr(III) en la arcilla BCI/1/100/1

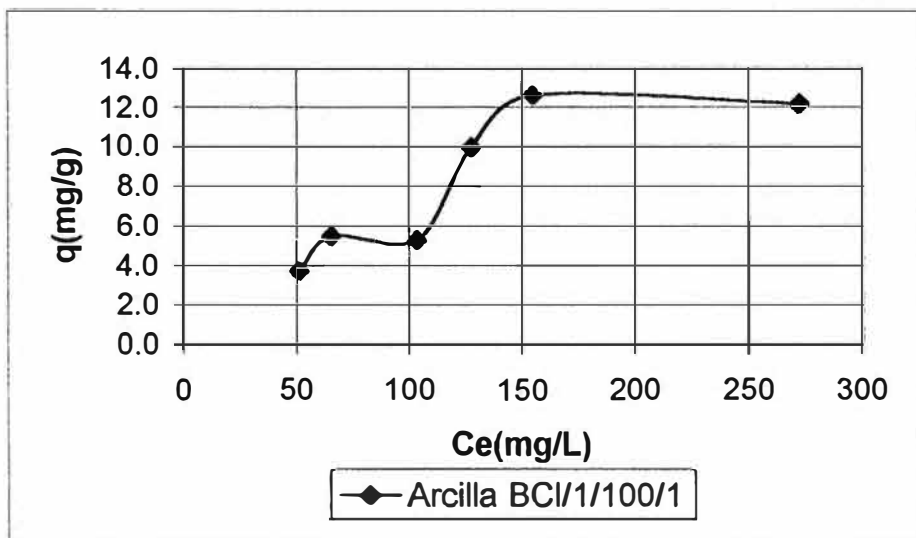


Figura N° VI.2.2 Adsorción del Cu(II) ácido en la arcilla BCI/1/100/1

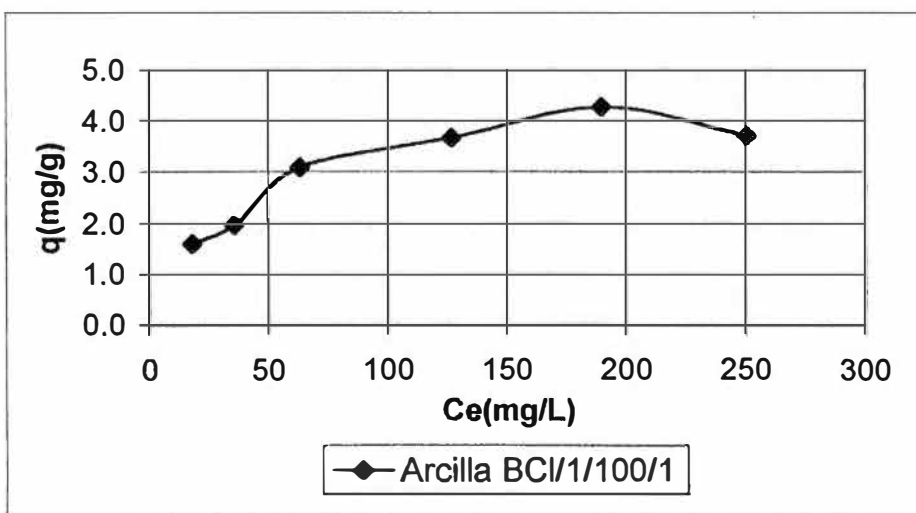


Figura N° VI.2.3 Adsorción del Cu(II) alcalino en la arcilla BCI/1/100/1

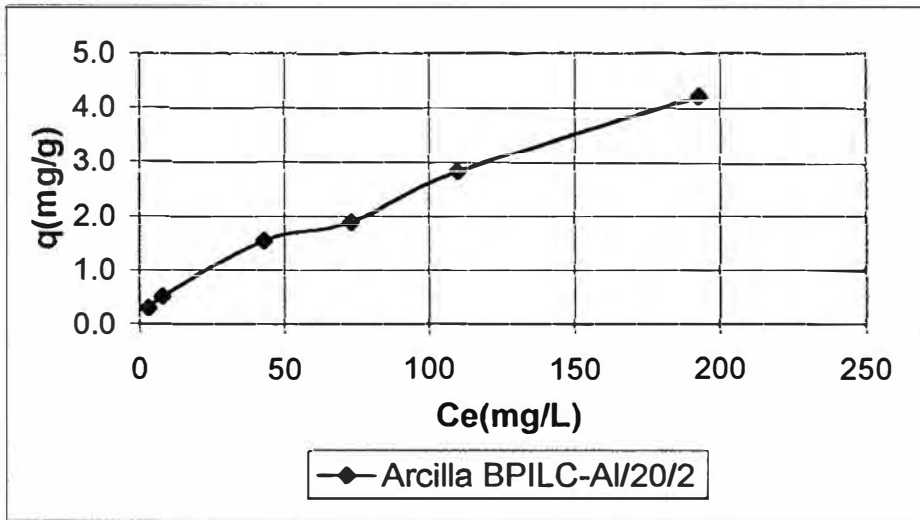


Figura N° VI.2.4 Adsorción del Ni(II) en la arcilla BPILC-AI/20/2

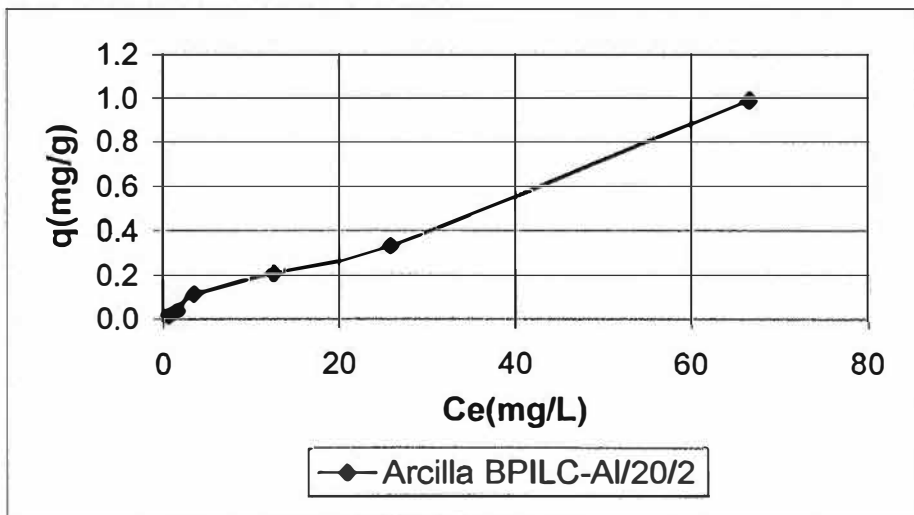


Figura N° VI.2.5 Adsorción del Zn(II) en la arcilla BPILC-AI/20/2



Para determinar el tiempo de adsorción óptimo se estudió la influencia de los tiempos de contacto arcilla – efluente (1g/50ml) en un rango de 3 - 24 horas, manteniendo constante el pH a diferentes concentraciones iniciales (0 - 400mg/L). Los resultados se muestran en la Tabla N° VI.2.3 y los datos son representados en las Figuras N° VI.2.6 al VI.2.10.

**Tabla N° VI.2.3 Tiempos de contacto en la adsorción de metales sobre las arcillas modificadas**

Arcilla	Efluente/metal	Tiempo(h)	Ci(ppm)	Ce(ppm)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Cromo Cr(III)	3	76.90	35.25	2.083	54.2
		7	76.90	27.64	2.463	64.1
		10	76.90	20.88	2.801	72.8
		23	76.90	21.97	2.747	71.4
BCI/1/100/1	Cobre Acido Cu(II)	3	327.30	250.67	3.832	23.4
		7	327.30	180.42	7.344	44.9
		10	327.30	210.70	5.830	35.6
		23	327.30	305.60	1.085	6.6
BCI/1/100/1	Cobre Alcalino Cu(II)	3	28.40	21.20	0.360	25.4
		7	28.40	19.70	0.435	30.6
		10	28.40	17.42	0.549	38.7
		23	28.40	17.70	0.535	37.7
BPILC-AI/20/2	Níquel Ni(II)	3	166.50	50.00	5.825	70.0
		7	166.50	45.30	6.060	72.8
		10	166.50	43.90	6.130	73.6
		23	166.50	46.10	6.020	72.3
BPILC-AI/20/2	Zinc Zn(II)	3	0.89	0.69	0.010	22.1
		7	0.89	0.53	0.018	40.4
		10	0.89	0.38	0.026	57.3
		23	0.89	0.55	0.017	38.2

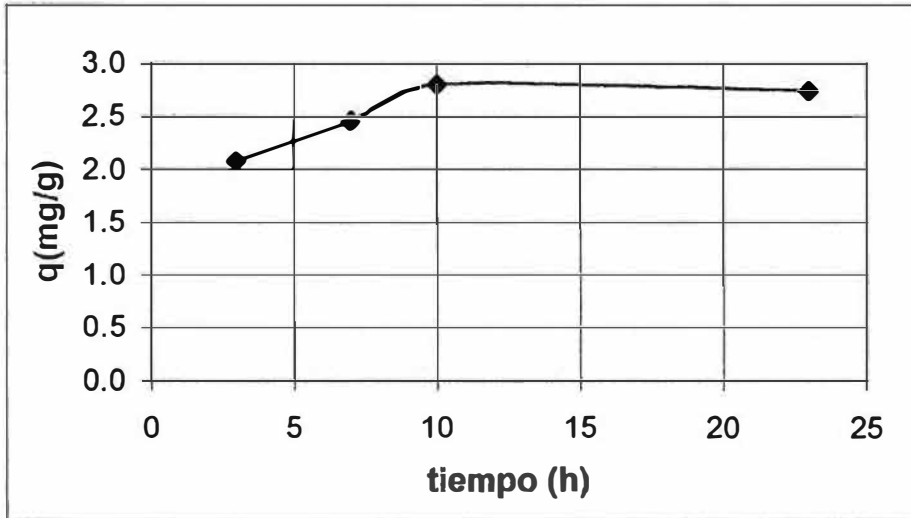


Figura N° VI.2.6 Adsorción del Cr(III) versus tiempo con arcilla BCI/1/100/1

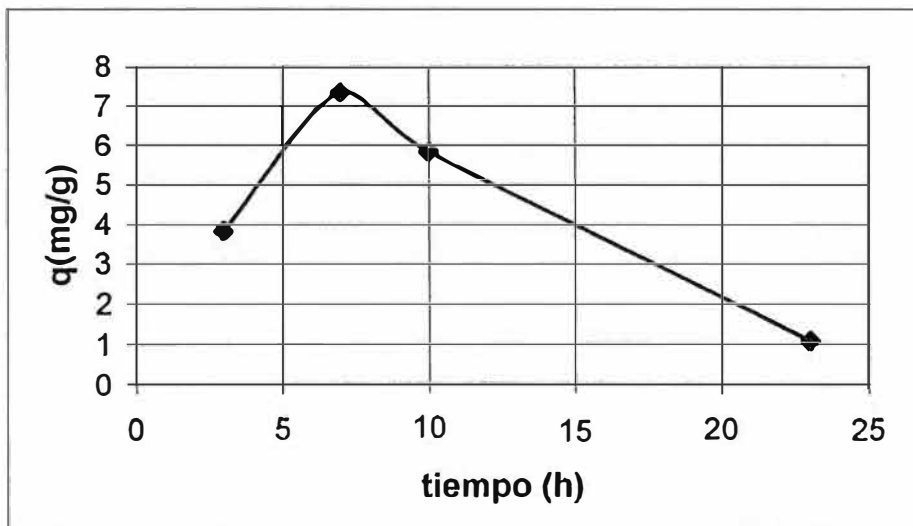


Figura N° VI.2.7 Adsorción del Cu(II) ácido versus tiempo con arcilla BCI/1/100/1

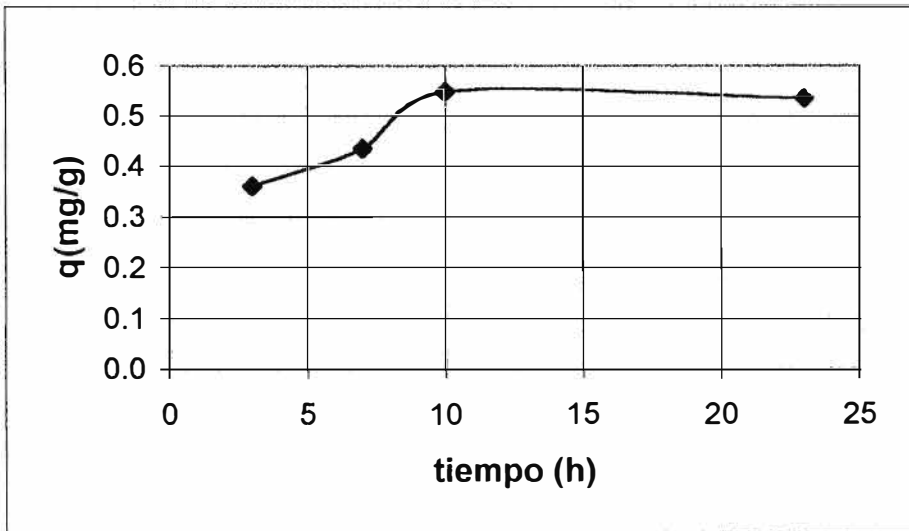


Figura N° VI.2.8 Adsorción del Cu(II) alcalino versus tiempo con arcilla BCI/1/100/1

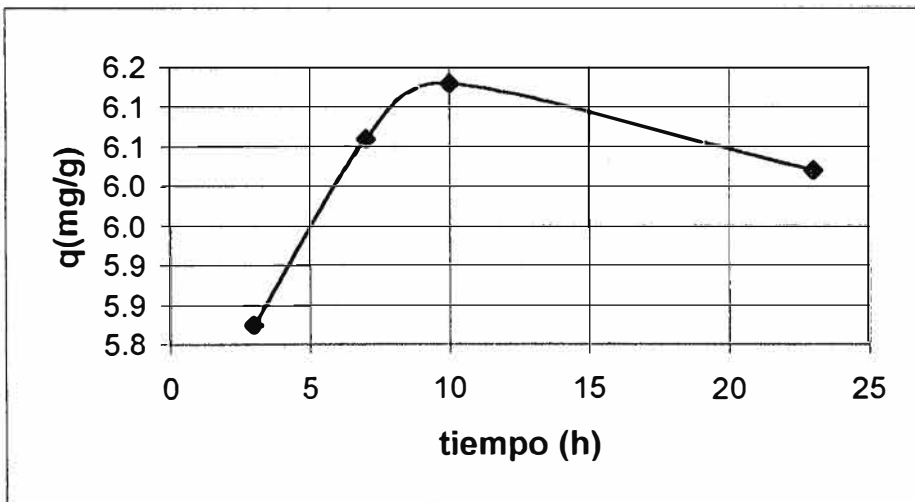
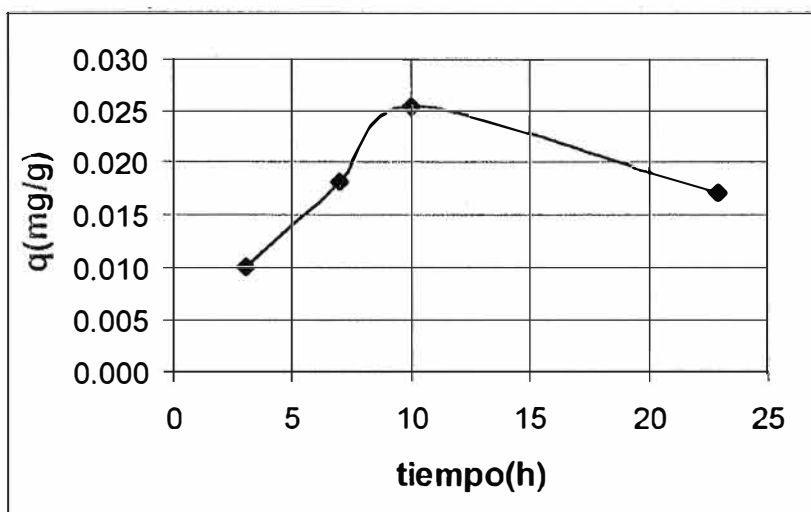


Figura N° VI.2.9 Adsorción del Ni(II) versus tiempo con arcilla BPILC-AI/20/2

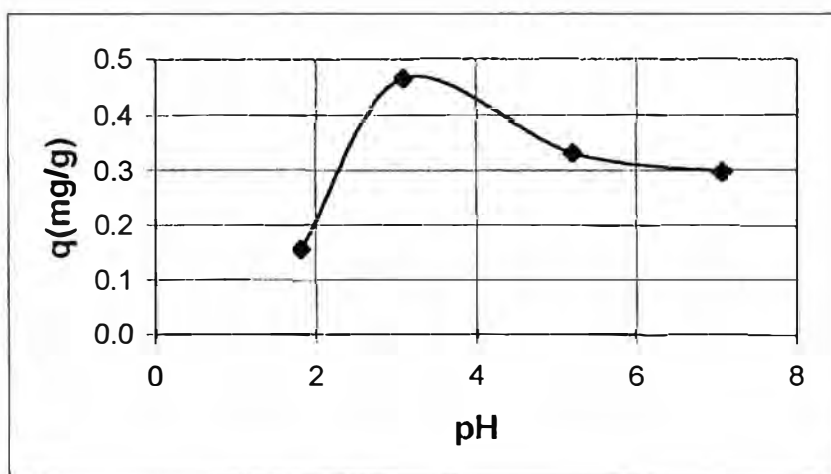


**Figura N° VI.2.10 Adsorción del Zn(II) versus tiempo con arcilla BPILC-AI/20/2**

También se realizó el estudio de la capacidad de adsorción de los metales a pH diferentes (1-7), utilizando una relación de peso arcilla/volumen de efluente = 1 g/50 mL a un tiempo de adsorción óptimo para cada metal (Tabla N° VI.2.3) y diferentes concentraciones iniciales (0 - 300 mg/L). En la Tabla N° VI.2.4 se muestran los valores obtenidos. Dichos datos son graficados en las Figuras N° VI.2.11 a VI.2.15

**Tabla N° VI.2.4 Capacidad de adsorción de los metales sobre las arcillas modificadas a pH diferentes**

Arcilla	Efluente/metal	t. opt(h)	pH	Ci(mg/L)	Ce(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
BCI/1/100/1	Cromo Cr(III)	12	1.82	15.6	12.44	0.158	20.3
			3.10	15.6	6.29	0.466	59.7
			5.21	15.6	8.96	0.332	42.6
			7.07	15.6	9.64	0.298	38.2
BCI/1/100/1	Cobre Acido Cu(II)	8	1.60	299.6	259.79	1.991	13.3
			3.05	299.6	192.96	5.332	35.6
			5.07	299.6	204.48	4.756	31.7
			6.80	299.6	214.37	4.262	28.4
BCI/1/100/1	Cobre Alcalino Cu(II)	10	1.90	28.4	19.70	0.435	30.6
			3.05	28.4	18.50	0.495	34.9
			5.01	28.4	20.20	0.410	28.9
			7.01	28.4	21.90	0.325	22.9
BPILC-AI/20/2	Níquel Ni(II)	10	1.83	59.0	50.02	0.449	15.2
			3.02	59.0	42.65	0.818	27.7
			5.02	59.0	26.29	1.636	55.4
			7.01	59.0	33.51	1.275	43.2
BPILC-AI/20/2	Zinc Zn(II)	12	1.60	48.0	42.70	0.265	11.0
			2.40	48.0	35.60	0.620	25.8
			4.80	48.0	29.70	0.915	38.1
			6.80	48.0	31.50	0.825	34.4



**Figura N° VI.2.11 Adsorción del Cr(III) a pH diferentes con arcilla BCI /1/100/1**

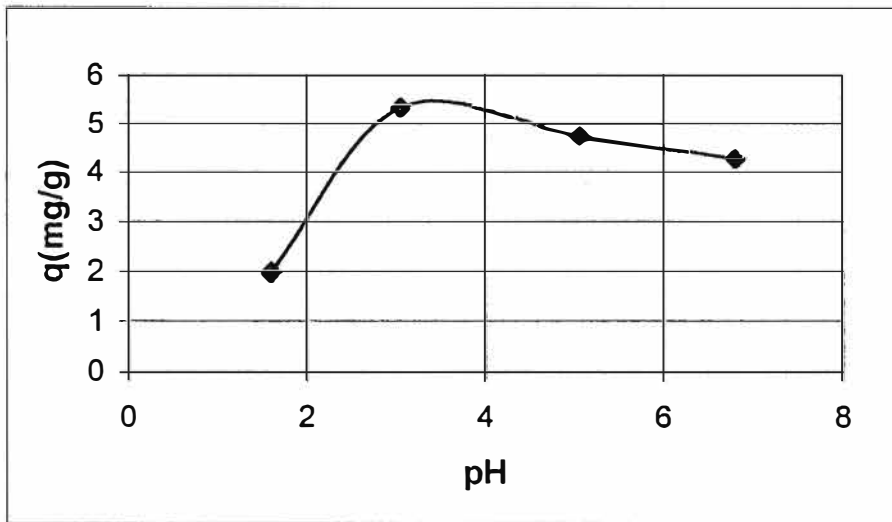


Figura N° VI.2.12 Adsorción del Cu(II) ácido a pH diferentes con arcilla BCI/1/100/1

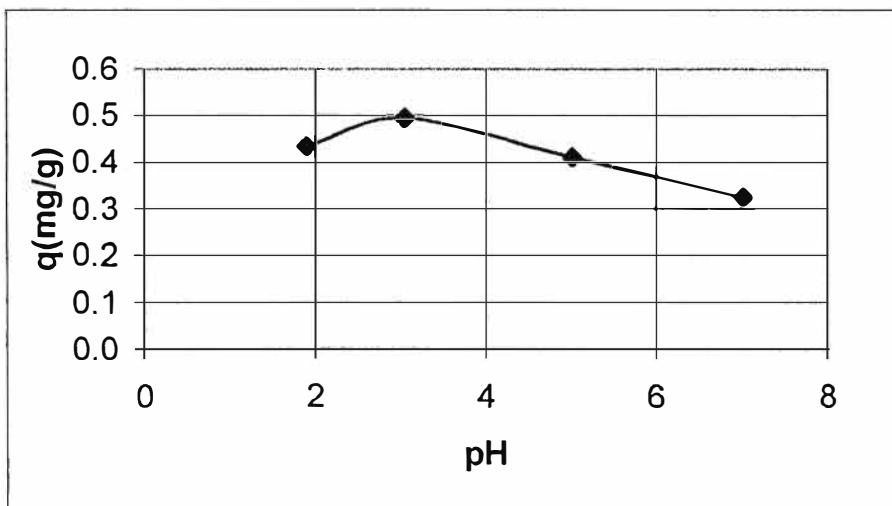


Figura N° VI.2.13 Adsorción del Cu(II) alcalino a pH diferentes con arcilla BCI/1/100/1

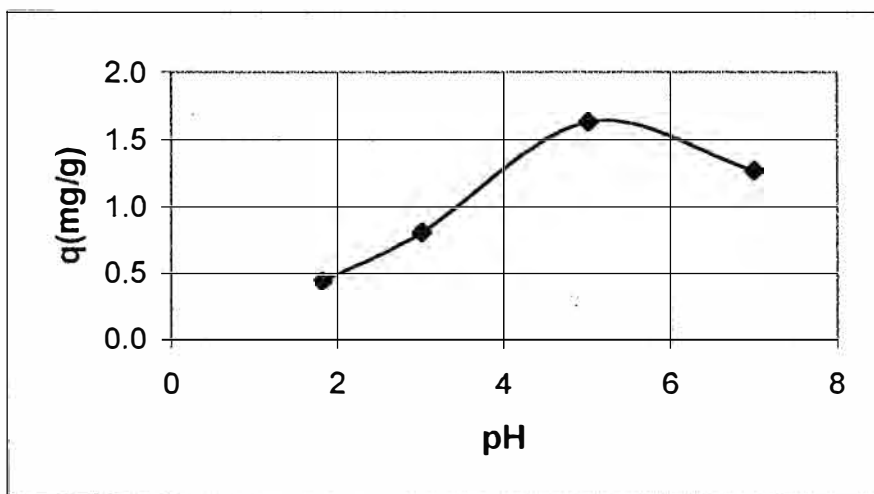


Figura N° VI.2.14 Adsorción del Ni(II) a pH diferentes con arcilla BPILC-AI/20/2

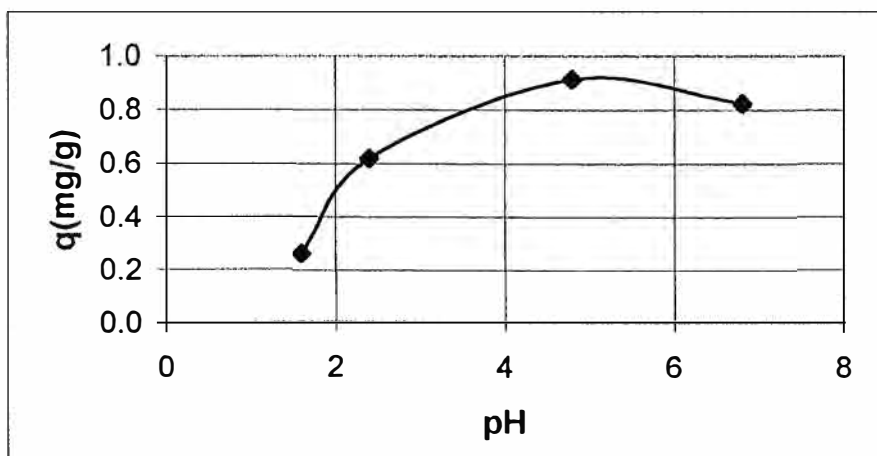


Figura N° VI.2.15 Adsorción del Zn(II) a pH diferentes con arcilla BPILC-AI/20/2

### VI.3 ENSAYOS CON MEZCLAS DE EFLUENTES

Las mezclas fueron preparadas con soluciones de la miniplanta instalada en el Lab. de Electroquímica FIQM - UNI. La composición de los baños utilizados se muestra en la Tabla N° VI.3.1

La relación de peso de arcilla / volumen de efluente ensayado fue 1g/50 ml a un tiempo de contacto óptimo de adsorción para cada metal sobre la arcilla BCI/ 1/ 100/ 1 o BPILC-AI/ 20/ 2 (Tabla N° VI.2.4) y a pH óptimos: Cromo y Cobre (3 - 3.5), Níquel y Zinc (4.5 - 5.5), (Figuras N° VI.2.11 a VI.2.15). El análisis de las concentraciones inicial y final de los efluentes se realizó mediante Espectroscopia Ultravioleta Visible (Subcapítulo N° IV.5). Los resultados se muestran a continuación:

**Tabla N° VI.3.1 Mezcla Cobre Acido - Cromo**

Volúmen de mezcla = 40 ml

Peso de arcilla BCI/1/100/1 = 0.8 g

Tiempo de contacto = 10 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Cu		226.8 (50%)	163.2	3.18	28.0
Cr	3.05	226.9 (50%)	200.9	1.3	11.4
Cu		598.3 (75%)	543.2	2.755	9.2
Cr	3.10	195.6 (25%)	167.1	1.425	14.5
Cu		79.2 (25%)	68.19	0.55	13.9
Cr	3.09	238.0 (75%)	216.4	1.08	9.0



**Tabla N° VI.3.2 Mezcla Cobre Acido - Niquel**

- a) Volúmen de mezcla = 40 ml  
 Peso de arcilla BPILC-AI /20/2 = 0.8 g  
 Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Cu	5	1347.7 (50%)	1318.0	1.465	2.2
Ni		1348 (50%)	1197.7	7.515	11.1
Cu	5.05	2127 (75%)	1961.0	8.300	7.8
Ni		708.9 (25%)	681.0	1.385	3.9
Cu	4.98	640.2 (25%)	624.0	0.810	2.5
Ni		1920 (75%)	1764.8	7.760	8.0

- b) Volúmen de mezcla = 30ml  
 Peso de arcilla BCI/1/100/1 = 0.6 g  
 Tiempo de contacto = 10 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Cu	3.1	1318 (52%)	1186.2	0.580	10.0
Ni		1197.7 (48%)	1095.6	5.105	8.5
Cu	3.15	1961 (74%)	1856.8	5.210	5.3
Ni		681 (26%)	650.0	1.550	4.5
Cu	3.05	624 (26%)	592.5	1.575	5.0
Ni		1764.8 (74%)	1695.6	3.460	3.9

**Tabla N° VI.3.3 Mezcla Niquel - Cromo**

- a) Volúmen de mezcla = 40 ml  
 Peso de arcilla BCI/1/100/1 = 0.8 g  
 Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Ni	3.00	222.6 (50%)	194.9	1.385	12.4
Cr		222.3 (50%)	181.0	2.065	18.5
Ni	3.15	564.2 (75%)	548.9	0.765	2.7
Cr		188.2 (25%)	177.1	0.555	5.8
Ni	3.05	78.4 (25%)	60.9	0.875	22.3
Cr		236.6 (75%)	218.5	0.908	7.6

- b) Volúmen de mezcla = 30 ml  
 Peso de arcilla BPILC-AI/20/2 = 0.6 g  
 Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Ni	5.05	194.9 (52%)	149.6	2.265	23.2
Cr		181 (48%)	164.3	0.835	9.2
Ni	4.95	548.9 (76%)	489.0	2.995	10.9
Cr		177.1 (24%)	155.1	1.100	12.4
Ni	5	60.9 (22%)	43.1	0.891	29.2
Cr		218.4 (78%)	178.6	1.993	18.2

**Tabla N° VI.3.4 Mezcla Cobre Acido - Zinc**

a) Volumen de mezcla = 40 ml

Peso de arcilla BCI/1/100/1 = 0.8 g

Tiempo de contacto = 10 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Zn		226.9 (50%)	208.0	0.943	8.3
Cu	3	227.9 (50%)	195.6	1.618	14.1
Zn		74.2 (25%)	62.3	0.595	16.0
Cu	3	227.9 (75%)	193.2	1.738	15.2
Zn		226.7 (75%)	210.6	0.813	7.0
Cu	3	75.9 (25%)	59.5	0.824	21.6

b) Volumen de mezcla = 30 ml

Peso de arcilla BPILC-AI/20/2 = 0.6 g

Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Ci(mg/L)	Cf(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
Zn		208 (52%)	169.5	1.925	18.5
Cu	5	195.6 (48%)	179.0	0.830	8.4
Zn		62.3 (24%)	42.8	0.975	31.3
Cu	5	193.2 (76%)	180.6	0.630	6.5
Zn		210.6 (78%)	182.3	1.415	13.4
Cu	5	59.5 (22%)	45.6	0.695	23.3

**Tabla N° VI.3.5 Mezcla Cobre ácido - Níquel - Cromo**

- a) Volumen de mezcla = 40 ml  
 Peso de arcilla BCI/1/100/1 = 0.8 g  
 Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Cu	3	112.2 (21%)	105.6	0.333	5.8
Ni		189.2 (36%)	178.1	0.550	5.8
Cr		224.3 (43%)	151.5	3.640	32.4
Cu	3.02	388.9 (50%)	376.1	0.540	3.2
Ni		196.2 (25%)	185.5	0.535	5.4
Cr		193.1 (25%)	154.0	1.955	20.2
Cu	2.98	186.9 (25%)	178.1	0.380	4.7
Ni		361.8 (49%)	355.5	0.315	1.7
Cr		193.1 (26%)	145.8	2.360	24.4

- b) Volumen de mezcla = 30 ml  
 Peso de arcilla BPILC-AI/20/2 = 0.6 g  
 Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Cu	4.9	105.6 (24%)	98.4	0.360	6.8
Ni		178.1 (41%)	163.3	0.740	8.3
Cr		151.5 (35%)	147.3	0.210	2.7
Cu	5.05	376.1 (53%)	370.4	0.385	1.5
Ni		185.5 (26%)	162.3	1.160	12.5
Cr		154 (21%)	145.2	0.440	5.7
Cu	4.95	178.1 (26%)	168.2	0.545	5.5
Ni		355.5 (52%)	345.2	0.515	2.8
Cr		145.8 (22%)	140.3	0.280	3.7

**Tabla N° VI.3.6 Mezcla Zinc - Cobre ácido - Cromo**

a) Volumen de mezcla = 40 ml

Peso de arcilla = 0.8 g

Tiempo de contacto = 10 h

Mezcla	pH	Arcilla	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Zn	5	BPILC-AI/20/2	397.5 (58%)	343.7	2.690	13.5
Cu			160.7 (23%)	140.3	1.010	12.6
Cr			126.6 (19%)	114.8	0.590	9.3
Zn	3	BCI/1/100/1	132.5 (18%)	121.5	0.550	8.3
Cu			492.1 (66%)	435.6	2.320	11.4
Cr			126.6 (16%)	90.0	1.930	28.9
Zn	3	BCI/1/100/1	132.5 (20%)	128.6	0.193	2.9
Cu			160.7 (24%)	132.0	1.430	17.8
Cr			379.9 (56%)	314.4	3.270	17.2

b) Volumen de mezcla = 30 ml

Peso de arcilla = 0.6 g

Tiempo de contacto = 10 h

Mezcla	pH	Arcilla	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Zn	3	BCI/1/100/1	343.7 (57%)	320.4	1.16	6.7
Cu			140.3 (23%)	105.7	1.73	24.6
Cr			114.8 (20%)	97.2	0.97	15.3
Zn	5	BPILC-AI/20/2	121.5 (19%)	97.9	1.17	19.4
Cu			435.6 (67%)	420.5	0.75	3.4
Cr			90 (14%)	75.8	0.71	15.7
Zn	5	BPILC-AI/20/2	128.6 (22%)	109.3	1.01	15.0
Cu			132.0 (23%)	112.6	0.97	14.7
Cr			314.4 (55%)	293.4	1.05	6.6

**Tabla N° VI.3.7 Mezcla Zinc - Cobre ácido - Níquel**

a) Volumen de mezcla = 40 ml

Peso de arcilla = 0.8 g

Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Arcilla	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Zn	3	BCI/1/100/1	132.5 (18%)	96.4	1.907	27.2
Cu			492.1 (66%)	459.0	1.203	6.7
Ni			123.7 (16%)	109.0	0.735	11.8
Zn	5	BPILC-AI/20/2	397.5 (58%)	325.4	3.603	18.1
Cu			160.7 (24%)	149.0	0.634	7.2
Ni			123.7 (18%)	99.7	1.250	19.3
Zn	5	BPILC-AI/20/2	132.5 (17%)	76.0	2.934	42.6
Cu			160.7 (20%)	147.0	0.694	8.5
Ni			494.8 (63%)	450.0	2.239	9.0

b) Volumen de mezcla = 30 ml

Peso de arcilla = 0.6 g

Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Arcilla	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Zn	5	BPILC-AI/20/2	96.4 (15%)	56.0	2.019	41.8
Cu			459 (69%)	435.0	1.150	5.2
Ni			109 (16%)	59.0	2.550	45.8
Zn	3	BCI/1/100/1	325.4 (57%)	299.0	1.972	8.1
Cu			149 (26%)	126.0	1.100	15.4
Ni			99.7 (17%)	90.3	0.420	9.4
Zn	3	BCI/1/100/1	76.0 (11%)	71.9	0.206	5.4
Cu			147 (22%)	129.0	0.950	12.2
Ni			450 (67%)	422.3	1.390	6.1

**Tabla N° VI.3.8 Mezcla Zinc - Cobre ácido - Níquel - Cromo**

a) Volumen de mezcla = 40 ml

Peso de arcilla = 0.8 g

Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Arcilla	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Zn	5	BPILC-AI/20/2	530.0 (56%)	471.0	2.95	11.1
Cu			160.7 (17%)	149.6	0.55	6.9
Ni			123.7 (13%)	101.4	1.11	18.0
Cr			126.6 (14%)	114.6	0.60	9.4
Zn	3	BCI/1/100/1	132.5 (15%)	124.5	0.40	6.0
Cu			492.1 (56%)	434.8	2.36	11.6
Ni			123.7 (14%)	106.3	0.96	14.0
Cr			132.9 (15%)	110.1	1.14	17.2
Zn	5	BPILC-AI/20/2	132.5 (13%)	95.7	1.84	27.7
Cu			160.7 (15%)	157.4	0.16	2.0
Ni			618.3 (60%)	597.0	1.06	3.4
Cr			126.6 (12%)	118.7	0.39	6.2
Zn	3	BCI/1/100/1	132.5 (16%)	126.9	0.28	4.2
Cu			164.7 (20%)	148.5	0.83	9.8
Ni			129.9 (16%)	115.4	0.71	11.1
Cr			379.9 (48%)	356.0	1.19	6.3

b) Volumen de mezcla = 30 ml

Peso de arcilla = 0.6 g

Tiempo de contacto = 12 h

Mezcla	pH	Arcilla	Ci(ppm)	Cf(ppm)	q(mg/g)	%Ads
Zn	3	BCI/1/100/1	470.9 (56%)	453.1	0.89	3.7
Cu			149.6 (18%)	117.4	1.60	21.4
Ni			101.4 (12%)	74.9	1.32	26.1
Cr			114.6 (14%)	95.0	1.48	17.1
Zn	5	BPILC-AI/20/2	124.5 (16%)	92.2	2.11	25.8
Cu			434.8 (56%)	425.2	0.48	2.2
Ni			106.3 (14%)	54.1	2.60	49.0
Cr			110.1 (14%)	100.6	0.47	8.6
Zn	3	BCI/1/100/1	95.7 (10%)	74.8	1.04	21.8
Cu			157.4 (16%)	148.3	0.45	5.7
Ni			596.9 (62%)	577.7	0.96	3.2
Cr			118.7 (12%)	90.1	1.42	24.0
Zn	5	BPILC-AI/20/2	126.9 (17%)	92.5	2.22	27.1
Cu			148.5 (20%)	139.6	0.44	5.9
Ni			115.4 (15%)	91.4	1.20	20.8
Cr			355.9 (48%)	347.5	0.42	2.3

## **VI.4 CARACTERIZACIÓN DE LA ARCILLA DESPUÉS DEL CONTACTO CON EL EFLUENTE**

Las muestras de arcilla puestas en contacto con los efluentes de cromo y zinc (Tabla N° VI.1.1), fueron analizadas mediante activación neutrónica (Subcapítulo N° IV.1). Los resultados se muestran en las Tablas N° VI.4.1 y VI.4.2.

Las áreas superficiales de las arcillas se determinaron mediante la técnica de adsorción – desorción de N<sub>2</sub> (Subcapítulo N° IV.2) utilizando la Ecuación de BET (Subcapítulo N° XII.2). Los resultados se muestran en las Tablas N° VI.4.3 y VI.4.4. También se realizó el análisis de las arcillas BCI/ 1/ 100/ 1 con cobre ácido y BPILC - Al / 20/ 2 con níquel y zinc, utilizando la técnica de Difracción de rayos X (DRX) (Subcapítulo N° IV.3). Los difractogramas se muestran en las Figuras N° VI.4.1 y VI.4.2.

**Tabla N° VI.4.1 Característica de las arcillas después del contacto con el efluente de cromo**

Elemento	Unidad	B	BCI/1/100/1	BCI/1/100/1-Cr	BPILC-AL/20/2	BPILC-AL/20/2-Cr
Al	%	7.30	6.99	7.27	9.97	9.890
Br	ppm	4.90	3.3	3.75	1.10	0.950
Ca	%	0.42	0.27	0.45	2.06	1.970
Ce	ppm	75.40	30.56	37.70	98.17	102.100
Cu	ppm	<100	-	-	-	-
Cr	ppm	21.90	10.33	63.35	5.90	18.700
Dy	ppm	5.80	3.03	3.16	5.26	5.040
Sc	ppm	13.75	11.2	11.15	6.75	7.050
Fe	%	2.76	2.01	0.98	1.64	0.685
Yb	ppm	3.40	3.3	3.20	3.17	0.385
La	ppm	29.40	12.06	12.30	44.63	46.100
Mg	%	1.53	0.92	0.98	2.01	1.960
Mn	ppm	110	39.67	34.60	105.33	103.000
Sm	ppm	7.20	2.93	3.00	7.40	7.380
Na	%	1.92	0.35	0.36	0.05	0.080
Ti	ppm	0.12	0.16	0.16	0.12	0.130
V	ppm	18.50	20.67	22.50	17.00	15.000
Zn	ppm	121.10	57.00	-	98.67	-



**Tabla N° VI.4.2 Característica de las arcillas después del contacto con el efluente de zinc**

Elemento	Unidad	B	BCI/1/100/1	BCI/1/100/1-Zn	BPILC-AL/20/2	BPILC-AL/20/2-Zn
Al	%	7.30	6.99	7.09	9.97	8.38
Br	ppm	4.90	3.3	3.70	1.10	<5
Ca	%	0.42	0.27	0.32	2.06	<0.2
Ce	ppm	75.40	30.56	31.20	98.17	60.40
Cu	ppm	<100	-	-	-	-
Cr	ppm	21.90	10.33	15.80	5.90	13.30
Dy	ppm	5.80	3.03	3.20	5.26	4.90
Sc	ppm	13.75	11.2	11.50	6.75	10.90
Fe	%	2.76	2.01	2.10	1.64	2.14
Yb	ppm	3.40	3.3	3.10	3.17	2.80
La	ppm	29.40	12.06	12.90	44.63	26.50
Mg	%	1.53	0.92	0.96	2.01	1.03
Mn	ppm	110	39.67	41.00	105.33	57.00
Sm	ppm	7.20	2.93	3.10	7.40	6.40
Na	%	1.92	0.35	0.62	0.05	0.26
Ti	ppm	0.12	0.16	0.17	0.12	0.11
V	ppm	18.50	20.67	20.20	17.00	18.20
Zn	ppm	121.10	57.00	338.70	98.67	890.00

**Tabla N° VI.4.3 Area Superficial de la arcilla BCI/1/100/1 antes y después del contacto con el efluente**

Arcilla	Efluente	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)
BCI/1/100/1	-----	128.4
	Cromo	55.4
	Cobre Acido	127.8
	Cobre Alcalino	124.4
	Níquel	117.6
	Cobre 15 - Níquel 30 - Cromo 5	127.7

**Tabla N° VI.4.4 Area Superficial de la arcilla BPILC-AI/20/2 antes y después del contacto con el efluente**

Arcilla	Efluente	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)
BPILC-AI/20/2	-----	181.7
	Cromo	179.7
	Cobre Acido	170.1
	Níquel	98.6
	Zinc	181.1
	Cobre 15 - Níquel 30 - Cromo 5	121.2

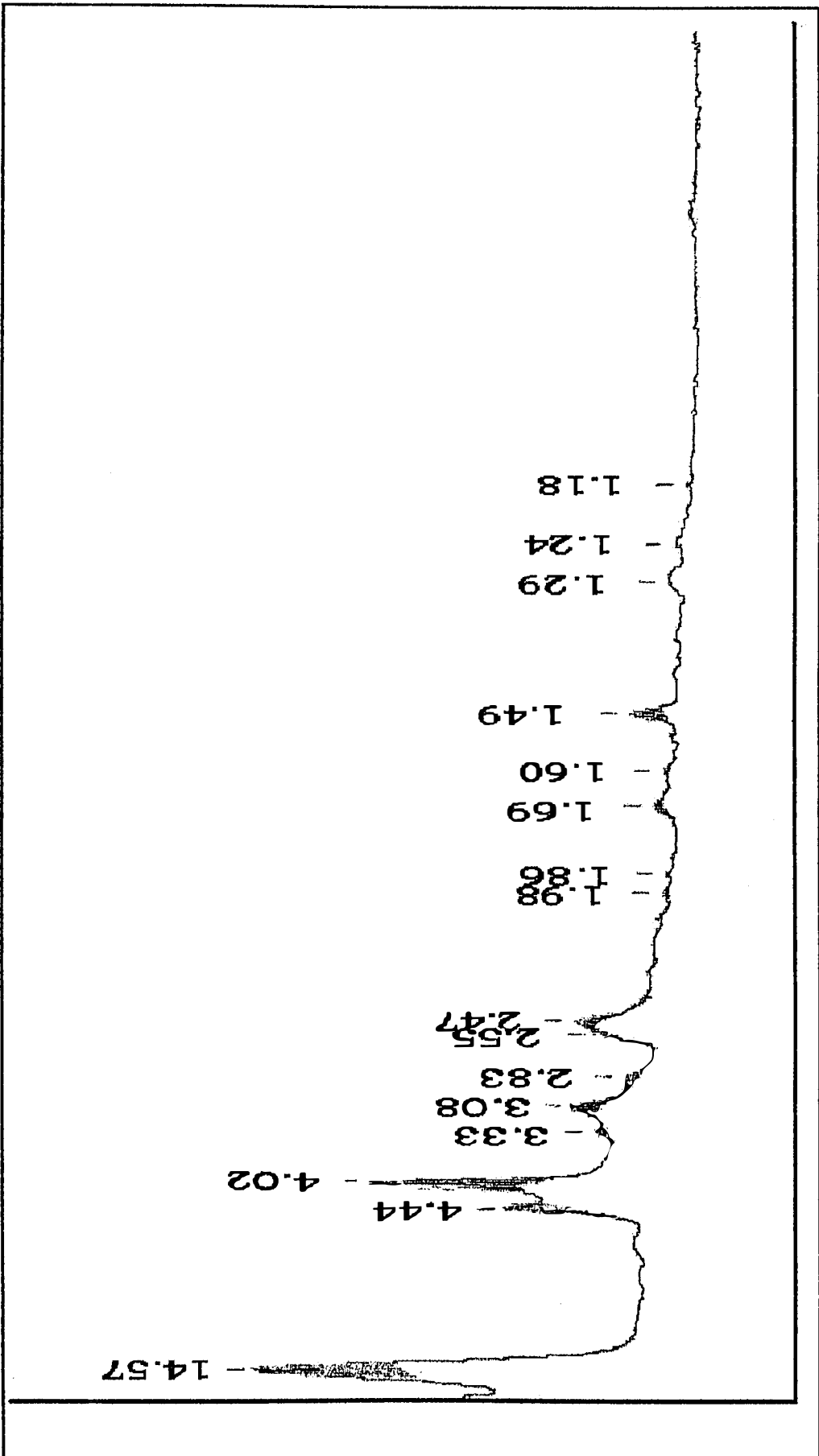


Figura N° VI.4.1 Difractograma de la muestra BCI / 1 / 100 / 1- Cobres Ácido

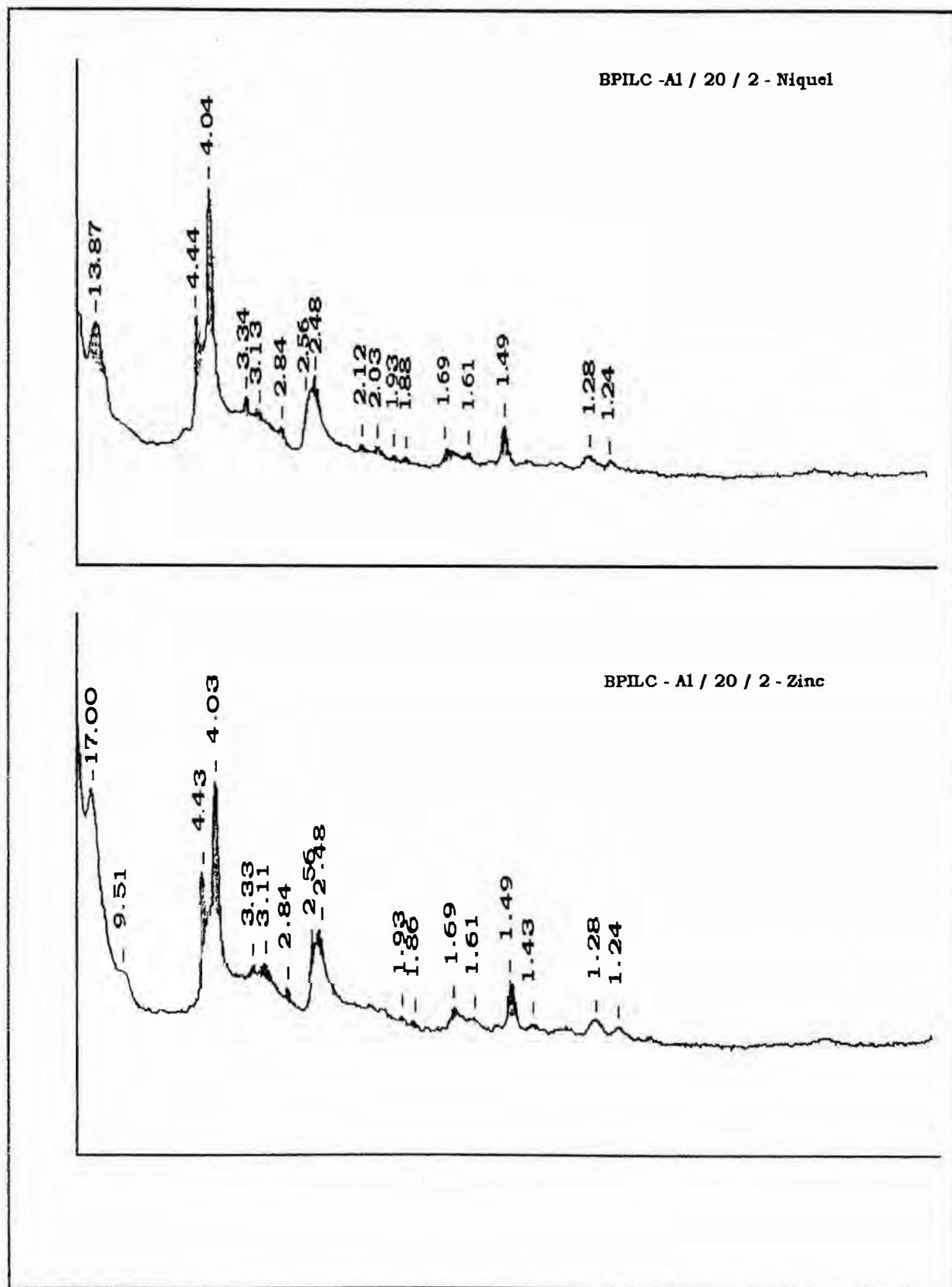


Figura N° VI.4.2 Difractogramas de Rayos X de las muestras BPILC - Al / 20 / 2 después del contacto con efluentes de Niquel y Zinc.

## **VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS**

## VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### VII.1 PREFERENCIA DEL IÓN METÁLICO POR UN TIPO DE ARCILLA MODIFICADA

Los resultados muestran una mayor adsorción de Cr (III) y Cu (II) para la arcilla BCI/1/100/1 (Figuras N° VI.1.1, VI.1.2 y VI.1.3), en tanto que en la arcilla BPILC-AI/20 /2 preferentemente se adsorbe Ni(II) y Zn(II) (Figuras N° VI.1.4 y VI.1.5).

Para analizar el comportamiento que tienen los metales en solución acuosa en cuanto a acidez y conformación geométrica, se toman en cuenta algunas definiciones. Según Brönsted – Lowry las bases son receptoras de protones y los ácidos donadores de protones; según Lewis, base es un donador de un par electrónico y ácido es un receptor de un par electrónico, considerando como ácidos de Lewis a) los cationes, b) los compuestos deficientes de electrones y c) las moléculas en las cuales el átomo central posee uno o más enlaces múltiples. A estos conceptos se

suman el de Chatt y Pearson , sobre interacción ácido-base: a) los ácidos duros prefieren enlazarse con bases duras y ácidos blandos con bases blandas, b) ácidos y bases blandas se caracterizan por una alta polarizabilidad, c) las moléculas blandas sufren más fácilmente reordenamiento unimolecular que las moléculas duras. La clasificación de los ácidos y bases según Lewis (Manku, 1988) se muestra a continuación:

**Tabla N° VII.1.1 Clasificación de los ácidos y bases según Lewis**

Ácidos Lewis		
Duros	Intermedios	Blandos
$\text{Co}^{+3}$ , $\text{Cr}^{+3}$ , $\text{Fe}^{+3}$	$\text{V}^{+2}$ , $\text{Cu}^{+2}$ , $\text{Co}^{+2}$ , $\text{Ni}^{+2}$ , $\text{Mn}^{+2}$ , $\text{Zn}^{+2}$	$\text{Cu}^{+}$
Bases Lewis		
Duros	Intermedios	Blandos
$\text{H}_2\text{O}$ , $\text{OH}^{-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^{-}$ , $\text{Br}^{-}$ , $\text{SO}_3^{2-}$	$\text{CN}^{-}$ , $\text{O}^{-}$

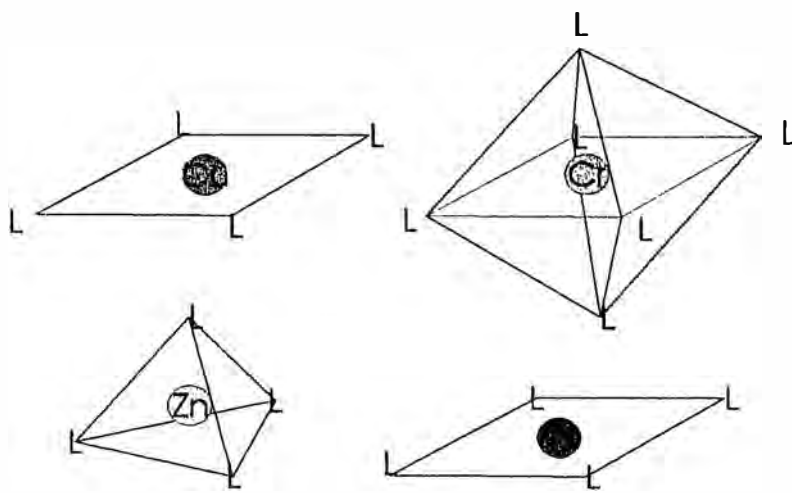
De la Tabla N° VII.1.1 se observa que en solución, los metales poseen diversos grados de acidez, siendo decreciente en el siguiente orden:  $\text{Cr(III)} > \text{Cu (II)} > \text{Ni (II)} > \text{Zn (II)}$  (Manku, 1988).

El cromo como ácido Lewis duro se enlaza con una base dura como la molécula de agua formando un complejo hidratado más estable que el resto de los complejos hidratados de cobre, níquel y zinc.

Para el cromo (Figura N° VI.1.1) se observa que a bajas concentraciones aparentemente se produce una difusión del metal dentro de la arcilla BPILC-AI/20 /2, superado éste se presenta un ascenso en la

curva de adsorción, tal comportamiento no se produce cuando se utiliza la arcilla BCI/1/100/1.

Por otro lado la conformación geométrica que tienen los metales en solución acuosa también es variable, en el caso del cromo se forma un complejo hidratado octaédrico, para el cobre se forma un complejo hidratado del tipo cuadrado planar; para el níquel es plano cuadrado y para el zinc el complejo es de forma tetraédrica (Basolo, 1980).



L : LIGANTE

### Figura N° VII.1.1 Conformación Geométrica de los iones metálicos

Estas diferentes conformaciones en los complejos hidratados ocasionarían diversas resistencias estéricas que estarían afectando la difusión del catión dentro de la arcilla modificada (Figuras N° VI.2.1 al VI.2.5).

Para el caso del cromo de acuerdo a la Figura N° VI.2.1 la difusión es bastante rápida a bajas concentraciones de la solución ( $C_e$  (mg/L)) haciéndose más lenta a partir de los 70 ppm. En el caso del cobre (Figura



N° VI.2.2 y VI.2.3) la difusión parece ser afectada por el pH del medio, siendo más favorecida a pH alcalino. En ambos casos parece ser que el cobre llega a saturarse hasta un valor máximo y luego queda retenido entre los poros, cubriéndolo poco a poco a medida que la concentración de la solución de cobre se incrementa por encima de 150 ppm, a ello podría deberse la disminución de la capacidad de adsorción observada. Por otro lado en los casos del níquel y zinc (Figura VI.2.4 y VI.2.5), aparentemente la difusión del níquel es ligeramente mayor que la del zinc, ello podría deberse a la diferente conformación geométrica de sus complejos. Sin embargo a pesar de que la geometría molecular de sus complejos es mayor o igual que la del cobre, el mayor espaciado que presenta la arcilla apilarada ( $d_{001} = 17.34 \text{ \AA}$ ) comparada con la arcilla termoactivada ( $d_{001} = 15.04 \text{ \AA}$ ) permitiría una mayor difusión de los complejos de níquel y zinc sobre este adsorbente.

En la Figura N° VI.1.3 para el cobre alcalino, el comportamiento es bastante similar con ambas arcillas modificadas, siendo mayor la adsorción con la arcilla ácida que con la apilarada, esta diferencia puede ser debido a la mayor acidez que tiene la arcilla apilarada (Sun Kou, 1994) lo que ocasionaría fuerzas de repulsión electrostática, en competencia con aquellas que favorecen la adsorción del cobre dentro de la arcilla.

En el caso del níquel y zinc (Figura N° VI.1.4 y VI.1.5) las estructuras y mediana acidez de los complejos metálicos formados aparentemente no

afectan la adsorción del metal en la arcilla apilarada produciéndose una mayor adsorción comparada con la arcilla termoactivada.

## VII.2 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE ADSORCIÓN

### VII.2.1 TIEMPO DE MAYOR ADSORCIÓN

Los resultados en que se da la máxima remoción en solución con la arcilla de mayor preferencia para cada metal se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla N° VII.2.1.1 Tiempo óptimo de adsorción de los metales con las arcillas modificadas.**

Efluente	Arcilla	Tiempo (h)
Cromo	BCI/1/100/1	12
Cobre ácido	BCI/1/100/1	8
Cobre alcalino	BCI/1/100/1	10
Níquel	BPILC-AI/20/2	10
Zinc	BPILC-AI/20/2	12

El cobre ácido (Figura N° VI.2.7) y zinc (Figura N° VI.2.10) no siguen la tendencia general, se observa una capacidad de remoción máxima a un tiempo determinado, luego del cual decrece, dando a entender que se estaría produciendo una saturación de los centros de adsorción y posiblemente una retención con el tiempo de los complejos de éstos metales sobre los poros haciendo que su capacidad de adsorción ( $q$ ) disminuya con el tiempo.

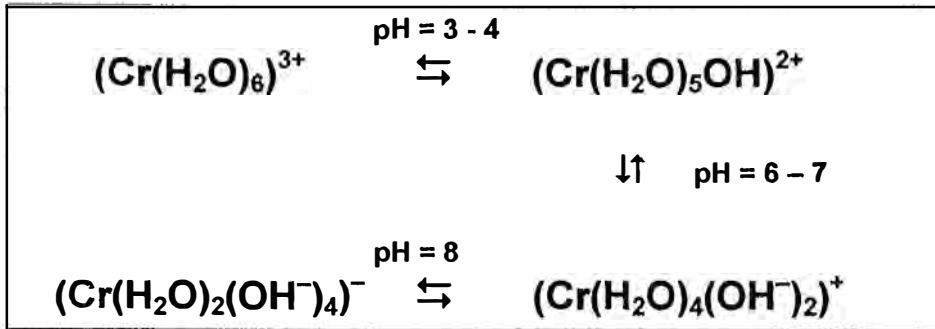
## VII.2.2 INFLUENCIA DEL pH EN EL PROCESO DE ADSORCIÓN

Se realizaron pruebas a diferentes pH en un rango de 1 – 7, ya que a valores mayores los complejos metálicos en suspensión precipitan, lo que ocasionaría una condición no favorable para la remoción. Los resultados se resumen en la Tabla N° VII.2.2.1

**Tabla N° VII.2.2.1 Valores de pH donde se encuentra la máxima adsorción**

Efluente	Arcilla	Tiempo(h)	pH
Cromo	BCI/1/100/1	12	3.2
Cobre ácido	BCI/1/100/1	8	3.5
Cobre Alcalino	BCI/1/100/1	10	3.3
Níquel	BPILC-AI/20/2	10	5.2
Zinc	BPILC-AI/20/2	12	5.2

Existe una influencia del pH en las especies iónicas que puede formar el metal en solución acuosa, así lo establece Aggarwal et. al (Aggarwal, 1999) en su estado de adsorción del cromo sobre carbón activado en soluciones acuosas. Ellos establecen que un cambio de pH en la solución produce un cambio en los grupos ácidos carbón- oxígeno en la superficie que podría cambiar la extensión de la carga positiva del ión cromo, tal como se muestra en la Figura N° VII.2.2.1



**Figura N° VII.2.2.1 Diferentes configuraciones del Cr(III) con el pH.**

Considerando que a pH de 3.2 se logra la máxima adsorción de cromo, se puede establecer que el cromo es adsorbido por la arcilla modificada cuando esta completamente hidratado, es decir con su máxima valencia, formando un compuesto estable (Tabla N° VII.1.1)

Para el caso del cobre el pH óptimo aproximado fue 3,5 dado que a pH más altos no se observó un incremento en la capacidad de adsorción (Figuras N° VI.2.12 y VI.2.13). Los procesos de hidrólisis con diferentes sales de cobre (nitrato, acetato, acetilacetato de cobre) mostraron que el cobre, independientemente del anión inicial, tendía a formar compuestos hidratados estables de la forma  $[\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+2}$  a un pH de 3 aproximadamente (Sun Kou, 1994). A pH mayores se pueden formar hidroxidaciones de mayor tamaño muy inestables, que pueden producir la precipitación del  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  que es el que posiblemente se retiene en los poros y hace que disminuya su capacidad de adsorción.

Para el níquel y zinc en contacto con la arcilla apilarada (Tabla N° VII.2.2.1), los complejos formados no son muy estables con el agua en medio ácido, un medio menos ácido a neutro mantendría la mayor parte de los complejos con los ligantes  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{=}$  (Tabla N° VII.1.1). El níquel

formaría el complejo  $(\text{NiCl}_4)^{2-}$  que por su carácter básico estaría interactuando con los centros ácidos de la arcilla, mientras que el zinc formaría complejos con el  $\text{OH}^-$  y  $\text{Cl}^-$  dando a la molécula una tendencia neutra. Esto explicaría la mayor adsorción del níquel con respecto al zinc en la arcilla apilarada (Figuras N° VI.2.14 y VI.2.15)

En la Tabla N° VII.2.2.1 se observa que la adsorción del cromo y cobre sobre la arcilla BCI/1/100/1 se realiza en un rango de  $\text{pH} = 3 - 3,5$ . Para analizar que valores de  $\text{pH}$  afectaban la adsorción del níquel y zinc sobre la arcilla termoactivada, se realizaron ensayos a escala batch con dichos efluentes en una relación de peso de arcilla / volumen de efluente = 1 g/50 ml a los tiempos óptimos de máxima adsorción y  $\text{pH} = 1,8 - 7$ . Los resultados se muestran a continuación:

**Tabla N° VII.2.2.2 Capacidad de adsorción del níquel y zinc sobre la arcilla BCI/1/100/1 a pH diferentes**

Efluente/Metal	t opt.(h)	pH	Ci(mg/L)	Ce(mg/L)	q(mg/g)	%Ads
NIQUEL	10	1.8	52	35.1	0.423	32.5
		3	52	27.8	0.605	46.5
		5	52	30.1	0.548	42.1
		7	52	46.2	0.145	11.1
ZINC	12	1.9	64	54.6	0.235	14.7
		3.01	64	48.8	0.380	23.8
		4.98	64	49.8	0.355	22.2
		7.01	64	61.3	0.068	4.2

La arcilla ácida presentó una máxima adsorción en el rango de  $\text{pH} = 3 - 4$  para los efluentes de níquel y zinc. Resumiendo se encontró que en todos los casos estudiados, el  $\text{pH}$  es la variable que más afecta en la retención de los metales estudiados por la arcilla modificada.

### VII.3 MEZCLAS

Para la discusión de resultados se tiene en cuenta la variable “q” que representa la cantidad de metal adsorbido por gramo de arcilla modificada en mg/g (Ecuación N° VI.1.1) y los cambios que se dan en la solución en porcentaje de adsorción (Ecuación N° VI.1.2), siendo “q” quien representa mejor los resultados. Para la arcilla ácida o termoactivada, se observa que en mezcla, el cobre y el cromo (Tabla N° VI.3.1) compiten, siendo el cobre quien muestra mayor adsorción excepto cuando se encuentra en menor proporción ( $C_i = 0.25 C_T$ ) con respecto al cromo, esto puede ser debido a la configuración de ambos complejos, octaédrico contra plano cuadrado y también a la concentración, debido a que a mayor concentración, mayor es la fuerza impulsora que afecta el transporte (Ley de Fick) (Bird, 1982).

En la mezcla cobre-níquel para ambas arcillas modificadas (Tabla N° VI.3.2), el níquel se adsorbe más que el cobre cuando está en igual proporción que éste, al parecer al tener ambos igual configuración, predomina el que tiene menor carácter ácido; a diferentes concentraciones, se adsorbe más aquel que se encuentra en mayor concentración.

Para el caso de la mezcla níquel - cromo (Tabla N° VI.3.3), la arcilla ácida favorece relativamente en igual proporción la adsorción del cromo sobre el níquel, donde el níquel también compite, mientras que en la arcilla apilada se favorece en mayor cantidad la adsorción del níquel en comparación con la arcilla ácida, lo cual nuevamente confirma la tendencia

que se observa cuando se puso en contacto el efluente con un solo metal (la arcilla ácida adsorbe preferentemente el cromo y la arcilla apilarada el níquel).

En la mezcla cobre – zinc (Tabla N° VI.3.4), la arcilla ácida favorece al cobre en todas las proporciones, esto puede ser debido a la configuración del complejo y al pH = 3; la arcilla apilarada por el contrario favorece al zinc en todas las proporciones.

Para la mezcla cobre – níquel – cromo (Tabla N° VI.3.5) independientemente de la geometría molecular del complejo formado (Figura N° VII.1.1), y de la concentración en que se encuentren, la arcilla ácida tiene mayor selectividad hacia el metal que presenta mayor carácter ácido (cromo), lo contrario sucede con la arcilla apilarada que tiene mayor preferencia hacia el níquel. Esta misma tendencia se observó en la adsorción individual de cada metal con cada tipo de arcilla modificada.

En la mezcla zinc – cobre – cromo (Tabla N° VI.3.6), la arcilla ácida favorece al cobre y cromo, y favorece al zinc cuando se encuentra en mayor proporción. La arcilla apilarada favorece relativamente al zinc, donde el cromo y cobre también compiten, en este caso parece ser que la geometría molecular tiene un papel predominante en los complejos metálicos que se forman.

Para la mezcla zinc – cobre – níquel en medio ácido (pH = 3 ) (Tabla N° VI.3.7), la arcilla ácida favorece al zinc y al cobre salvo cuando la concentración del otro metal no es elevada. En la arcilla apilarada el zinc y

el níquel son favorecidos y compiten entre ellos, aún a pesar de que la concentración del cobre presente sea elevada, lo cual nuevamente nos confirma la selectividad de esta arcilla por el níquel y zinc.

En la mezcla zinc – cobre – níquel – cromo (Tabla N° VI.3.8) en medio ácido (pH = 3), la arcilla ácida presenta una selectividad hacia el cobre y cromo quienes compiten entre ellos. Por el contrario, la arcilla apilarada en un medio a pH = 5 adsorbe en mayor proporción al zinc y al níquel con respecto a los otros metales.

En general, en todos los ensayos estudiados, se observa que se mantiene la selectividad de la arcilla ácida en medio ácido (pH = 3) hacia el cromo y el cobre, en tanto que la arcilla apilarada (pH = 5) es selectiva hacia el níquel y el zinc.

#### **VII.4 ARCILLAS DESPUÉS DEL CONTACTO CON EL EFLUENTE**

Adicionalmente a lo anterior, la información obtenida por activación neutrónica de las composiciones de las arcillas modificadas después del contacto con el efluente de cromo (Tabla N° VI.4.1) nos confirma que tanto para la arcilla activada como la apilarada, se produce un incremento del contenido de cromo, confirmando que se ha logrado la retención del metal. También se observa una disminución bastante apreciable del contenido de Fe, en tanto que no hay una variación apreciable en los contenidos de los otros elementos.

Este hecho parece indicar que podría existir otro fenómeno adicional al proceso de adsorción. Teniendo en cuenta la naturaleza propia de la



arcilla, y sobre la base de otros estudios realizados (Sun Kou, 1994) nos inclinamos a pensar que es un proceso de intercambio iónico el que estaría realizándose conjuntamente con la adsorción.

El análisis de la arcilla activada con el efluente de zinc (Tabla N° VI.4.2) estaría indicando más bien la presencia de un proceso de adsorción; ello debido al incremento del contenido de zinc, por la retención de este metal sobre el adsorbente; el aumento del contenido de Cr(III) se debe a que las piezas que son recubiertas por el baño de zinc, previamente pasan por un recubrimiento de cromo; el incremento de los contenidos de Na y en especial del Fe puede provenir de los recubrimientos protectores de las cubas (Julve Salvado, 1963).

Las variaciones de calcio pueden provenir de los baños de solución electrolítica o desengrasante o por deposición sobre la pieza con recubrimiento electrolítico después del enjuague final. El incremento del contenido de Mn puede provenir de los baños de decapado de las piezas, al haberse introducido en el baño metales recubiertos con depósitos de Mn (Langfor, 1970).

En el caso de la arcilla apilarada, los resultados parecen indicar la presencia de ambos procesos: adsorción por la alta retención de zinc, e intercambio iónico del Mg, Ca y otros metales posiblemente con el aluminio no intercambiado en la forma del ión Keggin. El incremento del Na, Fe, Mn, Ca, Mg y Cr se debe a las razones anteriormente explicadas.

El área superficial de las arcillas (Tabla N° VI.4.3 y VI.4.4) indica que los dos procesos de modificación (termoactivación y apilamiento) producen en ambos casos un incremento del área superficial comparado con la arcilla de partida (47,2 m<sup>2</sup>/g), siendo mayor el incremento en la arcilla BPILC-Al/20/2 (181.7 m<sup>2</sup>/g). Tras el contacto de la arcilla termoactivada con el efluente de cromo, el área superficial se reduce a más de la mitad (de 128.4 m<sup>2</sup>/g a 55.4 m<sup>2</sup>/g); adicionalmente las isothermas correspondientes (Figura N° VII.4.1) indicarían una pérdida del área microporosa, representada al inicio de la curva, a bajas presiones relativas. A mayores presiones relativas, la zona mesoporosa aparentemente no se ve afectada, dado que existe un cierto paralelismo entre ambas isothermas en esa zona.

El área superficial de la arcilla termoactivada después del contacto con cada uno de los efluentes: cobre ácido, cobre alcalino y níquel no cambia en cuanto a su valor, salvo para el caso del níquel en que desciende ligeramente de 128.4 m<sup>2</sup>/g a 117.6 m<sup>2</sup>/g. Las isothermas correspondientes (Figura N° VII.4.1-a y b) indican que no hay un cambio apreciable en la zona microporosa pero si en la zona mesoporosa con cambio en la tendencia de las isothermas (menor pendiente), ello podría corroborar la asunción anterior en que se indicaba un posible cambio del tipo de poro por el posible recubrimiento o deposición del metal sobre el poro (Figuras N° VI.2.7 al VI.2.9).

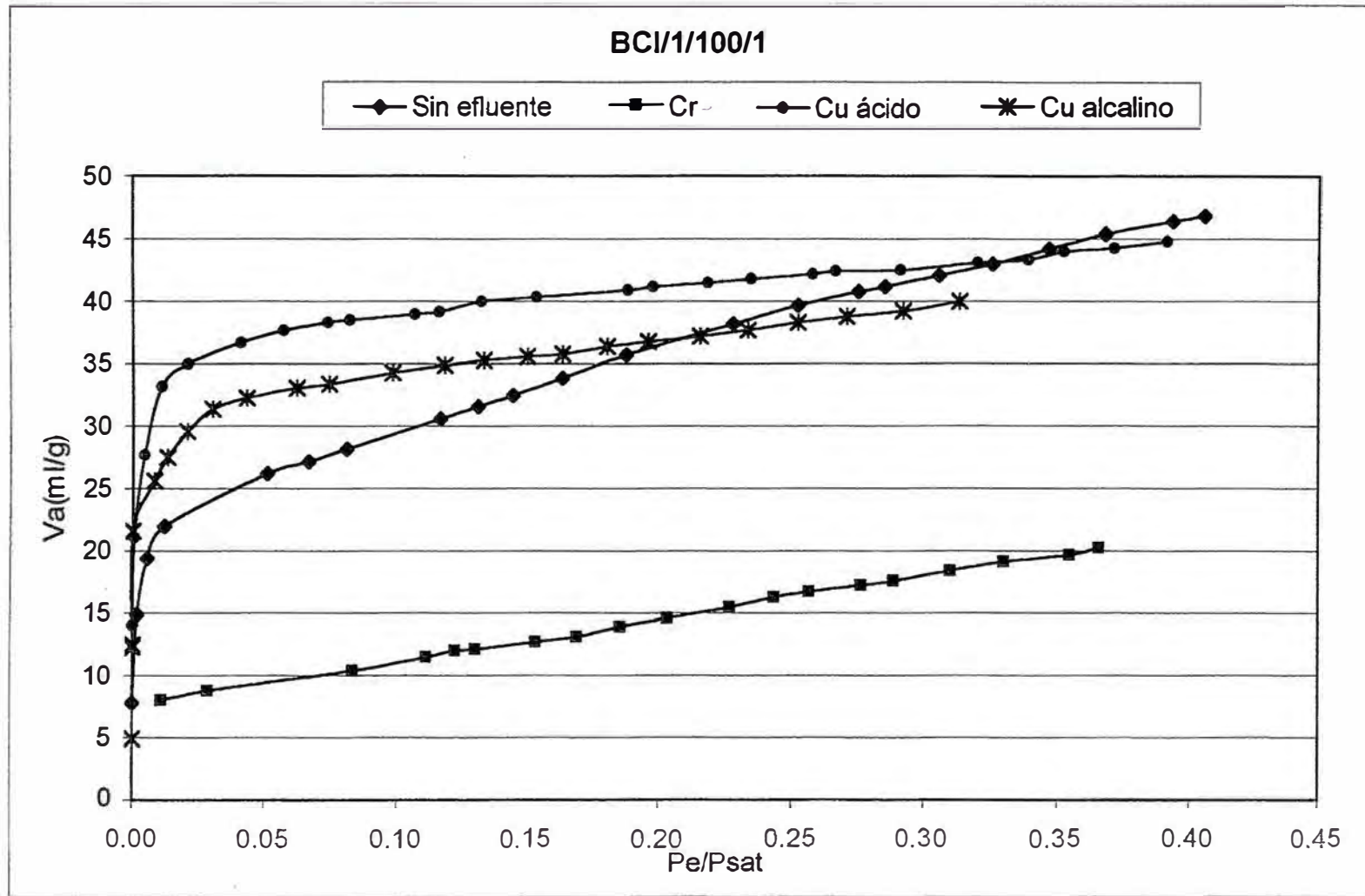


Figura N° VII.4.1--a Isothermas de adsorción de la arcilla BCI/1/100/1 con diferentes efluentes

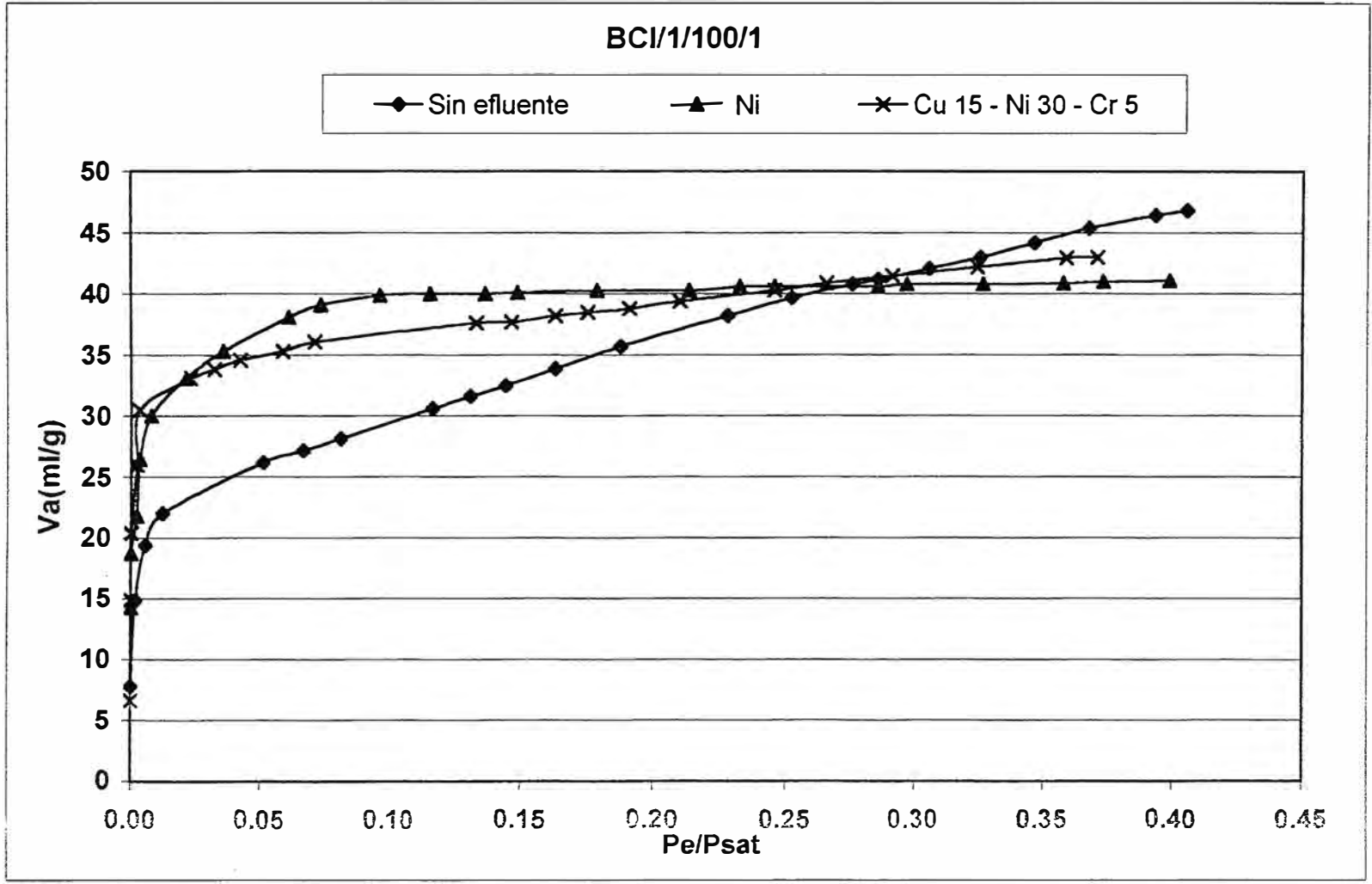


Figura N° VII.4.1--b Isothermas de adsorción de la arcilla BCI/1/100/1 con diferentes efluentes

Para el caso de la arcilla apilarada (Tabla N° VI.4.4) el único caso en que se observa una disminución del área superficial es después de haber sido puesta en contacto con el efluente de níquel (el área superficial desciende de 181.7 m<sup>2</sup>/g a 98.6 m<sup>2</sup>/g), este descenso es producido por una disminución de la zona microporosa de acuerdo a las isothermas que se muestran en la Figura N° VII.4.2-a, sin embargo la zona mesoporosa es ligeramente alterada tan solo a presiones relativas ( $P_e/P_{sat}$ ) superiores a 0.25. Para los otros casos, el área superficial no es alterada y tal como se muestra en sus respectivas isothermas (Figura N° VII.4.2-a y b) estas siguen una tendencia similar a la misma arcilla sin efluente; también se observa un cambio en la arcilla después de haber sido puesta en contacto con una mezcla de efluente (Cu 15 – Ni 30 – Cr 5), en donde se aprecia un leve descenso del área superficial y este se traduce en la isoterma correspondiente con una disminución de la zona microporosa y un leve cambio en la zona mesoporosa para presiones relativas mayores de 0.2. Este comportamiento estaría en concordancia con la nueva estructura creada por el efecto del apilamiento en la arcilla que ha originado poros de mayor tamaño y galerías internas debido al desplazamiento de las interláminas por la introducción del oligocatió de aluminio.

Los resultados de los DRX de la muestra BCI/1/100/1 – Cobre ácido (Figura N° VI.4.1) sufren un ligero cambio en los espaciados  $d_{001}$  comparado con la muestra sin efluente (Figura N° V.3.2.1), el valor desciende de 15.04Å a 14.57Å; adicionalmente se observa un incremento

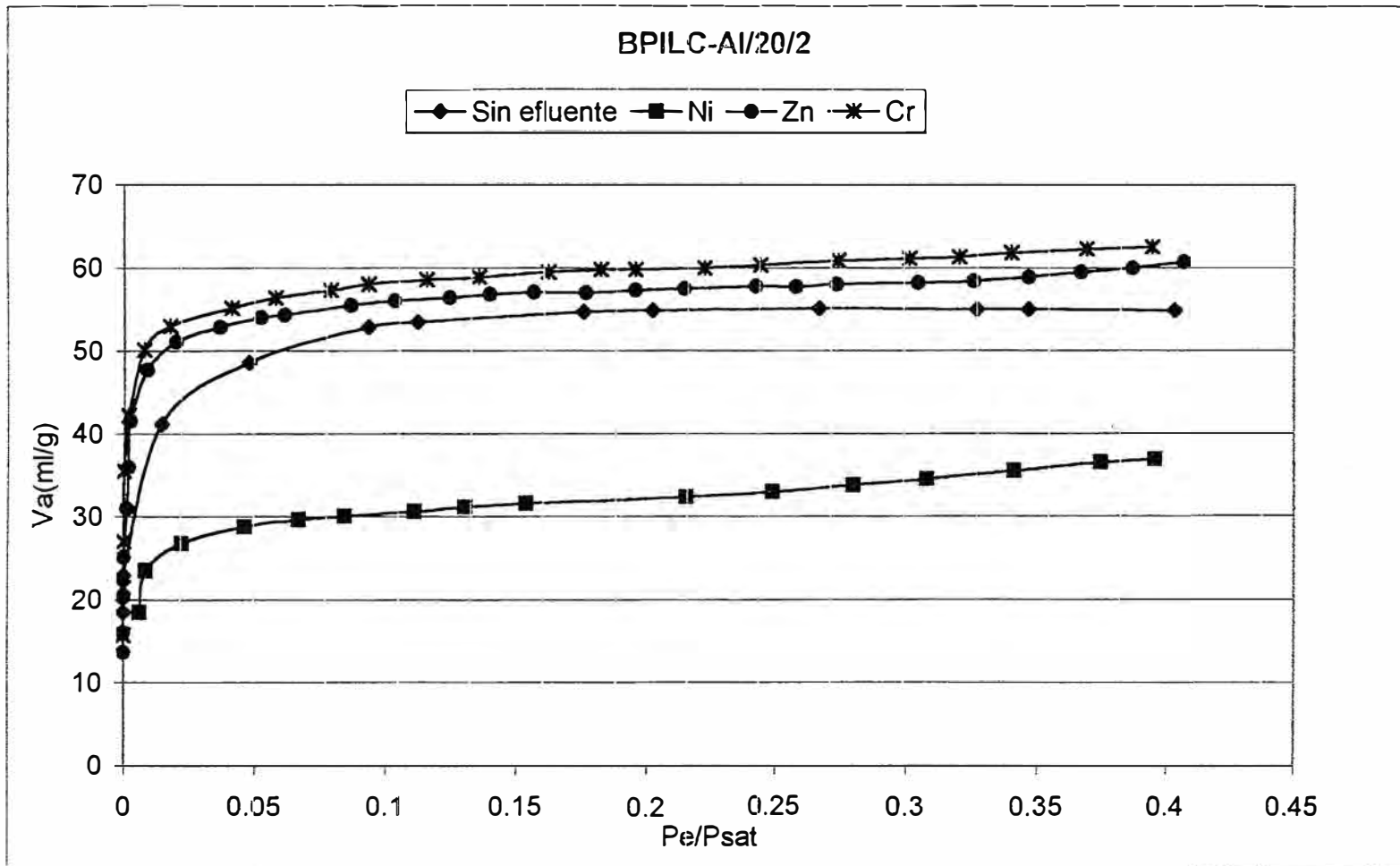


Figura N° VII.4.2--a Isotermas de adsorción de la arcilla BPILC-AI/20/2 con diferentes efluentes

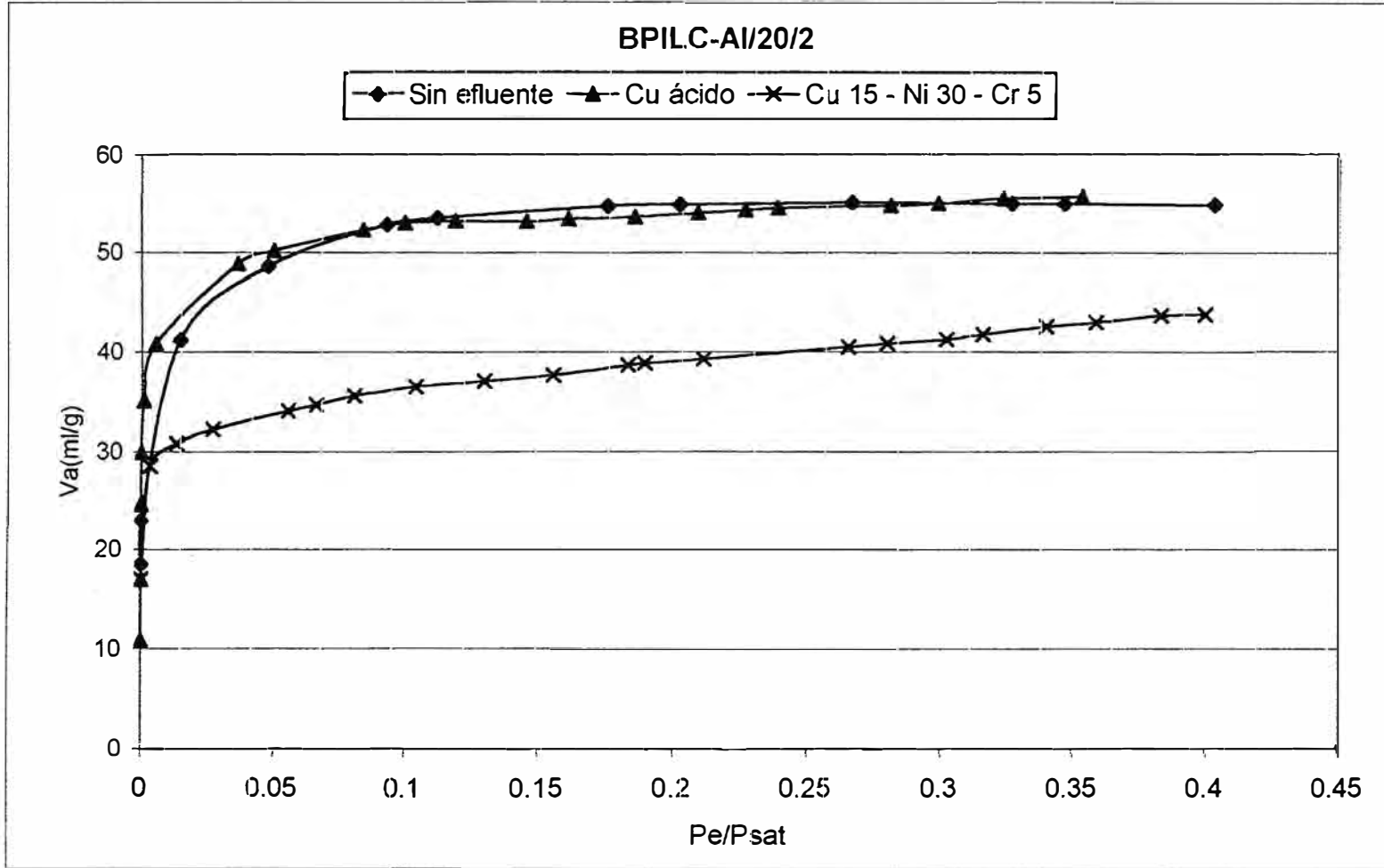


Figura N° VII.4.2--b Isothermas de adsorción de la arcilla BPILC-AI/20/2 con diferentes efluentes

en las intensidades de 3.33 Å, 2.55 Å y 2.48 Å que pueden corresponder a las especies de óxido de cobre, sulfato de cobre hidratado y silicato de cobre hidratado (Tabla N° XII.3.2 que aparece en el anexo).

Los DRX de las muestras de arcilla apilarada con el efluente de níquel muestran una disminución en el espaciado d001 de 17.34 Å en la arcilla BPILC-AI/20 /2 sin efluente a 13.87 Å, indicando que existe una posible obstrucción del poro corroborando lo anteriormente dicho con respecto a los análisis químicos y a la superficie específica. Por otro lado, tal como se había supuesto en la discusión anterior, la estructura de la arcilla apilarada no sufre ninguna alteración después del contacto con el efluente de zinc, los DRX de la muestra BPILC - AI/ 20/2 – Zinc (Figura N° VI.4.2) no muestra variación con respecto al DRX de la arcilla apilarada (Figura N° V.3.2.1).



**VIII. DISEÑO Y COSTOS DE UNA PLANTA PILOTO  
DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES  
GALVÁNICOS EMPLEANDO ARCILLAS  
MODIFICADAS**

## **VIII. DISEÑO Y COSTOS DE UNA PLANTA PILOTO DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES GALVÁNICOS EMPLEANDO ARCILLAS MODIFICADAS.**

### **VIII.1 DISEÑO DEL PROYECTO**

#### **VIII.1.1 IMPORTANCIA DEL PROYECTO**

Actualmente el empleo de arcillas modificadas en el tratamiento de efluentes galvánicos se aplica a nivel laboratorio (CYTED, 1998), por tal razón, no es factible a partir de esos resultados escalar costos a nivel industrial. Adicionalmente el inconveniente que se encontró para el desarrollo de esta parte del estudio fue la carencia de suficiente información para realizar un diseño a gran escala, por lo que se optó dada la disponibilidad de la miniplanta galvánica ya instalada en el Laboratorio de Electroquímica, hacer el diseño para esta capacidad, ya que podría compararse con numerosas miniplantas galvánicas (de baja producción, aprox. 500 L), que en su mayoría trabajan en forma artesanal en la Ciudad

de Lima (Anexo N° XII.1), y lamentablemente descargan sus efluentes con altos contenidos de metales en forma directa al desagüe, contaminando de este modo el ecosistema. Los análisis realizados a los efluentes de estas industrias permitieron comprobar este peligro. Uno de los objetivos que se perseguía en esta Tesis, era justamente el de contribuir a realizar una adecuada disposición de dichos efluentes.

## **VIII.1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO SELECCIONADO**

### **VIII.1.2.1 PLANTEAMIENTO DE LOS PARÁMETROS DE DISEÑO**

El procedimiento, los parámetros y los reactivos utilizados en el proceso de modificación de la arcilla: termoactivación y apilaramiento, se explican en los Subcapítulos N° V.2.1 y V.2.2. La cantidad de arcilla a utilizar obedece a la relación experimental de 0.05 Kg/L de efluente.

Los efluentes a tratar serán las aguas de recuperación y de enjuague de la miniplanta galvánica ubicada en el Lab. de Electroquímica FIQM-UNI. Los análisis realizados en este trabajo nos permiten asegurar que estas aguas contienen todos los componentes de los baños galvánicos (Tabla N° VI.1.1) en forma más diluida. Al considerar el tratamiento desde un punto de vista técnico – económico la solución más aconsejable es dividir las aguas de cada etapa en los tres grupos siguientes: a) las que contienen cianuros, b) las que contienen ácido crómico y c) aguas con un bajo pH (ácidas).

Las aguas de cada uno de estos tres tipos se evacuarán por separado y serán tratadas en forma independiente antes de su neutralización - precipitación. Para el diseño se ha establecido que la miniplanta galvánica trabaje de manera intermitente tres veces por semana, con piezas de acero y/o aleaciones de hierro de 10 cm de longitud por 7 cm de ancho y 0.2 cm de espesor y sometidas a diferentes recubrimientos electrolíticos: cromo, cobre ácido, cobre alcalino, níquel y zinc.

De acuerdo a los datos obtenidos experimentalmente, se ha establecido un volumen de 125 L de agua proveniente de las operaciones de enjuague que será tratada cada 15 días y 200 L de agua de recuperación recolectada y tratada cada mes. Esto requiere de un consumo de 6.25 Kg de arcilla modificada por tratamiento. Considerando que a partir de 1.4 Kg de bentonita se obtiene 1 Kg de arcilla modificada, se ha elaborado un programa de producción de materia prima requerida y de producto obtenido anualmente (Tabla N° VII.1.2.1.1, Anexo N° XII.6.1 y Figura N° VIII.1.2.1.1).

**Tabla N° VIII.1.2.1.1 Programa de producción**

<b>MATERIAL</b>	<b>CANTIDAD (Kg/año)</b>
Materia prima (bentonita)	329
Arcilla modificada	235

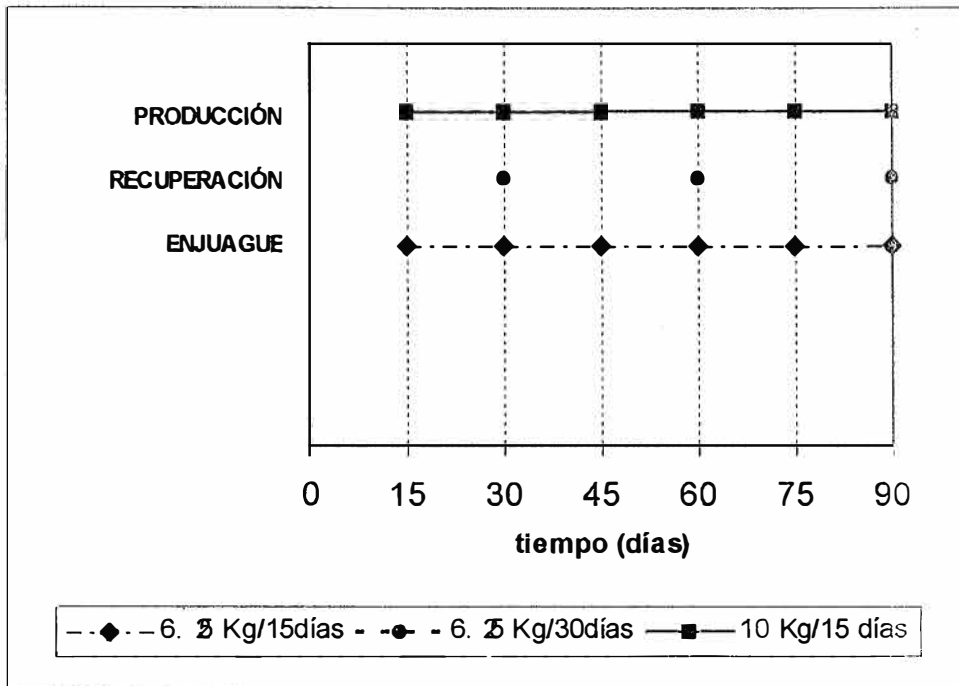


Figura N° VIII.1.2.1.1 Diagrama de operación

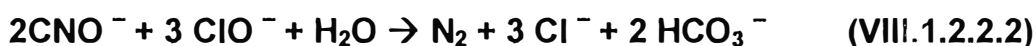
### VIII.1.2.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

A continuación se describe el proceso de tratamiento de los efluentes provenientes de las aguas de enjuague y recuperación, el cual se ilustra en las Figuras N° VIII.1.3.1 y N° VIII.1.3.2.

**PRIMERA ETAPA: Eliminación de cianuros, reducción de Cr (VI), tratamiento de aguas ácidas y neutralización - precipitación.**

En el tratamiento de las aguas de enjuague, los efluentes cianurados provendrán del segundo lavado de los baños de cobre alcalino y zinc (Figura N° VIII.1.3.1, líneas 1a y 2a respectivamente). En el caso de las aguas de recuperación, los efluentes provendrán del primer enjuague de los baños de cobre alcalino, zinc y del primer enjuague

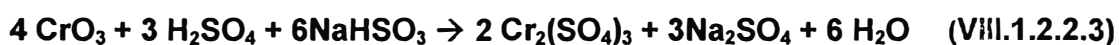
del desengrase electrolítico (Figura N° VIII.1.3.2, líneas 1b, 2b y 3b respectivamente). Los cianuros serán eliminados haciendo uso del hipoclorito de sodio (NaClO) en dos etapas. Las reacciones de oxidación de la primera y segunda etapa respectivamente son:



La operación se realizará en dos tanques de reacción conectados en serie provistos de agitadores que mantendrán en mezcla continua la solución. La primera etapa se realizará en el tanque TP-01 en donde el pH se deberá mantener entre 10 y 11 por 30 minutos, usando NaOH como medio alcalino; en la segunda etapa el producto será pasado al tanque TP-02 donde se mantendrá un pH de 9 – 9.5 en un tiempo de 60 a 90 minutos; adicionando un exceso de hipoclorito (20 %) se producirá la desaparición de los cianuros finalizando la reacción. Esto será comprobado al evaluar la concentración de  $\text{CN}^-$  antes y después del tratamiento. La norma (Tabla N° III.4.3) indica que la concentración de los cianuros deberá estar por debajo de 0.1 ppm.

En el tratamiento de las aguas de enjuague, el Cr (VI) provendrá del segundo lavado del baño de cromo (Figura N° VIII.1.3.1, línea 3a) y las aguas de recuperación se recolectarán del primer enjuague del baño de cromo (Figura N° VIII.1.3.2, línea 4b). El Cr (VI) será reducido antes de ser precipitado como Cr (III). Esto se realizará con  $\text{NaHSO}_3$  en

medio ácido, para lo cual se ajustará el pH entre 2 y 3 con H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. La reacción química es:



Se utilizará un tanque con agitación (TP-03) para mantener en mezcla continua por aproximadamente 30 min. Los requerimientos de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> y NaHSO<sub>3</sub> son: 3 g de NaHSO<sub>3</sub> / g de Cr(VI) y 1.4 g de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> / g de Cr(VI)

Debido a que el cromo tiene un mayor valor agregado en comparación con los otros metales, se podría efectuar su recuperación individual como Cr(OH)<sub>3</sub> usando NaOH después de su reducción.

Las aguas de enjuague ácidas provendrán del segundo lavado de los baños de níquel y cobre ácido (Figura VIII.1.3.1, Líneas 4a y 5a respectivamente) y las aguas de recuperación ácidas se recolectarán del primer enjuague de los baños de níquel y cobre ácido (Figura N° VIII.1.3.2, líneas 5b, 6b), del segundo enjuague del desengrase y del decapado químico (líneas 7b y 8b respectivamente). Dichos efluentes serán neutralizados con NaOH en el tanque TP-04.

El producto obtenido de los tres tranques antes descritos será conducido por la línea V al tanque TP-05 donde se realizará el ajuste de pH hasta un valor neutro, para luego neutralizar la solución con NaOH y proceder a la precipitación de los hidróxidos metálicos de cromo, cobre, níquel y zinc, la cual se producirá a pH de 8.2-8.5 aproximadamente. Los hidróxidos metálicos precipitarán en el fondo del

tanque como lodos. Después de tres horas de reposo, el líquido clarificado será llevado por la línea VI e impulsado por la bomba BP-03 hacia el tanque TP-06, donde será tratado con la arcilla modificada.

Los lodos serán conducidos por la línea VII hasta una tela filtrante donde los sólidos serán separados del líquido clarificado, este último será conducido por la línea VIII y VI al tanque de tratamiento con arcilla.

### **SEGUNDA ETAPA: Tratamiento con arcilla modificada**

Se realizará en el tanque TP-06. Antes de iniciar el tratamiento se ajustará el pH al valor de 3-3.5. Los cálculos para la determinación de la cantidad de arcilla serán realizados considerando la relación experimental de 0,05 Kg por litro de efluente contenido en cada una de las cubetas de aguas de enjuague y de recuperación antes de ser recolectadas (Anexo N° XII.6.4 Cálculos estequiométricos) El tiempo óptimo de operación es de 12 horas, al final del cual la mezcla se dejará en reposo durante dos horas.

Después de transcurrido este tiempo, se analizará una muestra del líquido para determinar las concentraciones de Cr, Cu, Ni y Zn. Si la concentración de cada metal en el efluente en el Tanque TP-06 resultara mayor que 5 ppm, se procederá a un tratamiento adicional consistente en enviar el efluente a través del filtro prensa PF-01 mediante la bomba de desplazamiento positivo BP-04, eliminando el sólido y



enviando el líquido clarificado al tanque TP-07 donde se le tratará nuevamente con una cantidad adicional (6.5 Kg) de arcilla modificada.

Si las concentraciones en el Tanque TP-06 resultan menores que 5 ppm se procederá a su filtración y el efluente clarificado será descargado directamente al desagüe en donde se mezclará con aguas residuales domésticas y/o industriales que tendrán en el punto de descarga un caudal de  $2 \text{ m}^3/\text{min}$  en promedio, reduciendo su concentración a un valor  $< 0.5 \text{ ppm}$  de tal forma que al mezclarse con las aguas de río (caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{min}$  aproximadamente) reducirán su concentración hasta valores menores a  $0.05 \text{ ppm}$ . Los niveles permitidos se muestran en la Tabla N° III.4.3. Los datos experimentales para el tratamiento de las aguas de enjuague y recuperación se muestran en la Tabla N° VIII.1.2.2.1 a y b y los cálculos estequiométricos en el Anexo N° XII.6.4.

Los sólidos serán llevados a un área de secado al medio ambiente donde se colocarán sobre una cama de grava (fondo) y una capa de arena gruesa, evitando en todo momento drenajes al suelo que puedan contaminar las aguas subterráneas. Los sólidos secos podrán ser llevados a un relleno sanitario el cual debe considerar: el no drenaje hacia aguas subterráneas, las condiciones geológicas e hidrológicas y el asegurar la estanqueidad del lodo, protegiéndolo de la penetración de aguas pluviales, empleando un revestimiento con arcilla para evitar

**Tabla N° VIII.1.2.2.1-a Datos experimentales del tratamiento de las aguas de enjuague**

Proceso		Cubetas de enjuague			Eliminación de CN <sup>-</sup> , reducción de Cr (VI) y ajuste de pH				Neutralización - precipitación (85% )			Trat con arcilla (40 %)			Concentraciones finales			
Elemento	M g/mol	V <sub>1</sub> (L)	C <sub>1</sub> (ppm)	m <sub>1</sub> (g)	V <sub>2</sub> (L)	C <sub>2</sub> (ppm)	m <sub>2</sub> (g)	C <sub>2</sub> * (ppm)	V <sub>3</sub> (L)	C <sub>3</sub> (ppm)	m <sub>3</sub> (g)	V <sub>4</sub> (L)	C <sub>4</sub> (ppm)	m <sub>4</sub> (g)	Cdesc. (ppm)	Crío (ppm)		
Cu alcalino Cianuros	63.5	25	60	1.5	50	30	1.5	30	125	1.8	0.225	125	1.08	0.135	0.06	0.013		
	26		75	1.875		50	50	1.875		< 0.1	< 0.1		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
Cianuros Zinc	26	25	25	0.625		20	1	20		< 0.1	< 0.1		1.2	0.15	0.72	0.09	0.042	0.0088
	65.4		40	1		20	1	20		4.5	0.5625		2.7	0.3375	2.7	0.3375	0.158	0.033
Cromo	52	25	150	3.75	25	150	3.75	150		2.4	0.3		1.44	0.18	0.085	0.0177		
Cu ácido	63.5	25	80	2	50	40	2	40		3.6	0.45		2.16	0.27	0.127	0.0267		
Níquel	58.7	25	120	3		60	3	60		3.6	0.45		2.16	0.27	0.127	0.0267		

**Tabla N° VIII.1.2.2.1-b Datos experimentales del tratamiento de las aguas de recuperación**

Proceso		Cubetas de enjuague			Eliminación de CN <sup>-</sup> , reducción de Cr (VI) y ajuste de pH				Neutralización - precipitación (85% )			Trat con arcilla (40 %)			Concentraciones finales			
Elemento	M g/mol	V <sub>1</sub> (L)	C <sub>1</sub> (ppm)	m <sub>1</sub> (g)	V <sub>2</sub> (L)	C <sub>2</sub> (ppm)	m <sub>2</sub> (g)	C <sub>2</sub> * (ppm)	V <sub>3</sub> (L)	C <sub>3</sub> (ppm)	m <sub>3</sub> (g)	V <sub>4</sub> (L)	C <sub>4</sub> (ppm)	m <sub>4</sub> (g)	Cdesc. (ppm)	Crío (ppm)		
Cu alcalino Cianuros	63.5	25	180	4.5	75	60	4.5	60	200	3.38	0.675	200	2.03	0.405	0.184	0.039		
	26		230	5.75		76.67	5.75	< 0.1		< 0.1	< 0.1		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1		
Cianuros desengrase	26	25	80	2		26.7	2	< 0.1		< 0.1	< 0.1		< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	
	26	25	70	1.75		23.3	1.75	40		3	40		2.25	0.45	1.35	0.270	0.1227	0.026
Cianuros Zinc	65.4		120	3	40	3	40	8.25		1.65	4.95		0.990	4.95	0.990	0.45	0.097	
Cromo	52	25	440	11	25	440	11	440		4.31	0.86		2.6	0.520	0.236	0.059		
Cu ácido	63.5	25	230	5.75	100	57.5	5.75	57.5		-	-		-	-	-	-	-	-
Decapado	-	25	-	-		-	-	-		-	-		-	-	-	-	-	-
Níquel	58.7	25	340	8.5		85	8.5	85	6.38	1.27	3.82	0.765	3.82	0.765	0.347	0.075		
Neutralizado	-	25	-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

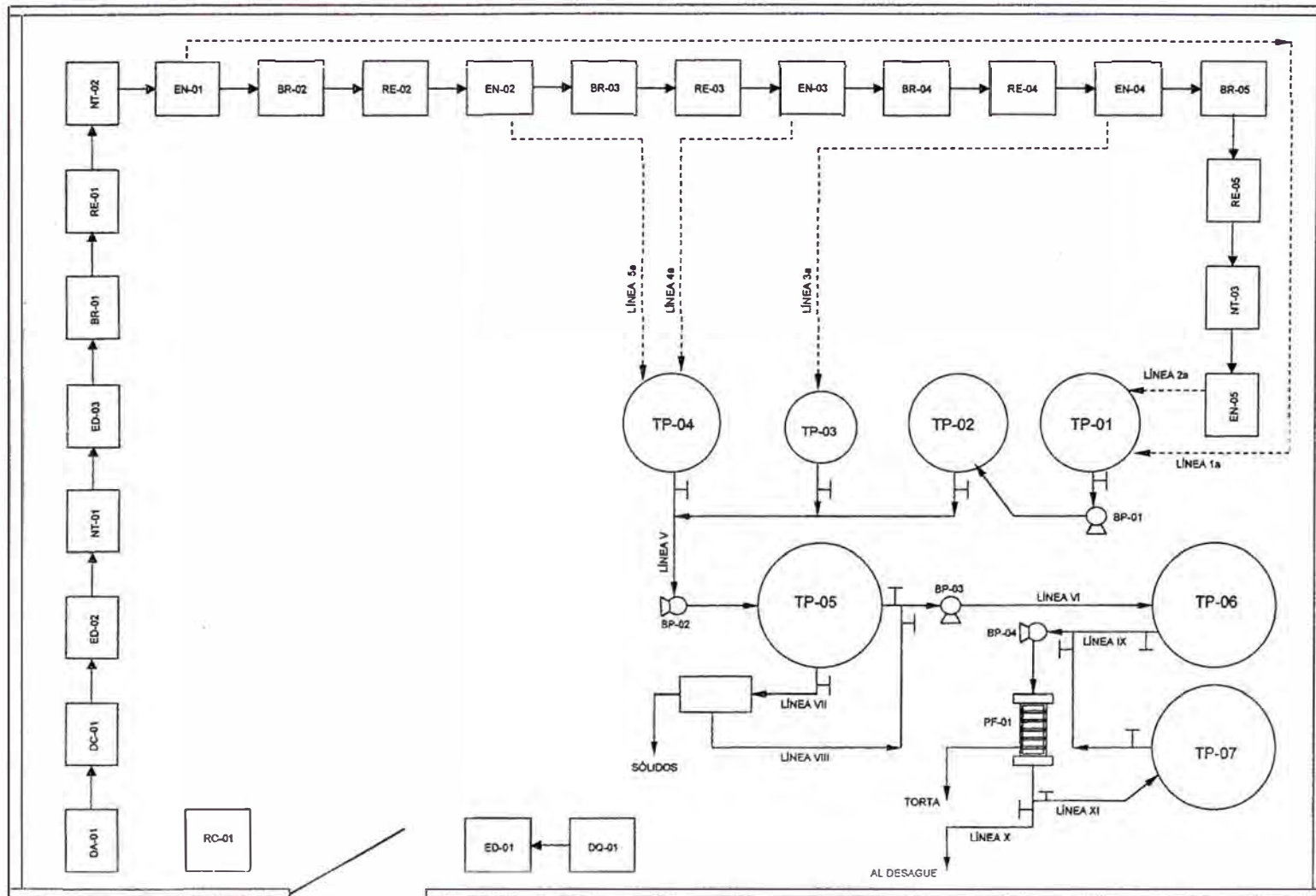
cualquier peligro. Adicionalmente, dichos sólidos podrán emplearse en la fabricación de cerámicos y/o materiales de construcción (Prieto, 1991).

### **VIII.1.2.3 DISEÑO DE EQUIPOS DEL PROCESO**

Los resultados se resumen en la Tabla N° VIII.1.2.3.1, mostrando la relación de equipos empleados, así como las principales características de las unidades de proceso.

### **VIII.1.3 DISTRIBUCION DE PLANTA**

En las Figuras N° VIII.1.3.1 y VIII.1.3.2 se ilustra la distribución de la miniplanta galvánica y los equipos requeridos para el tratamiento de sus efluentes.



CÓDIGO	INSTALACIÓN GALVÁNICA
DQ-01	DECAPADO QUÍMICO
ED-01	ENJUAGUE
RC-01	RECTIFICADOR
DA-01	DESENGRASE ANÓDICO
DC-01	DESENGRASE CATÓDICO
ED-02	ENJUAGUE
NT-01	NEUTRALIZADO
ED-03	ENJUAGUE
BR-01	BAÑO DE COBRE ALCALINO
RE-01	RECUPERACIÓN
NT-02	NEUTRALIZADO
EN-01	ENJUAGUE
BR-02	BAÑO DE COBRE ÁCIDO
RE-02	RECUPERACIÓN
EN-02	ENJUAGUE
BR-03	BAÑO DE NÍQUEL
RE-03	RECUPERACIÓN
EN-03	ENJUAGUE
BR-04	BAÑO DE CROMO
RE-04	RECUPERACIÓN
EN-04	ENJUAGUE
BR-05	BAÑO DE ZINC
RE-05	RECUPERACIÓN
NT-03	NEUTRALIZADO
EN-05	ENJUAGUE

CÓDIGO	EQUIPO DE TRAT. DE EFLUENTE
TP-01,02	TANQUE TRATAMIENTO DE $CN^-$
TP-03	TANQUE TRATAMIENTO DE $Cr$
TP-04	TANQUE TRAT. AGUAS ÁCIDAS
TP-05	TANQUE DE PRECIPITACIÓN
TP-06,07	TANQUE TRAT. CON ARCILLA
PF-01	FILTRO PRENSA
BP	BOMBAS CENTRÍFUGAS 01, 02, 03
BP-04	BOMBA DE SÓLIDOS

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y MANUFACT.

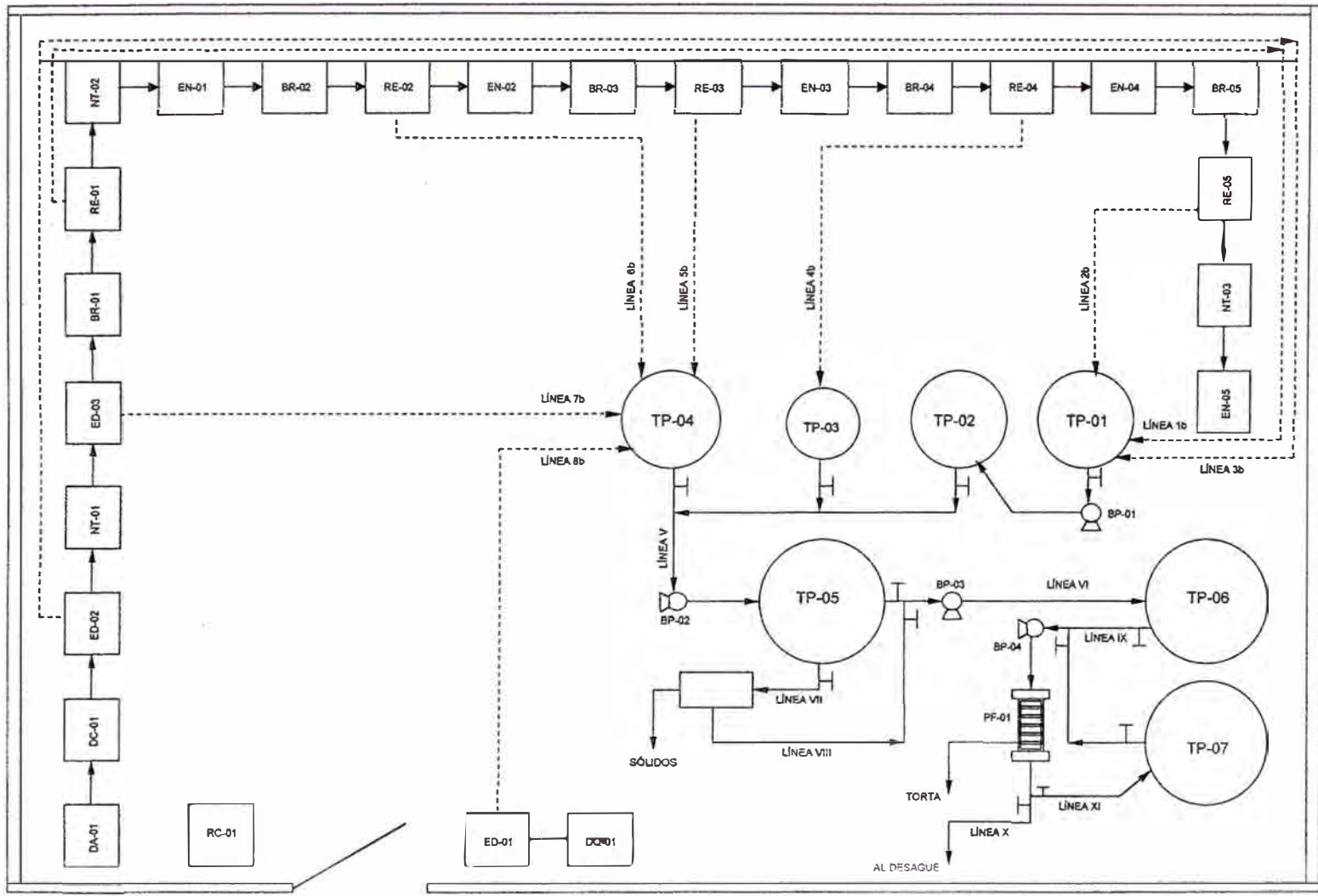
### DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

INSTALACIÓN DE GALVANOTÉCNICA Y PLANTA DE TRATAMIENTO DE EFLUENTES UTILIZANDO ARCILLA MODIFICADA.

DIB : R.T.L  
DIS : J.R.O

FECHA:  
11/02/01

FIGURA N° VIII.1.3.1  
ENJUAGUE



CÓDIGO	INSTALACIÓN GALVÁNICA
DQ-01	DECAPADO QUÍMICO
ED-01	ENJUAGUE
RC-01	RECTIFICADOR
DA-01	DESENGRASE ANÓDICO
DC-01	DESENGRASE CATÓDICO
ED-02	ENJUAGUE
NT-01	NEUTRALIZADO
ED-03	ENJUAGUE
BR-01	BAÑO DE COBRE ALCALINO
RE-01	RECUPERACIÓN
NT-02	NEUTRALIZADO
EN-01	ENJUAGUE
BR-02	BAÑO DE COBRE ÁCIDO
RE-02	RECUPERACIÓN
EN-02	ENJUAGUE
BR-03	BAÑO DE NÍQUEL
RE-03	RECUPERACIÓN
EN-03	ENJUAGUE
BR-04	BAÑO DE CROMO
RE-04	RECUPERACIÓN
EN-04	ENJUAGUE
BR-05	BAÑO DE ZINC
RE-05	RECUPERACIÓN
NT-03	NEUTRALIZADO
EN-05	ENJUAGUE

CÓDIGO	EQUIPO DE TRAT. DE EFLUENTE
TP-01,02	TANQUE TRATAMIENTO DE CN
TP-03	TANQUE TRATAMIENTO DE Cr
TP-04	TANQUE TRAT. AGUAS ÁCIDAS
TP-05	TANQUE DE PRECIPITACIÓN
TP-06,07	TANQUE TRAT. CON ARCILLA
PF-01	FILTRO PRENSA
BP	BOMBAS CENTRÍFUGAS 01, 02, 03
BP-04	BOMBA DE SÓLDOS

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y MANUFACT.

---

**DISTRIBUCIÓN DE PLANTA**

---

INSTALACIÓN DE GALVANOTÉCNIA Y PLANTA DE  
TRATAMIENTO DE EFLUENTES UTILIZANDO ARCILLA  
MODIFICADA.

---

DIB : R.T.L	FECHA: 11/02/01	FIGURA Nº VIII.1.3.2
DIS : J.R.O		RECUPERACIÓN



Tabla N° VIII.1.2.3.1 Relación de Equipos empleados

<b>TRATAMIENTO DE CIANURO</b>			
<b>Equipo</b>	<b>Código</b>	<b>Características</b>	
Tanques para tratamiento	TP - 01 TP - 02	Vt = 150 L.	D = 50 cm H = 80 cm e = 1/16" Cilíndrico Acero inoxidable
Agitador de Tanque	AT - 01 AT - 02	Da = 12 cm	P = 1 HP N = 220 rpm Paletas inclin 45° Ac. Inoxidable
<b>TRATAMIENTO DE CROMO</b>			
Tanque para tratamiento	TP - 03	Vt = 50 L.	D = 38.8 cm H = 60 cm e = 1/16" Cilíndrico Acero inoxidable
Agitador de Tanque	AT - 03	Da = 12 cm	P = 1 HP N = 220 rpm Paletas inclin 45° Ac. Inoxidable
<b>TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS</b>			
Tanque de neutralización	TP - 04	Vt = 150 L.	D = 50 cm H = 80 cm e = 1/16" Cilíndrico Acero inoxidable
Agitador de Tanque	AT - 04	Da = 12 cm	P = 1.5 HP N = 220 rpm Paletas inclin 45° Ac. Inoxidable
<b>NEUTRALIZACIÓN / PRECIPITACIÓN</b>			
Tanque para tratamiento	TP - 05	Vt = 300 L.	D = 64 cm H = 95 cm e = 1/16" Cilíndrico Acero inoxidable
Agitador de Tanque	AT - 05	Da = 12 cm	P = 2 HP N = 220 rpm Paletas inclin 45° Ac. Inoxidable

Tabla N° VIII.1.2.3.1 (Continuación)

<b>TRATAMIENTO CON ARCILLA</b>			
<b>Equipo</b>	<b>Código</b>	<b>Características</b>	
Tanque de mezcla	TP - 06 TP - 07	Vt = 300 L.	D = 64 cm H = 95 cm e = 1/16" Cilíndrico Acero inoxidable
Agitador de Tanque	AT - 06 AT - 07	Da = 12 cm	P = 3 HP N = 210 rpm Paletas inclin 45° Ac. Inoxidable
<b>FILTRACIÓN</b>			
Bomba de sólidos	BP - 04	Q = 1 GPM	P = 3 HP Desplazamiento positivo
Filtro prensa	PF - 01	Q = 1 GPM	A = 0.1 m <sup>2</sup> Placas y marcos
<b>BOMBEO</b>			
Bomba	BP - 01	Q = 1 GPM	P = 1 HP Centrífuga Impulsor ac. Inox.
Bomba	BP - 02	Q = 1 GPM	P = 1 HP Centrífuga Impulsor ac. Inox.
Bomba	BP - 03	Q = 2 GPM	P = 1 HP Centrífuga Impulsor ac. Inox.

Referencia: Anexo N° XII.6.2 Dimensionado de tanques y XII.6.3 Filtro prensa

## **VIII.2 COSTOS**

Los costos para el proyecto se dividen en costos de Inversión y Operación, habiendo sido evaluado en dólares americanos.

### **VIII.2.1 INVERSION DE CAPITAL FIJO**

La inversión total del proyecto corresponde al capital fijo, la parte fundamental comprende la estimación de costos de todos los equipos de la miniplanta, estos costos provienen de fabricantes de equipos industriales nacionales e incluyen la instalación en planta y están actualizados a Febrero del 2001. En la Tabla N° VIII.2.1.1 se muestra la información detallada de cada equipo. El monto total de la inversión asciende a US\$ 14400.

### **VIII.2.2 COSTOS DE OPERACIÓN.**

Se ha dividido en dos partes: estimación del costo de manufactura de la arcilla modificada a nivel industrial (Tabla N° VIII.2.2.1 a y b) y costo de operación de la miniplanta de tratamiento de efluentes (Tabla N° VIII.2.2.2 a y b). Los costos de materia prima, reactivos y servicios se muestran en la Tabla N° XII.6.2. Los cálculos correspondientes a los costos se aprecian en el Anexo N° XII.6.



Tabla N° VIII..2.1.1 Costo de Equipos

<b>TRATAMIENTO DE CIANURO</b>			
<b>Equipo</b>	<b>Código</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Costo US\$</b>
Tanques para tratamiento	TP - 01	Vt = 150 L.	900
	TP - 02	Vt = 150 L.	900
Agitador de Tanque	AT - 01	Da = 12 cm	450
	AT - 02	Da = 12 cm	450

<b>TRATAMIENTO DE CROMO</b>			
Tanque para tratamiento	TP - 03	Vt = 50 L.	800
Agitador de Tanque	AT - 03	Da = 12 cm	450

<b>TRATAMIENTO DE AGUAS ÁCIDAS</b>			
Tanque de neutralización	TP - 04	Vt = 150 L.	900
Agitador de Tanque	AT - 04	Da = 12 cm	450

<b>NEUTRALIZACIÓN / PRECIPITACIÓN</b>			
Tanque para tratamiento	TP - 05	Vt = 300 L.	1000
Agitador de Tanque	AT - 05	Da = 12 cm	500

<b>TRATAMIENTO CON ARCILLA</b>			
Tanque de mezcla	TP - 06	Vt = 300 L.	1000
	TP - 07		1000
Agitador de Tanque	AT - 06	Da = 12 cm	500
	AT - 07		500
Bomba	BP - 01	Q = 1 GPM	200
Bomba	BP - 02	Q = 1 GPM	200
Bomba	BP - 03	Q = 2 GPM	200

<b>FILTRACIÓN</b>			
Bomba de sólidos	BP - 04	Q = 1 GPM	500
Filtro prensa	PF - 01	Q = 1 GPM	3500

<b>TOTAL DE INVERSIÓN DE CAPITAL FIJO</b>	<b>14400</b>		
---	--------------	--	--

Nota: Costo instalado a Feb 2001. Incluye el 18 % IGV.

Tabla N° VIII.2.2.1-a Costo de manufactura de la arcilla termoactivada

CONCEPTO	US\$ /año
1. <u>Materia prima</u>	
Bentonita	52.64
	52.64
2. <u>Costo Variable</u>	
a. Reactivos	
- HCl	32.90
b. Servicios	
- Agua	10.56
- Electricidad	118.44
	161.90
<b>Total Costo Variable</b>	161.90
3. <u>Costo Fijo</u>	
a. Mano de obra	360.00
b. Laboratorio	46.80
	406.80
<b>Total Costo Fijo</b>	406.80
<b>Costo de producción total</b>	621.34
<b>Costo unitario</b>	$\frac{621.34 \text{ US\$/año}}{235 \text{ Kg AA /año}} = 2.65 \text{ US\$/Kg AA}$

Tabla N° VIII.2.2.1-b Costo de manufactura de la arcilla apilarada

CONCEPTO	US\$ /año
1. <u>Materia prima</u>	
Bentonita	52.64
	52.64
2. <u>Costo Variable</u>	
a. Reactivos	
- AlCl <sub>3</sub>	23161.60
- NaOH	1983.21
b. Servicios	
- Agua	721.17
- Electricidad	1755.54
	27621.52
<b>Total Costo Variable</b>	27621.52
3. <u>Costo Fijo</u>	
a. Mano de obra	360.00
b. Laboratorio	93.60
	453.60
<b>Total Costo Fijo</b>	453.60
<b>Costo de producción total</b>	28127.76
<b>Costo unitario</b>	$\frac{28127.76 \text{ US\$/año}}{235 \text{ Kg AAp /año}} = 119.70 \text{ US\$/Kg AAp}$

Referencias: Tabla N° XII.6.3 a, b y XII.6.4 a, b

**Tabla N° VIII.2.2.2-a Costo de Operación del tratamiento  
de las aguas de enjuague**

<b>CONCEPTO</b>	<b>US\$ /tratamiento</b>
<b>1. <u>Materia prima</u></b>	
Arcilla Termoactivada	16.56
	16.56
<b>2. <u>Costo Variable</u></b>	
<b>a. Reactivos</b>	
- NaClO	0.2480
- NaOH	0.7616
- H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.0027
- NaHSO <sub>3</sub>	0.0433
	1.0556
<b>b. Servicios</b>	
- Agua	0.1850
- Electricidad	2.5950
	2.7800
<b>Total Costo Variable</b>	3.8350
<b>3. <u>Costo Fijo</u></b>	
a. Mano de obra	90.00
b. Laboratorio	128.70
	218.7
<b>Total Costo Fijo</b>	218.7
<b>Costo Total de Operación</b>	239.1

Referencias: Anexo N° XII.6.4 Cálculos estequiométricos. y

Tabla N° XII.6.5 - a

**Tabla N° VIII.2.2.2-b Costo de Operación del tratamiento  
de las aguas de recuperación**

<b>CONCEPTO</b>	<b>US\$ /tratamiento</b>
<b>1. <u>Materia prima</u></b>	
Arcilla Termoactivada	16.56
	16.56
<b>2. <u>Costo Variable</u></b>	
<b>a. Reactivos</b>	
- NaClO	0.94215
- NaOH	1.78718
- H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.00800
- NaHSO <sub>3</sub>	0.12693
	2.86423
<b>b. Servicios</b>	
- Agua	0.1850
- Electricidad	2.5950
	2.7800
<b>Total Costo Variable</b>	5.6443
<b>3. <u>Costo Fijo</u></b>	
a. Mano de obra	90.00
b. Laboratorio	128.70
	218.7
<b>Total Costo Fijo</b>	218.7
<b>Costo Total de Operación</b>	240.9

Referencias: Anexo N° XII.6.4 Cálculos estequiométricos. y

Tabla N° XII.6.5 - b

## **IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **IX.1 CONCLUSIONES**

- 1.** Se ha comprobado que las arcillas cuando se les somete a un tratamiento termoácido o de apilamiento mejoran sus características estructurales y texturales que las hacen adecuadas para la adsorción de metales como se ha verificado, en este caso, con el estudio de la adsorción de cromo, cobre, níquel y zinc contenidos en los efluentes galvánicos
- 2.** El proceso de apilamiento comparado con el termoácido permite una mejora de las propiedades anteriores sin que se produzca un cambio de la estructura original de la arcilla.
- 3.** La presencia de efectos difusionales debido a la conformación geométrica del complejo del metal formado, puede influir en la selectividad de un metal por una determinada arcilla.

4. Existe una mayor remoción de Cr(III) y Cu(II) para la arcilla BCI/1/100/1, en tanto que en la arcilla BPILC-AI/20/2 preferentemente se adsorbe Ni(II) y Zn(II). Esta tendencia se cumplió aún en soluciones que contenían mezclas de metales.

5. Las condiciones óptimas de mayor adsorción son:

Arcilla	BCI/1/100/1	BCI/1/100/1	BCI/1/100/1	BPILC-AI/20/2	BPILC-AI/20/2
Efluente	Cromo	Cobre ácido	Cobre alcalino	Níquel	Zinc
Metal	Cr(III)	Cu(II)	Cu(II)	Ni(II)	Zn(II)
Tiempo de contacto (h)	12	8	10	10	12
pH	3,2	3,5	3,3	5,2	5,2

6. Los estudios realizados por activación neutrónica parecen indicar que existe un fenómeno de intercambio iónico adicional al proceso de adsorción, ambos parecen competir en la retención del metal en estudio. Así, para el caso del cromo aparecen los dos fenómenos y para el caso del zinc parece predominar más la adsorción.

7. La variable que más afecta a la retención de los metales por la arcilla modificada es el pH de la solución, debido a la posibilidad de formación de diversos complejos metálicos acuosos que se forman a diferentes pH.

8. Para el tratamiento del efluente con la arcilla modificada se seleccionó a la arcilla termoactivada debido a su menor costo de manufactura en comparación con la arcilla apilarada.

## IX.2 RECOMENDACIONES

1. Sería conveniente realizar ensayos orientados a la recuperación de los metales retenidos por las arcillas modificadas gastadas para su posterior reutilización tanto de los metales como de la arcilla.
2. El trabajo se centró tan solo en la retención de metales por lo que sería recomendable continuar este estudio centrándose en el tratamiento de los residuos sólidos dada la cantidad de metal retenido por la arcilla, ésta podría utilizarse en otros procesos de manufactura tal como fabricación de productos cerámicos.
3. Se recomienda continuar el estudio de este tipo de arcillas para la adsorción de otros metales tóxicos (Hg, Pb y Cd), buscando los parámetros óptimos de mayor retención del metal.
4. Tentativamente se realizó un escalamiento de los datos obtenidos de laboratorio a nivel planta piloto; si bien estos datos son referenciales por el mismo factor de escalamiento, pueden servir de base a futuros trabajos que se realicen a nivel de planta piloto.



## **X. GLOSARIO**

## X. GLOSARIO

**ABSORBANCIA:** Se basa en la Ley de Beer  $A = \log (P_0/P)$  en donde  $P_0$  es la energía radiante que incide sobre una muestra y  $P$  es la energía radiante que emite la muestra. La absorbancia es directamente proporcional a la concentración de la especie absorbente que se encuentra en solución.

**ANEMIA HEMOLÍTICA:** Destrucción de los glóbulos rojos.

**CIPRÍNIDOS:** Grupo de peces que tienen escamas de placas óseas delgadas cubiertas por epidermis, con rasgos primitivos. Incluyen las carpas.

**DIAGNÓSTICO AMBIENTAL PRELIMINAR (DAP):** Es el estudio que se realiza antes de la elaboración del PAMA que contiene los resultados derivados del programa de monitoreo en función a los Protocolos de Monitoreo, con el objeto de evaluar los impactos e identificar los

problemas que se estén generando en el ambiente por la actividad de la industria manufacturera.

**EDEMA:** Hinchazón.

**ERITROCITOS:** Corpúsculos sanguíneos rojos; glóbulos rojos.

**ESPECTROFOTOMETRO DE DOBLE HAZ:** Es un instrumento en el cual el haz se divide para permitir la comparación de la muestra y el solvente (o reactivo que sirve como blanco) al mismo tiempo.

**ESTOMA:** Poro en la epidermis de la planta a través del cual tiene lugar al intercambio de gases. Las estomas son particularmente abundantes en las hojas. Cada poro está rodeado por dos células acompañantes que contienen clorofila.

**ESTUDIOS DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA):** Son los estudios que deben efectuarse en los proyectos de las actividades industriales, los cuales abarcan aspectos físicos – naturales, biológicos, socio – económicos y culturales en el área de influencia del proyecto, con la finalidad de determinar las condiciones existentes y las capacidades del medio, así como prever los efectos y consecuencias de la realización del mismo, indicando medidas y controles a aplicar para lograr un desarrollo armónico entre las operaciones y el ambiente. Se aplican al inicio de una nueva actividad o proyecto.

**FACTORES DE APLICACIÓN:** Para la evaluación de las concentraciones de riesgo en general se reducen las concentraciones “efectivas” aplicando factores arbitrarios en función de las características

de la sustancia en examen (varían de 0.0005 a 0.75). Estos factores de aplicación o de reducción se multiplican por la concentración que en un tiempo de 96 horas resulta letal para el 50% de los organismos en examen (96 hLD 50).

**HEMOGLOBINA:** Pigmento rojo que se encuentra en la sangre y que sirve para el transporte del oxígeno a los tejidos.

**HEPÁTICO:** Se refiere a las células, tejidos o productos orgánicos propios del hígado.

**LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE:** Nivel de concentración o cantidades de uno o más contaminantes, por debajo del cual no se prevee riesgo para la salud; el bienestar humano y los ecosistemas.

**LINFOCITO:** Pequeña célula sanguínea incolora y mononucleada responsable de la síntesis de anticuerpos.

**METAHEMOGLOBINA:** Es un compuesto de hemoglobina y nitritos

**MUTAGÉNICO:** Es un causante de cambio (mutación) en el ácido desoxirribonucleico (ADN), que contiene la "información genética" de un organismo. Produce cambios en la herencia.

**NANOMETRO (nm):** Es la unidad común para la longitud de onda, en particular para la región UV – Visible.  $1\text{nm} = 10^{-9}\text{ m}$

**NIVEL O VALOR DE SEGURIDAD:** Esta coincide con la concentración a la cual, inclusive en presencia de fluctuaciones relativamente amplias de la relación exposición /concentración no es previsible algún efecto nocivo, o reversible debido a una toxicidad directa y de bioacumulación.

**PROGRAMA DE ADECUACION Y MANEJO AMBIENTAL (PAMA):** Es el programa donde se describe las acciones e inversiones necesarias para cumplir con el reglamento de protección ambiental. Se aplica a las industrias que tengan actividades en curso a la fecha de promulgación de normas que contengan obligaciones ambientales que impliquen una adecuación.

**SISTEMA NERVIOSO CENTRAL:** Parte del sistema nervioso con un gran número de cuerpos celulares y regiones por donde se transmiten los impulsos de una fibra nerviosa a otra, y que se compone del cerebro, los ganglios cerebrales y un cordón nervioso.

**TERATOGENICO:** Sustancia que produce deformación del feto durante su desarrollo.

## **XI. BIBLIOGRAFÍA**

## XI. BIBLIOGRAFÍA

- AGGARWAL D., GOYAL M., Adsorption of chromium by activated carbon from aqueous solution, Carbon 37, pags. 1989-1997, 1999.
- AWWA-APHA-WPCF., Standard Methods for the examination of Water and Wastewater, Joint Editorial Board, 15<sup>th</sup> Edition, 1980.
- BARNES M., DORAIRAJA H., y ZELA E., A feasibility study of removal of chromium from selected contaminated sites Wastewater, Vol., N° 35, pag. 446-459, 1990.
- BASOLO F, JOHNSON R., Química de los compuestos de coordinación. Reverte, Barcelona, España, pag. 47, 1980.
- BECKHAUSER A., MOREIRA R., Remoción de Metales en Agua utilizando diversos Adsorbentes, V Taller Iberoamericano de Catálisis para la Protección Ambiental, CYTED, Maringá, 2000.
- BIRD R. B., Fenómenos de Transporte, Ed. Reverté, España, Cap. 16, pag. 10, 1982.

- BRUNAUER, S., EMMETT, P.H. y TELLER, E., 1938., J. Amer. Chem. Soc., Vol. 60., pag 309.
- BRINDLEY, G.W. y BROWN, G., Crystal Structures of Clays Minerals and Their X – Ray Identification, Ed. Brindley, G.W. y Brown, G., Mineralogical Society, London. Great Britain, pag. 323, 1980.
- CYTED, Catalizadores y adsorbentes para la Protección Ambiental en la Región Iberoamericana, Subprograma V. Catálisis y adsorbentes, pags. 195-200, 1998.
- DE CORTE, F., The k-sub-cero – Standardization method, a move to the optimization of neutron activation analysis, Rijksuniversiteit Gent, 1989.
- DE LORA, FEDERICO Y JUAN MIRÓ., Técnicas de Defensa del Medio Ambiente, Editorial Labor, Barcelona, Cap. 28, 1978.
- EPA Quality Criteria for Water, Office of water and Hazardous materials, Washington, U.S. Environmental Protection Agency, 1977.
- FAYAD, J. H., Evaluación de arcillas activadas como adsorbentes de efluentes industriales con contenido de cromo, Tesis de Grado, UNI. 1998.
- GARCIA AYVAR J. V., Tratamiento de aguas residuales en la industria Galvánica, Tesis de Grado, UNI, Cap. 2, 1997.
- HARRIS. J., HALLET PAUL E., Ecotoxicology and Ecosystem Integrity: the Great Lakes examined. Environment, Science & Technology, The American Chemical Society, Vol 24, N° 5, May 1990.



- JULVE SALVADO, Recubrimientos Electrolíticos Brillantes, Ed. Cedel, 1ª Edición, Barcelona, 1963.
- LANCY LABORATORIES INC., Aguas residuales, U.S. Pat. Office N° 2.981.682, Nov. 1971.
- LANGFORD, Análisis de Baños Electrolíticos, Ed. Reverté, España, 1970.
- LECHUGA W., Determinación de condiciones óptimas de adsorción del Hg (II) con Bentonita en aguas contaminadas, VI Congreso Peruano de Ingeniería Química, Trujillo, pag. 85-86, 1996.
- MANKU G. S., Principios de Química Inorgánica, Mc Graw Hill, Mexico D. F., pag. 55, 1988.
- PIRES J., CARVALHO A., BROTAS M., Potencialidades de las Arcillas apilaradas como adsorbentes microporosos., Catalizadores y Adsorbentes para la Protección Ambiental en la Región Iberoamericana, CYTED, pag. 169-172, 1998.
- PRIETO J. J., VICTORERO A. y MIR M., Memorias 3ª . Conf. Internacional sobre Ocurrencias, Propiedades y Usos de las Zeolitas naturales, Palacio Convenciones Pub., La Habana, Parte II, pag. 130, 1991.
- ROOT MICHAEL, Biological monitors of pollution, Bio Science. American Institute of Biological Sciences, Vol. 40, N° 2, Washington D.C. Feb. 1990.

- SINGER F. Cerámica Industrial, Urmo S.A. Bilbao – España, pags. 68-94, 1971.
- SUN KOU, M. R, Desarrollo de Catalizadores de cobre soportados en arcillas naturales y evaluación de las mismas en la reacción de Deshidrogenación del metanol a formiato de metilo, Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Ingeniería, 1996.
- SUN KOU, M. R, Catalizadores de cobre soportados sobre silicatos naturales y apilarados para la transformación de metanol a formiato de metilo e hidrocarburos, Tesis doctoral, Universidad Complutense de Madrid-España, 1994.
- TREYBAL R. E., Operaciones de Transferencia de Masa, Mc Graw Hill, México, 2º Edición, cap. 11, 1980.
- UNITEC C. & T., Tecnologías para el tratamiento de residuos Industriales. UNI, Cap 1 y 5. Marzo 1996.
- VACCARI, D., Modeling Hysteretic Adsorption /Desorption, Env. Sci. and Health, pag. 307 – 320, 1990.
- VIRARAGHAVAN T., Forty – fifth Purdue Industrial Waste Conference Proceedings, Chelsea, MI: Lewis Publishers, 1991.

## **XII. ANEXOS**

Tabla N° XII.1 Plantas Galvánicas por Distritos en la provincia de Lima

Distrito	Número de Plantas Galvánicas	%
Lima	284	20.2
Ancón	7	0.5
Ate-Vitarte	87	6.2
Barranco	13	0.9
Breña	41	2.9
Carabaylo	15	1.1
Chaclacayo	-	-
Chorrillos	31	2.2
Cieneguilla	1	0.1
Comas	62	4.4
El Agustino	18	1.3
Independencia	38	2.7
Jesús María	15	1.1
La Molina	11	0.8
La Victoria	106	7.5
Lince	20	1.4
Los Olivos	78	5.5
Lurigancho	2	0.1
Lurín	2	0.1
Magdalena Del Mar	3	0.2
Magdalena Vieja	5	0.3
Miraflores	36	2.6
Pachacamac	2	0.1
Pucusana	1	0.1
Puente Piedra	19	1.4
Punta Hermosa	-	-
Punta Negra	-	-
Rimac	32	2.3
San Bartolo	-	-
San Borja	8	0.6
San Isidro	19	1.4
San Juan de Lurigancho	91	6.5
San Juan de Miraflores	33	2.3
San Luis	38	2.7
San Martín de Porres	126	9
San Miguel	27	1.9
Santa Anita	18	1.3
Santa María del Mar	-	-
Santa Rosa	-	-
Santiago del Surco	30	2.1
Surquillo	34	2.4
Villa El Salvador	35	2.5
Villa María del Triunfo	18	1.3
Total	1406	100

Fuente: MITINCI - Octubre 1999

## XII.2 DATOS EXPERIMENTALES DEL EQUIPO BET

A continuación se muestran las tablas con los datos experimentales obtenidos del equipo BET que han sido introducidos a una hoja de cálculo permitiendo conocer la Superficie específica según la Ecuación de Brunauer - Emmett y Teller en el rango de presiones relativas de 0.05 a 0.35. La primera Tabla muestra la calibración del volumen muerto del equipo y las posteriores son las muestras de ensayo.

**Tabla N° XII.2.1 Calibración del Volumen Muerto**

n	To(°C)	Tf(°C)	Vo(ml)	Vf(ml)	Vac(ml)	Vac(C.N.)	Pe(mmHg)
1	25.0	25.0	5,450	3,050	2,400	2,199	19,5
2	25.0	25.0	7,850	0,200	10,050	9,207	109,0
3	25.0	25.0	6,780	3,840	12,990	11,904	159,5
4	25.0	25.0	7,500	4,490	16,000	14,658	193,0
5	25.0	25.0	7,600	0,000	23,600	21,620	301,0
6	25.0	25.0	6,780	1,700	28,680	26,274	367,5
7	25.0	25.0	7,730	3,420	32,990	30,222	421,5
8	25.0	25.0	6,100	4,610	34,480	31,587	455,0
11	25.0	25.0	6,400	5,050	35,830	32,824	510,0

### Regresión lineal

Pendiente: 0,0655

Intersección.: 1,8525

Coef. Regresión: 0,9973

$$V_{\text{muerto}} = 0,0655 Pe + 1,8525$$

**Tabla N° XII.2.2 Superficie específica de la Muestra B**

Peso = 0.1380 g

Psat = 900 mm Hg

VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	Vo (ml)	Vf (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	VM	Vac/g	Pe(mmHg)	Pe/Po	Pe/V (Po-Pe)
1	25.0	25.0	7.190	2.410	4.780	4.379	3.408	7.034	52.0	0.058	0.00872
2	25.0	25.0	7.440	3.810	8.410	7.704	6.358	9.758	97.0	0.108	0.01238
3	25.0	25.0	3.810	2.140	10.080	9.234	7.866	9.920	120.0	0.133	0.01551
4	25.0	25.0	6.830	4.150	12.760	11.690	10.160	11.087	155.0	0.172	0.01876
5	25.0	25.0	4.150	3.010	13.900	12.734	11.536	8.681	176.0	0.196	0.02800
6	25.0	25.0	7.300	4.670	16.530	15.143	13.601	11.178	207.5	0.231	0.02681
7	25.0	25.0	4.670	2.540	18.660	17.095	16.255	6.081	248.0	0.276	0.06255
8	25.0	25.0	7.160	2.700	23.120	21.180	20.319	6.241	310.0	0.344	0.08419

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.08920141

Intersepto = 0.00333652

Coef. Regres. = 0.99169613

Vmonocapa = 10.8063805

**S<sub>BET</sub> = 47.2 m<sup>2</sup>/g**

Tabla N° XII.2.3 Superficie específica de la BCI/1/100/1

Peso = 0.2505 g

Psat = 900 mm Hg

Pat = 754 mm Hg

VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	27	27	300.15	6.04	3.88	2.16	2.16	1.950178	0	0	0	7.785144	0
2	27.5	27.5	300.65	3.88	1.80	2.08	4.24	3.821762	1.5	0.001667	0.09825	14.86432	0.000112
3	27.5	27.5	300.65	5.01	3.32	1.69	5.93	5.345058	5	0.005556	0.32750	20.03017	0.000279
4	27.5	27.5	300.65	6.10	5.20	0.90	6.83	6.156281	11	0.012222	0.72050	21.69073	0.000570
5	27.5	27.5	300.65	5.20	0.63	4.57	11.40	10.275490	46	0.051111	3.01300	28.99198	0.001858
6	27.5	27.5	300.65	6.48	5.98	0.50	11.90	10.726170	60	0.066667	3.93000	27.13042	0.002633
7	27.5	27.5	300.65	5.98	4.75	1.23	13.13	11.834840	73	0.081111	4.78150	28.15706	0.003135
8	27.5	27.5	300.65	4.75	6.16	3.49	16.62	14.980580	105	0.116667	6.67750	32.34764	0.004083
9	27.5	27.5	300.65	6.16	5.47	0.69	17.31	15.602520	118	0.131111	7.72900	31.43123	0.004801
10	27.5	27.5	300.65	5.47	4.55	0.92	18.23	16.431770	130	0.144444	8.51500	31.60388	0.005342
11	27.5	27.5	300.65	4.55	6.75	1.87	20.10	18.117310	147	0.163333	9.62850	33.88748	0.005761
12	27	27	300.15	6.75	4.68	2.07	22.17	20.016420	169	0.187778	11.0695	35.71623	0.006473
13	27	27	300.15	4.68	6.64	3.54	25.71	23.212540	205	0.227778	13.4275	39.06204	0.007551
14	27	27	300.15	6.64	4.91	1.73	27.44	24.774490	227	0.252222	14.8685	39.54487	0.008529
15	27	27	300.15	4.91	7.19	1.87	29.31	26.462840	248	0.275556	16.2440	40.79377	0.009324
16	27	27	300.15	7.19	6.86	0.33	29.64	26.760780	257	0.285556	16.8335	39.62987	0.010086
17	27	27	300.15	6.86	4.87	1.99	31.63	28.557470	275	0.305556	18.0125	42.09571	0.010452
18	27	27	300.15	4.87	6.46	1.45	33.08	29.866620	293	0.325556	19.1915	42.61526	0.011327
19	27	27	300.15	6.46	4.74	1.72	34.80	31.419540	312	0.346667	20.4360	43.84648	0.012102
20	27	27	300.15	4.74	7.16	1.76	36.56	33.008580	331	0.367778	21.6805	45.22186	0.012864
21	27	27	300.15	7.16	4.98	2.18	38.74	34.976810	354	0.393333	23.1870	47.06512	0.013776
22	27	27	300.15	4.98	4.25	0.73	39.47	35.635900	365	0.405556	23.9075	46.81996	0.014572

Cálculo del Área BET

Pendiente = 0.033876

Intersepto = 0.000172

Coef. Regres. = 0.997891

Vmonocapa = 29.37044

$S_{BET} = 128.4 \text{ m}^2/\text{g}$

**Tabla N° XII.2.4 Superficie especifica de la Muestra BCI/1/100/1 - Cromo**

Peso = 0.2423 g

Psat = 900 mm Hg

Pat = 754 mm Hg

VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	24.5	24.5	297.65	6.67	3.82	2.85	2.85	2.594764	10	0.011111	0.655	8.005631	0.001404
2	25	25	298.15	6.18	4.62	1.36	4.21	3.62654	26	0.028889	1.703	8.764093	0.003394
3	25	25	298.15	7.56	2.84	4.72	8.93	8.116627	75	0.083333	4.9025	13.2338	0.006875
4	25	25	298.15	5	3.71	1.29	10.22	9.28913	100	0.111111	6.55	11.3047	1.11E-02
5	25	25	298.15	3.71	3.21	0.5	10.72	9.743588	110	0.122222	7.205	10.47705	0.01329
6	25	25	298.15	3.21	2.7	0.51	11.23	10.20714	117	0.13	7.6635	10.49788	0.014234
7	25	24.5	297.9	5.44	3.31	2.13	13.36	12.15332	135	0.15	8.8425	13.66413	0.012915
8	25	25	298.15	4.96	4.03	0.93	14.29	12.96842	152	0.168889	9.956	12.51515	0.016237
9	25	25	298.15	4.03	2.88	1.15	15.44	14.03368	167	0.185556	10.9385	12.77415	0.017835
10	25	25	298.15	4.54	2.9	1.64	17.08	15.5243	183	0.203333	11.9865	14.60091	0.01748
11	25	25	298.15	4.08	2.34	1.74	18.62	17.10581	204	0.226667	13.362	15.45115	0.01897
12	25	25	298.15	5.4	4.25	1.15	19.97	18.15107	219	0.243333	14.3445	15.71015	0.02047
13	25	25	298.15	4.25	3.37	0.88	20.85	18.95092	231	0.256667	15.1305	15.7673	0.021899
14	25	25	298.15	4.87	3.18	1.69	22.54	20.48699	249	0.276667	16.3095	17.24096	0.022185
15	25	25	298.15	4.26	3.6	0.66	23.2	21.08687	260	0.288889	17.03	16.74317	0.024264
16	25	25	298.15	5.22	3.5	1.72	24.92	22.65021	279	0.31	18.2745	18.05905	0.024878
17	25	25	298.15	4.84	3.26	1.58	26.5	24.0863	297	0.33	19.4535	19.12008	0.02576
18	25	25	298.15	4.82	3.09	1.73	28.23	25.65872	319	0.354444	20.8945	19.66249	0.027924
19	25	25	298.15	4.17	3.29	0.88	29.11	26.45857	329	0.365556	21.5495	20.26029	0.0028439

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.077804

Intersepto = 0.001032

Coef. Regres. = 0.995215

Vmonocapa = 12.68453

**S<sub>BET</sub> = 55.4 m<sup>2</sup>/g**



**Tabla N° XII.2.5 Superficie específica de la Muestra BCI/1/100/1 - Cobre ácido**

Peso = 0.2547 g

Psat = 900 mm Hg

Pat = 754 mm Hg

VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	28	28	301.15	6.61	2.63	3.98	3.98	3.581452	0	0	0	14.06145	0
2	28	28	301.15	6.88	4.85	2.03	6.01	5.408173	0.5	0.000556	0.03275	21.10492	2.63E-05
3	28	28	301.15	4.85	2.73	2.12	8.13	7.315881	4	0.004444	0.262	27.69486	0.000161
4	28	28	301.15	7.08	4.95	2.13	10.26	9.232588	10	0.011111	0.655	33.67722	0.000334
5	28	27.6	300.95	4.95	3.81	1.14	11.4	10.26525	19	0.021111	1.2445	35.41715	0.000609
6	27.6	28	300.95	3.81	2.8	1.01	12.41	11.17471	37	0.041111	2.4235	34.25891	0.001248
7	28	27.7	301	7.2	5.61	1.59	14	12.60435	51.5	0.057222	3.37325	36.24304	0.001675
8	28	28	301.15	5.61	4.29	1.32	15.32	13.78589	66.5	0.073889	4.35575	37.02451	0.002155
9	28	28	301.15	4.29	3.62	0.67	15.99	14.3888	74	0.082222	4.847	37.46289	0.002391
10	28	28	301.15	3.62	2.28	1.34	17.33	15.59461	96	0.106667	6.288	36.53952	0.003268
11	27.5	27.2	300.5	8.42	7.09	1.33	18.66	16.82775	104.5	0.116111	6.84475	39.19514	0.003352
12	27.2	27.5	300.5	7.09	5.81	1.28	19.94	17.98207	119	0.132222	7.7945	39.9883	0.003809
13	27.5	27.5	300.65	5.81	4.32	1.49	21.43	19.31612	138	0.153333	9.0039	40.34991	0.004488
14	27.8	27.8	300.95	4.32	2.47	1.85	23.28	20.96272	169.5	0.188333	11.10225	38.71405	0.005994
15	27.8	28	301.05	7.32	6.23	1.09	24.37	21.93693	178	0.197778	11.659	40.35308	0.00611
16	28	28	301.15	6.23	4.8	1.43	25.8	23.21645	196.5	0.218333	12.87075	40.61916	0.006877
17	28	28	301.15	4.8	3.71	1.09	26.89	24.1973	211	0.234444	13.8205	40.74126	0.007517
18	28	28	301.15	3.71	2.33	1.38	28.27	25.43911	232	0.257778	15.196	40.43028	0.008636
19	27.5	27.5	300.65	6.81	5.65	1.16	29.43	26.52699	240	0.266667	15.72	42.43028	0.00857
20	27.5	27.5	300.65	5.85	4.02	1.63	31.06	27.99621	262	0.291111	17.161	42.54106	0.009653
21	28	28	301.15	4.02	2.42	1.6	32.66	29.3895	288	0.32	18.864	41.32511	0.011387
22	28	28	301.15	7.56	5.75	1.81	34.47	31.01826	305	0.338889	19.9775	43.34808	0.011825
23	28	28	301.15	5.75	4.69	1.06	35.53	31.97211	317	0.352222	23.7635	44.00711	0.012356
24	28	28	301.15	4.89	3.54	1.15	36.68	33.00695	334	0.371111	21.877	43.69628	0.013504
25	28	28	301.15	3.54	2.44	1.1	37.78	33.9968	352	0.391111	23.056	42.95564	0.014953

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.034516

Intersepto = 0

Coef. Regres. = 0.993361

Vmonocapa = 29.23609

**S<sub>BET</sub> = 127.8 m<sup>2</sup>/g**

Tabla N° XII.2.6 Superficie específica de la Muestra BCI/1/100/1 - Cobre alcalino

Peso = 0.2499 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	26.5	26.5	299.65	6.36	5	1.36	1.36	1.229939	0	0	0	4.921725	0
2	26.5	26.5	299.65	5	2.97	2.03	3.39	3.065804	0	0	0	12.26812	0
3	26.5	26.5	299.65	5.88	5.82	0.06	3.45	3.120066	0	0	0	12.48526	0
4	26.5	26.5	299.65	5.82	3.3	2.52	5.97	5.399071	0	0	0	21.60492	0
5	26.5	26.5	299.65	7.25	6.55	0.7	6.67	6.032027	7.5	0.008333	0.49125	22.17238	0.000379
6	26.5	26.5	299.65	6.55	4.2	2.35	9.02	8.15739	12	0.013333	0.786	29.49736	0.000458
7	26.5	26.5	299.65	4.2	3.64	0.56	9.58	8.663835	16	0.017778	1.048	30.47553	0.000594
8	26.5	26.5	299.65	3.64	2.66	0.98	10.56	9.550115	27.5	0.030556	1.80125	31.00786	0.001016
9	26.5	26.5	299.65	7.17	6.05	1.12	11.68	10.56301	39	0.043333	2.5545	32.04684	0.001413
10	26.5	26.5	299.65	6.05	4.68	1.37	13.05	11.80199	56	0.062222	3.668	32.54897	0.002038
11	26.5	26.5	299.65	4.68	3.82	0.86	13.91	12.57974	67	0.074444	4.3885	32.77809	0.002454
12	26.5	26.5	299.65	3.82	2.21	1.61	15.52	14.03577	88.5	0.098333	5.79675	32.96929	0.003308
13	26.5	26.5	299.65	7.37	5.62	1.75	17.27	15.61042	106.5	0.118333	6.97575	34.5845	0.003881
14	26.5	26.5	299.65	5.62	4.36	1.26	18.53	16.75792	120	0.133333	7.86	35.60592	0.004321
15	26.5	26.5	299.65	4.36	3.54	0.82	19.35	17.4995	135	0.15	8.8425	34.64186	0.005094
16	26.5	26.5	299.65	3.54	2.47	1.07	20.42	18.46717	147	0.163333	9.6285	35.36884	0.00552
17	26	26	299.15	7.34	5.92	1.42	21.84	19.78439	162.5	0.180556	10.64375	36.57718	0.006024
18	26	26	299.15	5.92	4.74	1.18	23.02	20.85332	176.5	0.196111	11.56075	37.18517	0.00656
19	26	26	299.15	4.74	3.47	1.27	24.29	22.00379	194	0.215556	12.707	37.20204	0.007386
20	26	26	299.15	3.47	2.49	0.98	25.27	22.89155	210	0.233333	13.707	36.56082	0.008324
21	26	26	299.15	7.09	5.26	1.83	27.1	24.54931	227	0.252222	14.8685	38.73872	0.008707
22	26	26	299.15	5.26	4.07	1.19	28.29	25.6273	244	0.271111	15.982	38.59665	0.009637
23	26	26	299.15	4.07	2.52	1.55	29.84	27.03141	263	0.292222	17.2265	39.23535	0.010523
24	26	26	299.15	7.13	5.29	1.84	31.68	28.69823	282	0.313333	18.471	40.92529	0.01115

Cálculo del Área BET

Pendiente = 0.03524  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.998096  
 Vmonocapa = 28.45336  
**S<sub>BET</sub> = 124.4 m<sup>2</sup>/g**

Tabla N° XII.2.7 Superficie específica de la Muestra BCI/1/100/1 - Níquel

Peso = 0.2528 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	27.5	27.8	300.8	9.21	5.21	4	4	3.603638	0	0	0	14.2549	0
2	28	28	301.15	5.21	3.95	1.26	5.26	4.733276	0	0	0	18.7234	0
3	28	28	301.15	3.95	2.95	1	6.26	5.633038	2	0.002222	0.131	21.76479	0.000102
4	27.5	27.5	300.65	7.27	5.9	1.37	7.63	6.877368	3	0.003333	0.1965	26.42749	0.000127
5	27.5	27.5	300.65	5.9	4.48	1.42	9.05	8.157298	7	0.007778	0.04585	30.45411	0.000257
6	27.5	27.5	300.65	4.48	2.67	1.61	10.66	9.608486	19	0.021111	1.2445	33.08539	0.000652
7	27.5	27.5	300.65	6.28	4.79	1.49	12.15	10.95051	32	0.035556	2.096	35.02971	0.001052
8	27	27	300.15	4.79	2.98	1.81	13.96	12.60393	55	0.061111	3.6025	35.60693	0.001828
9	27	27	300.15	8.48	6.71	1.77	15.73	14.20099	66	0.073333	4.323	39.0783	0.002025
10	27	27	300.15	6.71	5.11	1.6	17.33	15.64657	86.5	0.096111	5.66575	39.4811	0.002693
11	27	27	300.15	5.11	3.98	1.13	18.46	16.6668	104	0.115556	6.812	38.98261	0.003352
12	27.8	27.8	300.95	3.98	2.85	1.13	19.59	17.64002	123	0.136687	3.0565	37.90949	0.004176
13	27.5	27.5	300.65	6.8	5.4	1.4	20.99	18.91952	134	0.148889	8.777	40.12074	0.00436
14	27	27	300.15	5.4	3.77	1.63	22.62	20.4227	161	0.178889	13.5455	39.07121	0.005576
15	27	27	300.15	3.77	2.2	1.57	24.19	21.84019	192	0.213333	12.576	36.64633	0.0074
16	27	27	300.15	6.62	4.8	1.82	26.01	23.4834	209	0.232222	13.6895	38.74169	0.007807
17	27	27	300.15	4.8	3.75	1.05	27.06	24.4314	221	0.245556	14.4755	39.38253	0.008265
18	27	27	300.15	3.75	1.77	1.98	29.04	26.21907	257	0.285556	16.8335	37.12645	0.010766
19	27	27	300.15	7.35	5.72	1.63	30.67	27.69073	267	0.296667	17.4885	40.35692	0.010452
20	27	27	300.15	5.72	3.99	1.73	32.4	29.25268	294	0.326667	19.257	39.53986	0.01227
21	27	27	300.15	3.99	2.3	1.69	34.09	30.77851	322	0.357778	21.091	38.32085	0.014538
22	27	27	300.15	6.2	4.6	1.6	35.69	32.22309	336	0.373333	22.008	40.40779	0.014743
23	27	27	300.15	4.6	3.17	1.43	37.12	33.51418	359	0.398889	23.5145	39.55589	0.016776

Cálculo del Área BET

Pendiente = 0.037592  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.984332  
 Vmonocapa = 29.90807  
**S<sub>BET</sub> = 117.6 m<sup>2</sup>/g**

Tabla N° XII.2.8 Superficie específica de la Muestra BCI/1/100/1 Cobre 15 - Níquel 30 - Cromo 5

Peso = 0.2531 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	25.5	26	298.90	7.40	5.54	1.86	1.86	1.685343	0	0	0	6.662755	0
2	26	26	299.15	5.54	3.24	2.3	4.16	3.766455	0	0	0	14.88919	0
3	26	26	299.15	6.59	5.05	1.54	5.7	5.163507	0	0	0	20.40106	0
4	26	26	299.15	5.05	3.34	1.71	7.41	6.71256	2	0.002222	0.131	26.00379	8.56E-05
5	25.5	26	298.90	7.45	6.03	1.42	8.83	8.005597	3	0.003333	0.1965	30.8538	0.000108
6	26	26	299.15	6.03	4.73	1.3	10.13	9.176549	23	0.025556	1.5065	30.30442	0.000885
7	26	26	299.15	4.73	3.31	1.42	11.55	10.4629	29	0.032222	1.8995	33.83404	0.000984
8	26	26	299.15	6.56	5.22	1.34	12.89	11.67677	38	0.042222	2.489	36.30096	0.001214
9	26	26	299.15	5.22	4.21	1.01	13.9	12.59171	53	0.058889	3.4715	36.03402	0.001737
10	26	26	299.15	4.21	3.41	0.8	14.7	13.31641	64	0.071111	4.192	36.05063	0.002124
11	26	26	299.15	7.38	3.14	4.24	18.94	17.15734	120	0.133333	7.86	36.73386	0.004188
12	26	26	299.15	6.54	5.55	0.99	19.93	18.05416	132	0.146667	8.646	37.1717	0.004624
13	26	26	299.15	5.55	4.71	0.84	20.77	18.8151	147	0.163333	9.6285	36.29631	0.005378
14	26	26	299.15	4.71	3.75	0.96	21.73	19.68474	158	0.175556	10.349	36.88558	0.005773
15	26	26	299.15	3.75	2.51	1.24	22.97	20.80803	172	0.191111	11.266	37.70063	0.006267
16	26	26	299.15	7.37	5.41	1.96	24.93	22.58355	189	0.21	12.3795	40.31628	0.006593
17	26	26	299.15	5.41	3.28	2.13	27.06	24.51307	221	0.245556	14.4755	39.65852	0.008207
18	26	26	299.15	6.57	4.78	1.79	28.85	26.13459	239	0.265556	15.6545	41.40693	0.008732
19	26	26	299.15	4.78	3.1	1.68	30.53	27.65647	262	0.291111	17.161	41.46768	0.009903
20	26	26	299.15	7.62	4.83	2.79	33.32	30.18387	292	0.324444	19.126	43.68973	0.010993
21	26	26	299.15	4.83	2.79	2.04	35.56	32.03086	323	0.358889	21.1565	42.96864	0.013028
22	26	26	299.15	2.79	2.11	0.68	36.04	32.64786	334	0.371111	21.877	42.55575	0.013867

Cálculo del Área BET

Pendiente = 0.034403  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.995921  
 Vmonocapa = 29.20837  
**S<sub>BET</sub> = 127.7 m<sup>2</sup>/g**

**Tabla N° XII.2.9 Superficie específica de la Muestra BPILC-AI/20/2**

Peso = 0.2393 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	25	25	298.4	6.05	1.17	4.88	4.88	4.431798	0	0	0	18.51984	0
2	25.5	25.5	298.65	6.47	5.29	1.18	6.06	5.498814	0	0	0	22.97875	0
3	25.5	25.5	298.65	7.14	1.39	5.75	11.81	10.71634	13	0.014444	0.8515	41.22372	0.000356
4	26	25	298.65	7.22	3.1	4.12	15.93	14.4548	43	0.047778	2.6165	48.63479	0.001032
5	25	25	298.15	7.8	3.76	4.04	19.97	18.15107	84	0.093333	5.502	52.85863	0.001947
6	25	25	298.15	3.76	2.7	1.06	21.03	19.11452	101	0.112222	6.6155	52.2316	0.00242
7	25	25	298.15	6.35	2.53	3.62	24.85	22.58658	158	0.175556	10.349	51.13909	0.004164
8	25.5	25.5	298.65	7	4	3	27.85	25.27095	182	0.202222	11.921	55.78752	0.004544
9	25	25	298.15	6.44	2.61	3.83	31.88	28.79449	240	0.266667	15.72	54.63638	0.006656
10	25	25	298.15	7.67	3.69	3.98	35.66	32.41197	294	0.326667	19.257	54.97273	0.008825
11	25	25	298.15	3.69	2.39	1.3	36.96	33.59357	312	0.346667	20.436	54.98356	0.00965
12	25	25.5	298.4	8.3	4.51	3.79	40.75	37.00733	363	0.403333	23.7765	55.26972	0.012326

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.024163  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.99384  
 Vmonocapa = 41.56151  
**S<sub>BET</sub> = 181.7 m<sup>2</sup>/g**

**Tabla N° XII.2.10 Superficie específica de la Muestra BPILC-AI/20/2 - Níquel**

Peso = 0.1396 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	28	28	301.15	8.07	4.8	3.27	3.27	2.94255	5.5	0.006111	0.36025	18.49785	0.000332
2	28	28	301.15	4.8	2.27	2.53	5.8	5.219202	6.2	0.006889	0.4061	34.47781	0.000201
3	28.5	28.5	301.15	6.11	5.18	0.93	6.73	6.046036	20	0.022322	1.31	33.92576	0.00067
4	28.3	28.3	301.15	5.18	4.12	1.06	7.79	7.002952	41.5	0.046111	2.71825	30.69271	0.001575
5	28	28	301.15	4.12	2.94	1.18	8.97	8.071765	60	0.066667	3.93	29.66881	0.002408
6	28	28	301.15	6.94	5.71	1.23	10.2	9.178596	76	0.084444	4.978	30.09023	0.003065
7	28	28	301.15	5.71	4.03	1.68	11.88	10.69036	100	0.111111	6.55	29.65877	0.004215
8	28	28	301.15	4.03	2.94	1.09	12.97	11.67121	117.5	0.130556	7.69625	28.47396	0.005274
9	28	28	301.15	6.77	5.03	1.74	14.71	13.23698	138.5	0.153889	9.07175	29.83686	0.006096
10	28	28	301.15	5.03	0.89	4.14	18.85	16.96241	194	0.215556	12.707	30.48285	0.009014
11	28	28	301.15	7.43	5.16	2.27	21.12	19.00509	224	0.248889	14.672	31.03935	0.010676
12	28	28	301.15	5.16	3.09	2.07	23.19	20.86781	252	0.28	16.506	31.24505	0.012446
13	28	28	301.15	7.07	4.96	2.11	25.3	22.76652	277	0.307778	18.1435	33.11617	0.013426
14	28	28	301.15	4.96	2.57	2.39	27.69	24.91719	307	0.341111	20.1085	34.4462	0.015029
15	28	28	301.15	7.63	5.09	2.54	30.23	27.20284	337	0.374444	22.0735	36.74312	0.016291
16	28	28	301.15	5.09	3.6	1.49	31.72	28.54363	356	0.395556	23.318	37.43291	0.017482

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.044748  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.997349  
 Vmonocapa = 22.56414  
**S<sub>BET</sub> = 98.6 m<sup>2</sup>/g**

**Tabla N° XII.2.11 Superficie específica de la Muestra BPILC-AI/20/2 - Zinc**

Peso = 0.2333 g      Pat = 754 mm Hg  
 Psat = 900 mm Hg      VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va(Po-Pe)
1	28	28	301.15	6.45	2.9	3.55	3.55	3.194511	0	0	0	13.69272	0
2	27	27	300.15	5.33	4.73	0.6	4.15	3.746871	0	0	0	16.06031	0
3	27	27	300.15	4.73	3.64	1.09	5.24	4.730989	0	0	0	20.27856	0
4	27	27	300.15	6.71	5.45	1.26	6.5	5.868593	0	0	0	25.15471	0
5	27	27	300.15	5.45	3.87	1.58	8.08	7.295112	1	0.001111	3.0655	30.98848	3.59E-05
6	27	27	300.15	3.87	2.54	1.33	9.41	8.495916	1.5	0.001667	0.09825	35.99514	4.64E-05
7	27	27	300.15	6.58	5.11	1.47	10.88	9.823121	2	0.002322	0.131	41.5436	5.36E-05
8	27	27	300.15	5.11	2.92	2.19	13.07	11.80039	8	0.008889	0.524	48.33427	0.000186
9	27	27	300.15	6.69	5.04	1.65	14.72	13.29011	18	0.02	1.179	51.91215	0.000393
10	27	27	300.15	5.04	3.7	1.34	16.06	14.49994	33	0.036667	2.1615	52.88658	0.00072
11	27	26.5	299.9	3.7	2.72	0.98	17.04	15.39757	47	0.052222	3.0785	52.80386	0.001043
12	26.5	27	299.9	7.62	6.28	1.34	18.38	16.60841	55	0.061111	3.6025	55.74757	0.001168
13	27	27	300.15	6.28	4.84	1.44	19.82	17.89469	78	0.086667	5.109	54.80386	0.001731
14	27	27	300.15	4.84	3.8	1.04	20.86	18.83367	93	0.103333	6.0915	54.61709	0.00211
15	27	27	300.15	3.8	2.41	1.39	22.25	20.08864	12	0.124444	7.336	54.662	0.0026
16	27	27	300.15	7.28	5.8	1.48	23.73	21.42488	23	0.136667	8.0585	57.30123	0.002763
17	27	27	300.15	5.8	4.55	1.25	24.98	22.55345	41	0.156667	9.2355	57.0851	0.003254
18	27	27	300.15	4.55	3.43	1.12	26.1	23.56466	59	0.176667	10.4145	56.36587	0.003807
19	27	27	300.15	3.43	2.35	1.08	27.18	24.53975	76	0.195556	11.528	55.77259	0.004359
20	27	27	300.15	6.97	5.14	1.83	29.01	26.27954	93	0.214444	12.6415	58.45707	0.00467
21	27	27	300.15	5.14	3.5	1.64	30.65	27.76518	218	0.242222	14.279	57.80615	0.00553
22	26.5	26.5	300.15	3.5	2.56	0.94	31.59	28.56895	232	0.257778	15.196	57.32084	0.006059
23	26.5	27	299.9	6.93	5.32	1.61	33.2	29.99995	246	0.273333	16.113	59.52402	0.006319
24	27	27	300.15	5.32	3.6	1.72	34.92	31.52789	274	0.304444	17.947	58.21211	0.007519
25	27	27	300.15	3.6	2.46	1.14	36.06	32.55715	293	0.325556	19.1915	57.28953	0.008426
26	26.5	26.5	299.65	8.11	5.81	2.3	38.36	34.69152	312	0.346667	20.436	61.1038	0.008684
27	26.5	26.5	299.65	5.81	3.66	2.15	40.51	36.6359	330	0.366667	21.615	64.3845	0.008992
28	26.5	26.5	299.65	3.66	3.5	0.16	40.67	36.7806	348	0.386667	22.794	59.95115	0.010516
29	26.5	26.5	299.65	3.5	2.5	1	41.67	37.68497	386	0.406667	23.973	58.77398	0.011662

Cálculo del Area BET

Pendiente = 0.024317  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.991206  
 Vmonocapa = 41.42514  
**S<sub>BET</sub> = 181.1 m<sup>2</sup>/g**



Tabla N° XII.2.12 Superficie específica de la Muestra BPILC-AI/20/2 - Cromo

Peso = 0.2462 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	26.5	26.5	299.65	7.4	3.1	4.3	4.3	3.888778	0	0	0	15.7952	0
2	27	27	300.15	6.62	5.06	1.56	5.86	5.290762	0	0	0	21.48969	0
3	27	27	300.15	5.06	3.55	1.51	7.37	6.654081	0	0	0	27.02714	0
4	27	27	300.15	7.9	5.58	2.32	9.69	8.748717	0	0	0	35.535	0
5	27.5	27.5	300.15	5.58	3.63	1.95	11.64	10.49182	1.5	0.001667	0.09825	42.21595	3.95E-05
6	27	27	300.15	7.58	5.05	2.53	14.17	12.79353	7	0.007778	0.4585	50.10167	0.000156
7	27	27	300.15	5.05	3.7	1.35	15.52	14.01239	16	0.017778	1.048	52.65798	0.000344
8	27	27	300.15	3.7	2.03	1.67	17.19	15.52017	37	0.041111	2.4235	53.19525	0.000806
9	27.2	27.2	300.35	7.62	5.65	1.97	19.16	17.26729	52	0.057778	3.406	56.38215	0.001088
10	27	27	300.15	5.65	4.26	1.39	20.55	18.55378	71	0.078889	4.6505	56.47149	0.001517
11	27	27	300.15	4.26	3.13	1.13	21.68	19.57401	84	0.093333	5.502	57.15684	0.001801
12	27	27	300.15	7.27	5.44	1.83	23.51	21.22625	104	0.115556	6.812	58.54691	0.002322
13	26.9	26.9	300.05	5.44	4.3	1.14	24.65	22.26293	122	0.135556	7.991	57.96883	0.002705
14	26.9	26.9	300.05	4.3	2.63	1.47	26.12	23.59057	146	0.162222	9.563	56.97633	0.003398
15	26.6	26.6	299.95	7.03	5.17	1.86	27.98	25.27888	164	0.182222	10.742	59.045	0.003774
16	26.8	26.8	299.75	5.17	4.3	0.87	28.85	26.06228	176	0.195556	11.526	59.11589	0.004112
17	26.6	26.6	299.65	4.3	2.8	1.5	30.35	27.44754	200	0.222222	13.1	58.27594	0.004903
18	26.5	26.5	299.65	7.39	5.41	1.98	32.33	29.23818	219.5	0.243889	14.37725	60.36122	0.005344
19	26.5	26.5	299.65	5.41	3.64	1.77	34.1	30.83891	246.5	0.273889	16.14575	59.67978	0.00632
20	26.5	26.5	299.65	3.64	2.15	1.49	35.59	32.18642	271	0.301111	17.7505	58.63493	0.007348
21	26.7	26.7	299.65	7.2	5.21	1.99	37.58	33.96344	288	0.32	18.864	61.32998	0.007673
22	26.5	26.5	299.65	5.21	4.05	1.16	38.74	35.96344	306	0.34	20.043	60.89429	0.00846
23	26.5	26.5	299.65	4.05	2.45	1.6	40.34	36.48216	332	0.368889	21.746	59.85444	0.009765
24	26.5	26.5	299.65	5.55	3.64	1.91	42.25	38.2095	355	0.394444	23.2525	60.75143	0.010722

Cálculo del Área BET

Pendiente = 0.024585  
 Intersepto = 0  
 Coef. Regres. = 0.98758  
 Vmonocapa = 41.10373  
 $S_{BET} = 179.7 \text{ m}^2/\text{g}$



Tabla N° XII.2.13 Superficie específica de la Muestra BPILC-AI/20/2 - Cobre Ácido

Peso = 0.2495 g

Psat = 900 mm Hg

Pat = 754 mm Hg

VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	27.5	27.5	300.65	6.84	3.85	2.99	2.99	2.695063	0	0	0	10.80186	0
2	28	28	301.15	3.85	2.15	1.7	4.69	4.220355	0	0	0	16.91525	0
3	27.5	27.5	300.65	7.35	5.22	2.13	6.82	6.147268	0	0	0	24.63835	0
4	27.5	27.5	300.65	5.22	3.75	1.47	8.29	7.472265	0	0	0	29.94896	0
5	27.5	27.5	300.65	3.75	2.27	1.48	9.77	8.806276	0.8	0.000889	0.0524	35.08568	2.54E-05
6	27.2	27.2	300.35	7.02	5.44	1.58	11.35	10.24064	1	0.001111	0.0655	40.78213	2.73E-05
7	27	27	300.15	5.44	0.5	4.94	16.29	14.7076	37	0.041111	2.4235	49.23485	0.000871
8	27.2	27.2	300.35	6.86	4.94	1.92	18.21	16.43014	45	0.05	2.9475	54.03864	0.000974
9	27	27	300.15	4.94	2.87	2.07	20.28	18.31001	76	0.084444	4.0978	53.43491	0.001726
10	27.5	27.5	300.65	7.42	5.85	1.57	21.85	19.69469	90	0.1	5.895	55.30939	0.002009
11	27.2	27.2	300.35	5.85	4.7	1.15	23	20.75196	107	0.118889	7.0085	55.06402	0.00245
12	27.8	27.8	300.95	4.7	3.45	1.25	24.25	21.83616	131	0.145556	8.5805	53.12892	0.003206
13	27	27	300.15	6.59	5.06	1.53	25.78	23.27574	145	0.161111	9.4975	55.22341	0.003478
14	27.5	27.5	300.65	5.06	3.66	1.4	27.18	24.49893	167	0.185556	10.9385	54.35044	0.004192
15	27	27	300.15	3.66	2.35	1.31	28.49	25.72249	188	0.208889	12.314	53.74146	0.004913
16	27	27	300.15	7.38	5.67	1.71	30.2	27.26638	204	0.226667	13.362	55.729	0.005259
17	27	27	300.15	5.67	4.6	1.07	31.27	28.23245	215	0.238889	14.0825	56.71321	0.005534
18	27.5	27.5	300.65	4.6	2.36	2.24	33.51	30.20454	253	0.281111	16.5715	54.64143	0.007156
19	27.9	27.9	301.05	7.17	5.32	1.85	35.36	31.6297	269	0.298889	17.6195	56.95472	0.007485
20	27.5	27.5	300.65	5.32	4.06	1.26	36.62	33.00776	291	0.323333	19.0605	55.90085	0.008548
21	27.5	27.5	300.65	4.06	2.29	1.77	38.39	34.60317	318	0.353333	20.829	55.20709	0.009897

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.025952

Intersepto = 0

Coef. Regres. = 0.98653

Vmonocapa = 38.9203

S<sub>BET</sub> = 170.1 m<sup>2</sup>/g

Tabla N° XII.2.14 Superficie específica de la Muestra BPILC-AI/20/2 Cobre 15 - Níquel 30 - Cromo 5

Peso = 0.2551 g  
 Psat = 900 mm Hg  
 Pat = 754 mm Hg  
 VM = 0.0655 \* Pe

n	To (°C)	Tf (°C)	T(K)	Vo (ml)	Vf (ml)	DV (ml)	Vac (ml)	Vac (CN)	Pe (mmHg)	Pe/Psat	VM	Va (ml/g)	Pe/Va (Po-Pe)
1	27.5	27	300.4	7.77	2.97	4.8	4.8	4.330123	0	0	0	16.97422	0
2	27	27	300.15	7.26	3.78	3.48	8.28	7.475684	3	0.0033333	0.1965	28.53463	0.000117
3	26.5	27	299.9	6.9	5.62	1.28	9.56	8.638541	12	0.0133333	0.786	30.78221	0.000439
4	27	27	300.15	5.62	4.38	1.24	10.8	9.750892	26	0.026889	1.703	31.54799	0.000943
5	27	27	300.15	4.38	2.7	1.68	12.48	11.2677	50	0.055556	3.275	31.33163	0.001877
6	27	27	300.15	6.8	5.24	1.56	14.04	12.67616	60	0.066667	3.93	34.28522	0.002083
7	27	27	300.15	5.24	3.93	1.31	15.35	13.85091	73	0.081111	4.7815	35.58372	0.002481
8	27	27	300.15	3.93	2.65	1.28	16.63	15.01457	94	0.104444	6.157	34.72195	0.003359
9	27	27	300.15	7.75	5.28	2.47	19.1	17.24463	117	0.13	7.6635	37.55835	0.003978
10	27	27	300.15	5.28	3.89	1.39	20.49	18.49961	140	0.155556	9.17	36.57236	0.005037
11	27	27	300.15	3.89	2.39	1.5	21.99	19.8539	165	0.1833333	10.8075	35.46217	0.00633
12	26.5	26.5	299.65	6.87	5.61	1.26	23.25	21.02653	170.5	0.189444	11.1678	38.64673	0.006048
13	26.5	26.5	299.65	5.51	4.32	1.29	24.54	22.19316	190	0.211111	12.445	38.21311	0.007003
14	26.5	26.5	299.65	4.32	1.56	2.76	27.3	24.68922	239	0.265556	15.6545	35.41638	0.010209
15	26	26	299.15	8.35	6.19	2.16	29.46	26.68718	252	0.28	16.506	39.91055	0.009744
16	26	26	299.15	6.19	4.85	1.34	30.8	27.90106	272	0.302222	17.816	39.53374	0.010956
17	25.5	25.5	298.65	4.85	3.57	1.28	32.08	29.10924	284.5	0.316111	18.6348	41.06031	0.011257
18	25.5	25.5	298.65	3.57	2.25	1.32	33.4	30.307	306	0.34	20.043	40.23519	0.012804
19	25.5	25.5	298.65	7.5	5.16	2.34	35.74	32.4303	323	0.358889	21.1585	44.19366	0.012667
20	25.5	25.5	298.65	5.16	3.7	1.46	37.2	33.7551	345	0.3833333	22.5075	43.73814	0.014212
21	25.5	25.5	298.65	3.7	2.67	1.03	38.23	34.68972	359	0.399889	23.5145	43.80719	0.015148

**Cálculo del Área BET**

Pendiente = 0.036351

Intersepto = 0

Coef. Regres. = 0.993762

Vmonocapa = 27.73261

**S<sub>BET</sub> = 121.2 m<sup>2</sup>/g**

### XII.3 ESPACIADO BASAL DE COMPUESTOS SEGÚN FICHAS ASTM

En las siguientes tablas se muestran las señales de espaciado basal  $d_{001}$  y otros picos, correspondientes a fichas ASTM encontrados en la literatura para el análisis de los Difractogramas de rayos X.

**Tabla N° XII.3.1 Espaciado basal de la muestra B**

Compuesto	d(A°)	I/I <sub>0</sub>	Ficha ASTM
MONTMORILLONITA BASICA	14	100	3 - 0016
$Al_2O_3 \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O \cdot nH_2O$	5	20	
	4.41	100	
	4.26	10	
	3.09	60	
	2.8	30	
	2.51	80	
	2.33	30	
	1.98	20	
	1.83	20	
	1.65	60	
	1.49	80	
	1.28	30	
	1.24	30	
	1.11	5	

**Tabla N° XII.3.2 Espaciado basal de la muestra BCI / 1 / 100 / i con  
Cobre Ácido**

Compuesto	d(A°)	l/lo	Ficha ASTM
SULFATO DE COBRE HIDRATADO $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	2.47	85	21 - 269
OXIDO DE COBRE $\text{Cu}_2\text{O}$	2.47	100	5 - 667
SULFATO DE COBRE: SODIO $\text{Na}_2 \text{Cu} (\text{SO}_4)_2$	2.83	100	20 - 1100
OXIDO DE COBRE $6\text{CuO} \cdot \text{Cu}_2\text{O}$	2.47 1.24	40 40	3 - 879
OXIDO DE COBRE: CALCIO $\text{Ca}_2 \text{CuO}_3$	2.52	75	19 - 218
SILICIURO DE COBRE c - $\text{Cu}_5 \text{Si}$	2.55	40	4 - 841
SILICATO DE COBRE HIDRATADO $\text{Cu}_6 \text{Si}_5 \text{O}_{16} \cdot 1.5 - 2 \text{H}_2\text{O}$	4.44 3.33	100 70	13 - 501

**Tabla N° XII.3.3 Espaciado basal de la muestra BPILC - Al / 20 / 2 con Níquel.**

Compuesto	d(A°)	l/lo	Ficha ASTM
SULFATO DE NÍQUEL $\text{NiSO}_4$	2.56	100	13 - 435
SULFATO DE NÍQUEL HIDRATADO $\text{Ni SO}_4 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	3.31 4.42	100 80	20 - 792
CLORURO DE NÍQUEL $\text{Ni Cl}_2$	2.48	100	22 - 765
NÍQUEL: ÓXIDO DE ALUMINIO $\text{Ni Al}_2 \text{O}_4$	2.03	65	10 - 339
NÍQUEL: ALUMINIO $(\text{Al}_3 \text{Ni}_2) \underline{5\text{H}}$	2.03	65	14 - 648
NÍQUEL: ALUMINIO $(\text{Al Ni}_3) \underline{4\text{H}}$	2.07 1.27	100 60	9 - 971
SULFATO DE NÍQUEL: SODIO a - $\text{Na}_2 \text{Ni} (\text{SO}_4)_2$	2.56 2.84	100 100	20 - 1136
SULFATO DE NÍQUEL: SODIO b - $\text{Na}_2 \text{Ni} (\text{SO}_4)_3$	2.57 2.84	90 80	20 - 1135

**Tabla N° XII.3.4 Espaciado basal de la muestra BPILC-Al/20/2 con Zn.**

Compuesto	d(A°)	l/lo	ficha
OXIDO DE ZINC $\text{ZnO}$	1.48	60	21 - 1486
	1.91	50	"
	1.68	50	"
	2.47	100	5 - 664
	2.82	71	"
	2.60	56	"
OXIDO DE ZINC HIDRATADO: SODIO $\text{Na}_4 \text{ZnO}_3 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	2.57 4.42 1.69	100 85 70	2 - 1013

## XII.4 CURVAS DE CALIBRACIÓN DEL CROMO, COBRE, NÍQUEL Y ZINC PARA ANÁLISIS POR ESPECTROSCOPIA ULTRAVIOLETA.

Las curvas de calibración fueron preparadas para tener una base de comparación y determinar las concentraciones desconocidas de cromo, cobre, níquel y zinc en los efluentes galvánicos. Para evitar errores en las mediciones espectrofotométricas se debe tener cuidado al trabajar con las portamuestras (celdas), deben estar limpias, evitando dejar huellas digitales que puedan absorber radiación ultravioleta. La posición de las celdas en el haz debe ser reproducible y las burbujas de gas no deben estar presentes en la trayectoria óptica. Se utilizó celdas de cuarzo para la determinación de cobre y zinc debido a que el solvente era cloroformo.

### a) Curva de Calibración del Cromo

El cromo hexavalente se determina colorimétricamente por una reacción con difenilcarbazida en solución ácida produciéndose una coloración rojo violeta.

#### **Reactivos:**

- Solución estándar de cromo (0.10% w/v): 0.5 ml en 100 ml de agua destilada (1 ml = 5  $\mu$ g).
- Solución de difenilcarbazida: 0.25 g disueltos en 50 ml de acetona.
- Acido Sulfúrico: H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.2 N

**Procedimiento:**

En vasos de precipitados se llevan volúmenes de la solución estándar de cromo entre 2 y 20 ml para obtener patrones de 10 a 100  $\mu\text{g}$  de cromo. Cada muestra se diluye con agua destilada hasta 100ml y se ajusta el pH de la solución a 1.5. Se añade 2 ml de solución de difenilcarbazida, se mezcla y se deja reposar 10 minutos para el total desarrollo del color. Se pasa una porción apropiada a una celda de absorción de 1 cm y se mide la absorbancia en el espectrofotómetro UV a una longitud de onda de 550 nm. Se prepara un blanco tratado con el mismo método usando agua destilada como referencia.

El cromo tiende a fijarse en las paredes, por lo que es necesario lavar el material de vidrio con ácido nítrico o clorhídrico antes de realizar el análisis.

**b) Curva de Calibración del Cobre**

El dietilditiocarbamato sódico reacciona con los iones cobre (II) dando a la solución una coloración amarilla que se extrae con cloroformo.

**Reactivos:**

- Solución de cobre: se disuelve 1 g de cobre pulverizado en 3 ml de ácido nítrico al 65% y 3 ml de agua. Después se añade 1 ml de ácido sulfúrico 95 - 97%. Se evapora la solución a sequedad y se lleva a un volumen de 1000 ml con agua destilada en una fiola aforada.

1 ml = 1 mg de  $\text{Cu}^{+2}$ .

- Solución de dietilditiocarbamato sódico: 1 g en 100 ml de agua.
- Solución de ácido cítrico: 20 g en 80 ml de agua.
- Solución de ácido sulfúrico: 100 ml de ácido sulfúrico al 95 - 97% en 300 ml de agua.
- Solución de cloruro de amonio: 20 g en 80 ml de agua.
- Cloroformo.

**Procedimiento:**

Se llevan volúmenes de solución de cobre a peras de decantación y se completan con agua desionizada hasta 100 ml. Se añade 1ml de solución de ácido cítrico, 0.5ml de ácido sulfúrico, 0.5ml de cloruro de amonio, 10ml de cloroformo y se agita uniformemente durante 5 minutos. El extracto de cloroformo se decanta y se descarta.

A la fase acuosa se le agrega 2 ml de solución de dietilditiocarbamato sódico y 25 ml de cloroformo. Se agita durante 10 minutos.

La fase orgánica coloreada se mide en el espectrofotómetro frente a una muestra en blanco de la misma manera.



**Tabla N° XII.4.1 Soluciones patrón de Cromo**

Std #	Conc(ppm)	Absorbancia
1	1.00	0.199
2	0.80	0.157
3	0.60	0.114
4	0.40	0.073
5	0.30	0.051
6	0.10	0.005

Wavelength : 550nm

Slit Width : 3.0

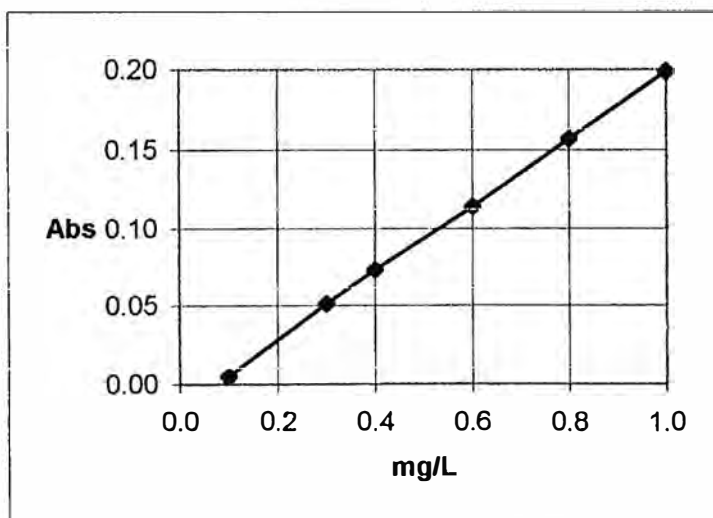
### Multi - Point Working Curve

$$\text{Conc} = K_1 A + K_0$$

$$K_1 = 4.688$$

$$K_0 = 0.0629$$

$$r = 0.9998$$



**Figura N° XII.4.1 Curva de Calibración del Cr**

Tabla N° XII.4.2 Soluciones patrón de Cu

Std #	Conc(ppm)	Absorbancia
1	0.00	0.000
2	0.40	0.080
3	0.80	0.141
4	1.20	0.207
5	1.60	0.261

Wavelength : 436nm

Slit Width : 2.0

#### Multi - Point Working Curve

$$\text{Conc} = K_1A + K_0$$

$$K_1 = 6.012$$

$$K_0 = -0.0467$$

$$r = 0.9978$$

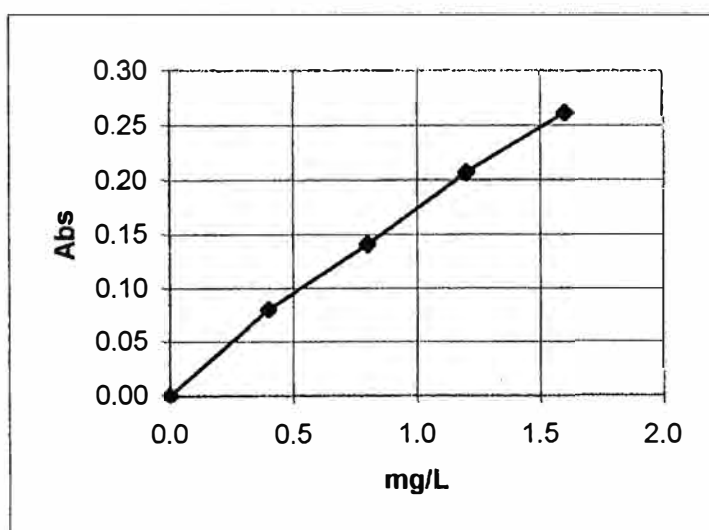


Figura N° XII.4.2 Curva de Calibración del Cu

### c) Curva de Calibración del Níquel

La dimetilglioxima forma con algunos iones metálicos (Ni, Pd(II), Pt(II), Pb y Bi) complejos coloreados débilmente solubles en agua.

En la presencia de un agente oxidante el níquel forma en solución alcalina un complejo rojo oscuro que resulta apropiado para su determinación.

#### **Reactivos:**

- Solución patrón de sulfato de Níquel  $\text{NiSO}_4$ : 0.45 g en 1 litro de agua destilada (1 ml = 100  $\mu\text{g}$ ).
- Dimetilglioxima: 0.5 g en 50 ml de alcohol etílico.
- Ácido clorhídrico HCl 1N
- Agua de bromo
- Alcohol etílico  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  95%
- Hidróxido de amonio ( $\text{NH}_4\text{OH}$ ) concentrado

#### **Procedimiento:**

Se llevan volúmenes de solución patrón de sulfato de níquel a fioas de 50 ml empleando una serie de 50 a 250  $\mu\text{g}$  de níquel.

Se añade a cada muestra 12.5 ml de HCl 1N y 2.5 ml de agua de bromo. Se deja enfriar y se agrega 5 ml de  $\text{NH}_4\text{OH}$  concentrado.

Luego se añade 10 ml de dimetilglioxima y 10 ml de alcohol etílico, se diluye con agua destilada hasta 50 ml, se mezcla y se deja reposar 10 minutos. Se mide la absorción en el espectrofotómetro a 444nm empleando un blanco como referencia.

**Tabla N° XII.4.3 Soluciones patrón de Ni**

Std #	Conc(ppm)	Abs
1	5.0	0.737
2	3.4	0.471
3	2.2	0.301
4	1.0	0.127

Wavelength : 444nm

Slit Width : 3.0

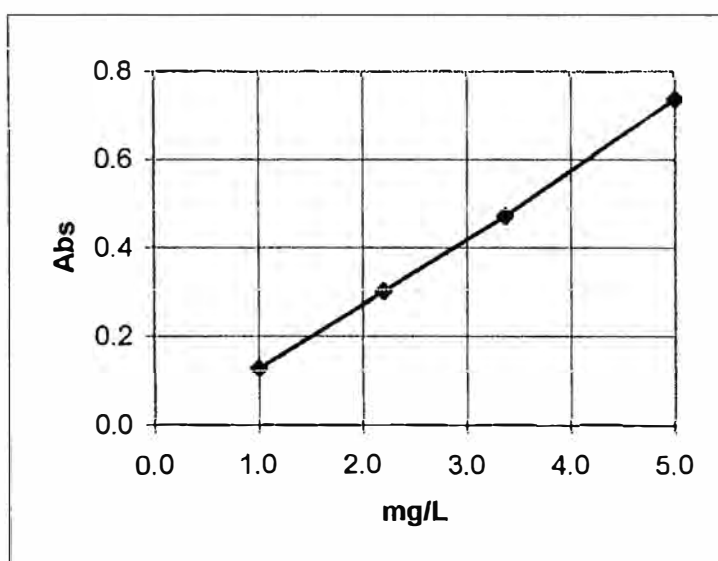
**Multi - Point Working Curve**

$$\text{Conc} = K_1A + K_0$$

$$K_1 = 6.567$$

$$K_0 = 0.283$$

$$r = 0.9995$$



**Figura N° XII.4.3 Curva de Calibración del Ni**

**d) Curva de calibración del Zinc**

La ditizona forma compuestos de coordinación coloreados con cerca de veinte metales, estos ditizonatos se pueden extraer con disolventes orgánicos tal como el tetracloruro de carbono ( $\text{CCl}_4$ ).

Se recomienda un pH entre 4 y 5.5 y adición de tiosulfato sódico para evitar las interferencias con el bismuto, cadmio, cobalto, cobre, oro, plomo, mercurio, níquel, paladio, plata y estaño estagnoso en pequeñas cantidades.

**Reactivos:**

- Solución de zinc: 1 ml = 1  $\mu\text{g}$  Zn.
- Solución de acetato sódico 2M: 6.8 g de  $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  en 25 ml de agua.
- Solución de ácido acético 1+7.
- Solución tampón de acetato: mezclar volúmenes iguales de solución de acetato sódico 2M y ácido acético 1+7.
- Solución de tiosulfato de sodio: 25 g de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  en 100 ml de agua
- Solución de ditizona: 0.04  $\mu\text{g}$  en 100 ml de cloroformo.

**Procedimiento:**

Se llevar volúmenes de solución de zinc a una serie de embudos de separación de 125 ml para obtener patrones comprendidos entre 0, 1, 2, 3 y 5  $\mu\text{g}$  de zinc respectivamente. Se lleva cada volumen hasta 10 ml por adición de agua. Se añade a cada embudo 5 ml de solución tampón de

acetato y 1 ml de tiosulfato de sodio y se mezcla. El pH de la solución debe estar entre 4 y 5.5. Luego se añade a cada muestra 10 ml de solución de ditizona y se agita vigorosamente durante 4 min. Se deja separar las capas y la fase orgánica coloreada se mide en el espectrofotómetro.

**Tabla N° XII.4.4 Soluciones patrón de Zn**

Std #	Conc(ppm)	Absorbancia
1	0.40	0.957
2	0.30	0.704
3	0.20	0.453
4	0.10	0.223

Wavelength : 528nm

Slit Width : 2.0

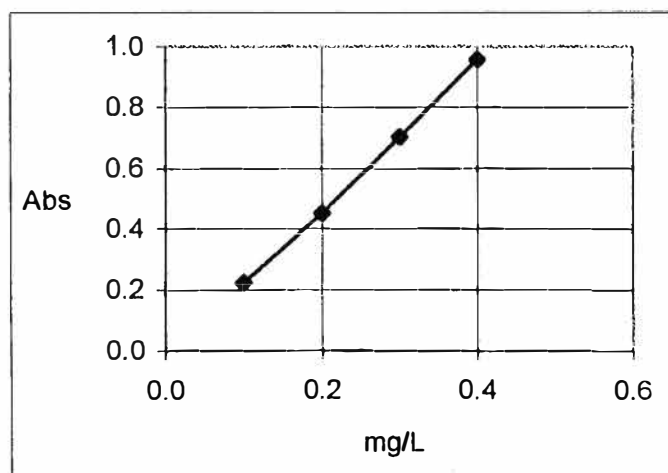
**Multi - Point Working Curve**

$$\text{Conc} = K_1 A + K_0$$

$$K_1 = 0.407$$

$$K_0 = 0.0118$$

$$r = 0.9998$$



**Figura N° XII.4.4 Curva de Calibración del Zn**

## **XII.5 ELIMINACIÓN DE INTERFERENCIAS PARA LA DETERMINACIÓN DE CIANUROS Y Cr (VI)**

### Eliminación de cianuros

En caso de detectar la presencia de iones níquel en el efluente cianurado se debe utilizar un 20 % de exceso de hipoclorito en la clorinación alcalina para asegurar la destrucción total de los cianuros.

### Análisis de cianuros

Las interferencias más comunes en el análisis incluyen sulfuros, ácidos grasos, agentes oxidantes y otros compuestos orgánicos. El sulfuro se elimina por tratamiento de la muestra a pH 11 con pequeñas porciones de carbonato de plomo pulverizado. Los ácidos grasos pueden ser eliminados acidulando la muestra con ácido acético a un pH de 6 –7 y extraerse con cloroformo; por lo general, es suficiente una extracción con un volumen de disolvente igual al 20 % del volumen de la muestra, para disminuir los ácidos grasos a un punto inferior a su nivel de interferencia. No se debe realizar extracciones múltiples o un prolongado periodo de contacto a pH bajo, para mantener al mínimo las pérdidas del cianuro

Los agentes oxidantes se eliminan titulando la muestra con sulfito de sodio anhidro (12,6 g/L), haciendo la prueba con papel almidón – yoduro hasta que de negativa (Se coloca una gota sobre el papel almidón – yoduro, si decolora, se agregan cristales de tiosulfato, Se repite este proceso hasta que no se decolore).

### Análisis de cromo

En el análisis de cromo, la presencia de hierro a concentraciones superiores a 1 mg/L, puede producir un color amarillo, pero el color del ión férrico Fe (III) no es fuerte y normalmente no se encuentra dificultad si se mide la absorbancia fotométricamente a la longitud de onda apropiada. Si las cantidades de hierro y cobre interfieren en la determinación de cromo, éstas pueden eliminarse por extracción de los cupferratos de estos metales con cloroformo (AWWA, 1980).



## **XII.6 CÁLCULOS PARA EL DISEÑO Y COSTO DE EQUIPOS**

### **XII.6.1 NOMENCLATURA:**

b = bentonita

AA = Arcilla termoactivada

AAp = Arcilla apilarada

Trat = tratamiento de los efluentes de enjuague ó recuperación

Activ. = activación

Oper = trabajador

### XII.6.2 Dimensionado de tanques

$$\text{Volumen (V)} = \pi \times r^2 \times h = 2 \times \pi \times r^3$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{V}{2\pi}}$$

$$H = 3r \quad h = 2r$$

R = radio del dimensionado final

Ejemplo:

**Tanque TP-03 (Cr):** V efluente = 25 L → r = 16, D = 32, h = 48, H = 50 L

V tanque = 40.2 L → estandarizando **V = 50 L**

En la Tabla N° VIII.1.2.3.1 se muestra el resultado del dimensionado de los tanques empleados.

### XII.6.3 Filtro Prensa

Masa de sólidos a filtrar =  $m_s = 7000$  g

Densidad de la torta:  $\rho = 1.82$  g/ml (\*)

Masa de líquido en la torta =  $m_{lq} = 7000$  g      N° de placas y marcos = 14

Espesor de la torta:  $e = \frac{1}{4}$  " = 0,625 cm

Masa retenida por placa =  $14000/14 = 1000$  g

$$V = e \times a^2 = 1000 \text{ g} / 1.82 \text{ g/ml} = 549.5 \text{ ml} = 0.625 \times a^2$$

$a = 30$  cm de marco; longitud de placa:  $L = 1 \frac{1}{2}$  " x 14 = 21 " = 53 cm

Volumen de efluente (Vef): 200 L/h = 0.9 gpm → V nominal = 1 gpm

(\*) Referencia: Fayad J. H., 1998

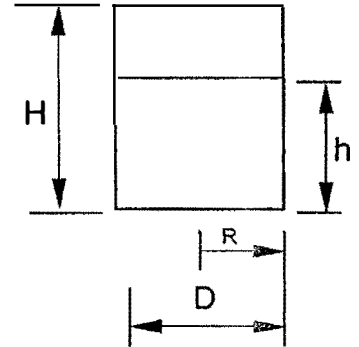


Tabla N° XII.6.1 Programa de Producción

<b>Consumo de arcilla activada</b>		
6.5 Kg AA	× 3 trat	× 12 meses = 235 Kg AA/año
	trat	mes año
<b>Consumo de bentonita</b>		
1.4 . Kg b	× 235 Kg AA	= 329 Kg b/ año
Kg AA	año	

Tabla N° XII.6.2 Costo de materia prima, reactivos y servicios

CONCEPTO	UNIDAD	COSTO US\$/UNIDAD
<u>Materia Prima</u>		
Bentonita	Kg	0.16
<u>Reactivos</u>		
NaOH	Kg	13.7
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (95%)	Kg	0.5
HCl (conc.)	Kg	0.2
NaClO (13%)	Kg	1.5
NaHSO <sub>3</sub> (39%)	Kg	1.5
AlCl <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O	Kg	55.0
<u>Servicios</u>		
Agua Industrial	m <sup>3</sup>	0.09
Agua desmineralizada	m <sup>3</sup>	0.5
Electricidad	Kw	0.08

Fuente: Agregados Calcáreos, Cimatec, Aduanas 2000.

**Tabla N° XII.6.3-a Consumo de reactivos y servicios para la producción de arcilla termoactivada**

<b>1. <u>Reactivos</u></b>				
HCl 12 N				
Datos experimentales:				
1.4 Kg b	→	1 Kg AA	$\rho = 1.19 \text{ Kg/L}$	
10 g AA	→	6 ml HCl	$m = 0.714 \text{ Kg HCl}$	
1 Kg AA	→	0.6 L HCl		
$0.714 \text{ Kg HCl} / 1.4 \text{ Kg b} = 0.5 \text{ Kg HCl/Kg b}$				
<b>2. <u>Servicios</u></b>				
<b>a. Agua desionizada</b>				
Datos experimentales:				
- dilución		70 ml		
- preparación		70 ml		
- lavado		<u>750 ml</u>		
<b>Total</b>		<b>890 ml</b>		
aprox. 0.9 L → 10 g AA				
0.09 m <sup>3</sup>	→	1 Kg AA	→	1.4 Kg b
$0.09 \text{ m}^3 / 1.4 \text{ Kg b} = 0.0642 \text{ m}^3 / \text{Kg b}$				
<b>b. Electricidad</b>				
Concepto	HP	Kw-h	t(h)	Kwl
- agitación - mezcla	1	0.75	0.5	0.375
- agitación – Activ.	1	0.75	1.5	1.125
- calentamiento	--	2.00	1.5	<u>3.000</u>
<b>Total</b>				<b>4.50</b>

**Tabla N° XII.6.3-b Consumo de reactivos y servicios para la producción de arcilla apilarada**

**1. Reactivos**

**a.  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$**

Datos experimentales:

1.25 Kg b  $\rightarrow$  1 Kg AAP

10 g AAP  $\rightarrow$  16 g  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

1 Kg AAP  $\rightarrow$  1.6 Kg  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

1.6 Kg  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  / 1.25 Kg b = 1.28 Kg  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  / Kg b

**b. NaOH**

Datos experimentales:

1.25 Kg b  $\rightarrow$  1 Kg AAP

10 g AAP  $\rightarrow$  5.46 g NaOH

1 Kg AAP  $\rightarrow$  0.55 Kg NaOH

0.55 Kg NaOH / 1.25 Kg b = 0.44 Kg NaOH / Kg b

**2. Servicios**

**a. Agua desionizada**

Datos experimentales:

- dilución  $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  330 ml

- dilución NaOH 270 ml

- Compensar evaporación 60 ml

- dilución arcilla purificada 2% 490 ml

- lavado 750 ml

**Total** 1900 ml

Aprox. 2 L  $\rightarrow$  10 g AAP

0.2 m<sup>3</sup>  $\rightarrow$  1 Kg AAP  $\rightarrow$  1.25 Kg b

0.2 m<sup>3</sup> / 1.25 Kg b = 0.16 m<sup>3</sup> / Kg b

**b. Electricidad**

Concepto	HP	Kw-h	t(h)	Kwl
- agitación Keggin	1.5	1.125	3.5	3.9375
- calentamiento Keggin	--	2.0	3.0	6.0
- agitación intercalación.	1.5	1.125	24	27.0
- filtrado	3.0	2.25	1.0	2.25
- secado	--	2.0	5.0	10.00
- calcinado	--	5.00	3.5	<u>17.50</u>
<b>Total</b>				<b>66.70</b>

**Tabla N° XII.6.4-a Cálculos para determinar el costo de manufactura de la arcilla termoactivada**

<b>1. Materia prima</b>	<b>US\$/año</b>
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AA}} \times 0.16 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg b}} \times 235 \frac{\text{Kg AA}}{\text{año}} =$	<b>52.64</b>
<b>2. Costo Variable</b>	
<b>a. Reactivos</b>	
HCl:	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AA}} \times 0.5 \frac{\text{Kg HCl}}{\text{Kg b}} \times 0.2 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg HCl}} \times 235 \frac{\text{Kg AA}}{\text{año}} =$	<b>32.9</b>
<b>b. Servicios</b>	
Agua	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AA}} \times 0.0642 \frac{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{Kg b}} \times 0.5 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}} \times 235 \frac{\text{Kg AA}}{\text{año}} =$	<b>10.56</b>
Electricidad	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AA}} \times 4.5 \frac{\text{Kw}}{\text{Kg b}} \times 0.08 \frac{\text{US\$}}{\text{Kw}} \times 235 \frac{\text{Kg AA}}{\text{año}} =$	<b>118.44</b>
<b>Total Costo Variable</b>	<b>161.90</b>
<b>3. Costo Fijo</b>	
<b>a. Mano de obra (2 trabajadores)</b>	
2. x $150 \frac{\text{US\$}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 3600 \text{ US\$/año}$	
M. obra = 10 % sueldo = $0.1 \times 3600 =$	<b>360.0</b>
<b>b. Laboratorio</b>	
$130 \frac{\text{US\$}}{\text{trat}} \times 3 \frac{\text{trat}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} = 4680 \text{ US\$/año}$	
Lab. = 1 % total = $0.01 \times 4680 =$	<b>46.8</b>
<b>Total Costo Fijo</b>	<b>406.80</b>
<b>Costo de producción total</b>	<b>621.34</b>
<b>Costo unitario</b>	$\frac{621.34 \text{ US\$/año}}{235 \text{ Kg AA /año}} = 2.65 \text{ US\$/Kg AA}$

**Tabla N° XII.6.4-b Cálculos para determinar el costo de manufactura de la arcilla apilarada**

<b>1. <u>Materia prima</u></b>	<b>US\$/año</b>
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AAP}} \times 0.16 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg b}} \times 235 \frac{\text{Kg AAP}}{\text{año}} =$	<b>52.64</b>
<b>2. <u>Costo Variable</u></b>	
<b>a. Reactivos</b>	
AlCl <sub>3</sub> :	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AAP}} \times 1.28 \frac{\text{Kg AlCl}_3}{\text{Kg b}} \times 55 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg AlCl}_3} \times 235 \frac{\text{Kg AAP}}{\text{año}} =$	23161.6
NaOH:	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AAP}} \times 0.44 \frac{\text{Kg NaOH}}{\text{Kg b}} \times 13.7 \frac{\text{US\$}}{\text{Kg NaOH}} \times 235 \frac{\text{Kg AAP}}{\text{año}} =$	1983.2
<b>b. Servicios</b>	
Agua	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AAP}} \times 0.16 \frac{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}}{\text{Kg b}} \times 0.5 \frac{\text{US\$}}{\text{m}^3 \text{H}_2\text{O}} \times 235 \frac{\text{Kg AAP}}{\text{año}} =$	721.2
Electricidad	
1.4 $\frac{\text{Kg b}}{\text{Kg AAP}} \times 66.7 \frac{\text{Kw}}{\text{Kg b}} \times 0.08 \frac{\text{US\$}}{\text{Kw}} \times 235 \frac{\text{Kg AAP}}{\text{año}} =$	1755.54
<b>Total Costo Variable</b>	<b>27621.52</b>
<b>3. <u>Costo Fijo</u></b>	
<b>a. Mano de obra (2 trabajadores)</b>	
2. x $150 \frac{\text{US\$}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} =$	3600 US\$/año
M. obra = 10 % sueldo = 0.1x3600 =	360.0
<b>b. Laboratorio</b>	
130 $\frac{\text{US\$}}{\text{trat}} \times 3 \frac{\text{trat}}{\text{mes}} \times 12 \frac{\text{meses}}{\text{año}} =$	4680 US\$/año
Lab. = 2 % total = 0.02x4680 =	93.6
<b>Total Costo Fijo</b>	<b>453.60</b>
<b>Costo de producción total</b>	<b>28127.76</b>
<b>Costo unitario</b>	$\frac{28127.76 \text{ US\$/año}}{235 \text{ Kg AAP /año}} = 119.7 \text{ US\$/Kg AAP}$

## XII.6.4 CÁLCULOS ESTEQUIOMÉTRICOS

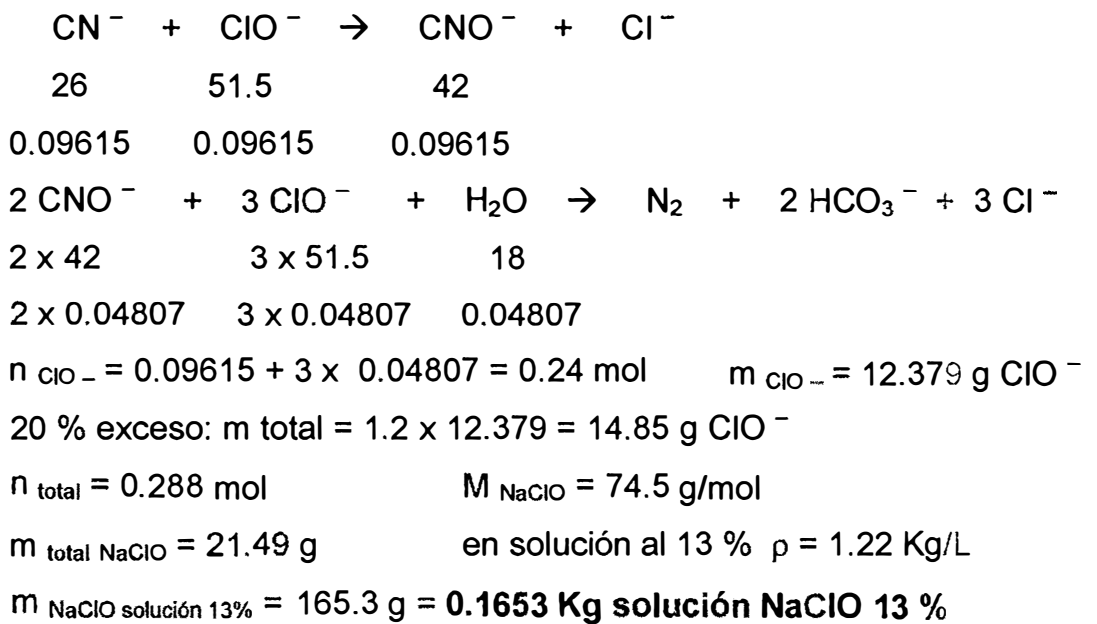
### 1. Tratamiento de las aguas de enjuague.

#### Eliminación de cianuros

$$\text{Cu alcalino: } m_a = 25\text{L} \times 0.075 \text{ g/L} = 1.875 \text{ g}$$

$$\text{Zn} \quad : \quad m_b = 25\text{L} \times 0.025 \text{ g/L} = 0.625 \text{ g}$$

$$m_t = 2.5 \text{ g CN}^- \quad M = 26 \text{ g/mol} \quad n_{\text{CN}^-} = 0.09615 \text{ mol}$$



$$\frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol NaCN}} = \frac{40 \text{ g NaOH}}{49 \text{ g NaCN}} = \frac{1 \text{ Kg NaOH}}{1.225 \text{ Kg NaCN}} = 0.816 \frac{\text{Kg NaOH}}{\text{Kg NaCN}}$$

$$m_{\text{NaCN}} = 0.09615 \times 49 \text{ g/mol} = 4.71135 \text{ g} = 0.004711 \text{ Kg NaCN}$$

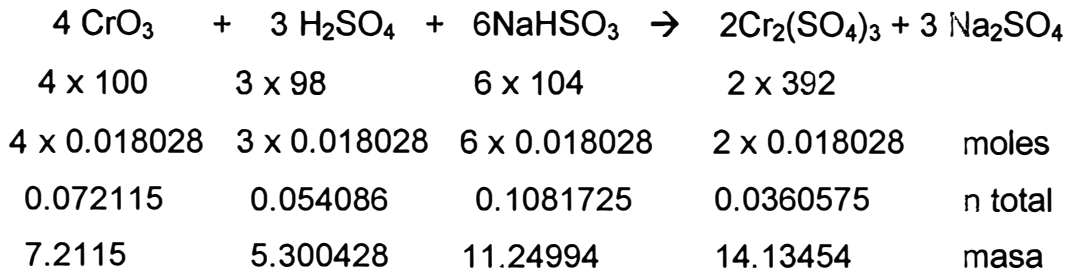
$$m_{\text{NaOH}} = \mathbf{0.003841 \text{ Kg NaOH}}$$

#### Reducción de Cr (VI) $\rightarrow$ Cr(III)

$$V = 25 \text{ L} \quad C_{\text{Cr}} = 150 \text{ ppm} \quad m_{\text{Cr}} = 3,75 \text{ g} \quad \text{PA} = 52 \text{ g/mol}$$

$$n_{\text{Cr}} = 0.072115 \text{ mol} \quad \begin{array}{ccc} 1 \text{ mol Cr} & \rightarrow & 1 \text{ mol CrO}_3 \\ 52 \text{ g} & & 100 \text{ g} \end{array} \quad n/4 = 0.018028 \text{ mol}$$

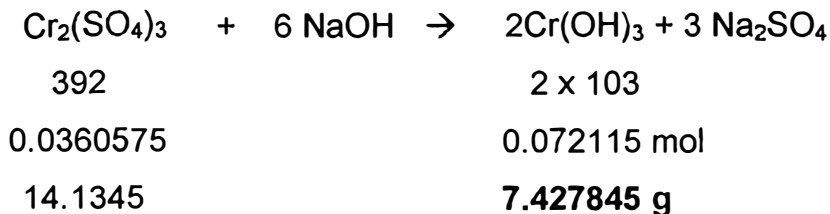




$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 97 \%}} = 5.3/0.97 = \mathbf{5.464 \text{ g}} \quad \rho = 1.84 \text{ g/ml} \quad V = 2.969 \text{ ml}$$

$$m_{\text{NaHSO}_3 \text{ 39 \%}} = 11.25 \text{ g}/0.39 = \mathbf{28.846 \text{ g}} \quad \rho = 1.35 \text{ g/ml} \quad V = 21.37 \text{ ml}$$

Nota: si se desea recuperar el cromo como hidróxido  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ :



Aguas ácidas (ajuste de pH)

$$120 \text{ g NaOH} / 1000 \text{ L de efluente} \times 50 \text{ L} = 6 \text{ g} = \mathbf{0.006 \text{ Kg NaOH}}$$

Neutralización

$$180 \text{ g NaOH} / 1000 \text{ L de efluente} \times 125 \text{ L} = 22.5 \text{ g} = \mathbf{0.0225 \text{ Kg NaOH}}$$

Precipitación

$$\text{- Cr: } 25 \text{ L} \times 150 \text{ ppm} = 3.75 \text{ g} = 0.00375 \text{ Kg Cr}$$

$$\text{De la relación: } 2.3 \text{ Kg NaOH} / 1 \text{ Kg} \times 0.00375 \text{ Kg} = \mathbf{0.008625 \text{ Kg NaOH}}$$

**- Cu:**

$$\text{alcalino: } 25 \text{ L} \times 60 \text{ ppm} = 1.5 \text{ g} = 0.0015 \text{ Kg}$$

$$\text{ácido : } 25 \text{ L} \times 80 \text{ ppm} = 2.0 \text{ g} = 0.002 \text{ Kg} \quad \text{Total} = 0.0035 \text{ Kg Cu}$$

$$\text{De la relación: } 2 \text{ Kg NaOH} / \text{Kg Cu} \times 0.0035 \text{ Kg Cu} = \mathbf{0.007 \text{ Kg NaOH}}$$

$$\text{- Ni: } 25 \text{ L} \times 120 \text{ ppm} = 3. \text{ g} = 0.003 \text{ Kg Ni}$$

$$\text{De la relación: } 2.0 \text{ Kg NaOH} / \text{Kg Ni} \times 0.003 \text{ Kg Ni} = \mathbf{0.006 \text{ Kg NaOH}}$$

- Zn:  $25 \text{ L} \times 40 \text{ ppm} = 1.0 \text{ g} = 0.001 \text{ Kg Zn}$

De la relación:  $2.0 \text{ Kg NaOH/ Kg Zn} \times 0.001 \text{ Kg Zn} = \mathbf{0.002 \text{ Kg NaOH}}$

Consumo de la arcilla modificada:

Considerando la relación experimental de:  $0.05 \text{ Kg arcilla por L efluente}$  contenido en cada una de las cubetas de aguas de enjuague antes de ser recolectadas:

$0.05 \text{ Kg/L} \times 25 \text{ L} = 1.25 \text{ Kg de arcilla}$

Para los 5 efluentes (Cr, Cu ácido, Cu alcalino, Ni y Zn):

$1.25 \times 5 = \mathbf{6.25 \text{ Kg de arcilla por tratamiento}}$

## 2. Tratamiento de las aguas de recuperación.

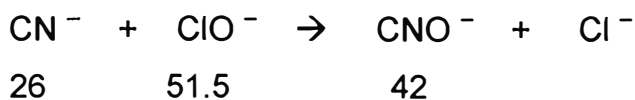
### Eliminación de cianuros

$$\text{Cu alcalino: } m_a = 25\text{L} \times 0.230 \text{ g/L} = 5.75 \text{ g}$$

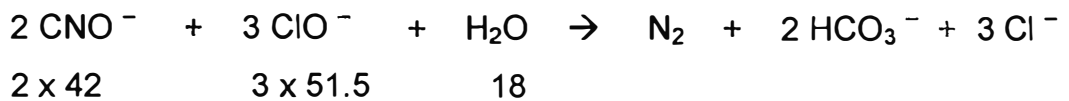
$$\text{NaCN: } m_a = 25\text{L} \times 0.80 \text{ g/L} = 2.00 \text{ g}$$

$$\text{Zn : } m_b = 25\text{L} \times 0.70 \text{ g/L} = 1.75 \text{ g}$$

$$m_t = 9.5 \text{ g CN}^- \quad M = 26 \text{ g/mol} \quad n_{\text{CN}^-} = 0.365385 \text{ mol}$$



$$0.365385 \quad 0.365385 \quad 0.365385$$



$$2 \times 0.182692 \quad 3 \times 0.182692 \quad 0.182692$$

$$n_{\text{ClO}^-} = 0.365385 + 3 \times 0.182692 = 0.913461 \text{ mol}$$

$$m_{\text{ClO}^-} = 47.04324 \text{ g ClO}^-$$

$$20 \% \text{ exceso: } m_{\text{total}} = 1.2 \times 47.04324 = 56.452 \text{ g ClO}^-$$

$$n_{\text{total}} = 1.096 \text{ mol}$$

$$M_{\text{NaClO}} = 74.5 \text{ g/mol}$$

$$m_{\text{total NaClO}} = 81.66 \text{ g}$$

$$\text{en solución al } 13 \% \quad \rho = 1.22 \text{ Kg/L}$$

$$m_{\text{NaClO solución } 13\%} = 628.18 \text{ g} = \mathbf{0.6281 \text{ Kg solución NaClO } 13 \%}$$

$$\frac{1 \text{ mol NaOH}}{1 \text{ mol NaCN}} = \frac{40 \text{ g NaOH}}{49 \text{ g NaCN}} = \frac{1 \text{ Kg NaOH}}{1.225 \text{ Kg NaCN}} = 0.816 \frac{\text{Kg NaOH}}{\text{Kg NaCN}}$$

$$m_{\text{NaCN}} = 0.365385 \times 49 \text{ g/mol} = 17.9038 \text{ g} = 0.0179 \text{ Kg NaCN}$$

$$m_{\text{NaOH}} = 0.816 \frac{\text{Kg NaOH}}{\text{Kg NaCN}} \times 0.0179 \text{ Kg NaCN} = \mathbf{0.01461 \text{ Kg NaOH}}$$

### Reducción de Cr (VI) $\rightarrow$ Cr(III)

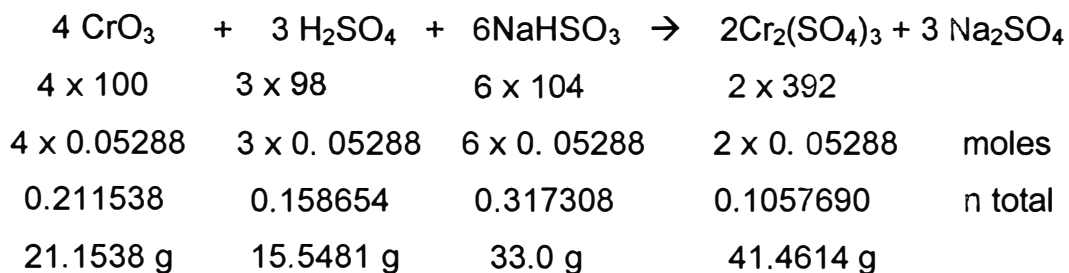
$$V = 25 \text{ L} \quad C_{\text{Cr}} = 440 \text{ ppm} \quad m_{\text{Cr}} = 11 \text{ g} \quad \text{PA} = 52 \text{ g/mol}$$

$$n_{\text{Cr}} = 0.211538 \text{ mol} \quad 1 \text{ mol Cr} \rightarrow 1 \text{ mol CrO}_3$$

$$52 \text{ g}$$

$$100 \text{ g}$$

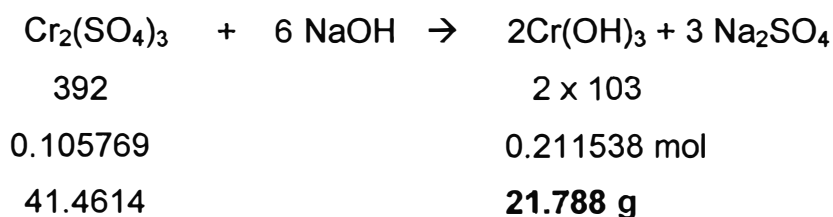
$$n/4 = 0.0528846 \text{ mol}$$



$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ 97 \%}} = 15.55 / 0.97 = \mathbf{16.029 \text{ g}} \quad \rho = 1.84 \text{ g/ml} \quad V = 8.71 \text{ ml}$$

$$m_{\text{NaHSO}_3 \text{ 39 \%}} = 33.0 / 0.39 = \mathbf{84.615 \text{ g}} \quad \rho = 1.35 \text{ g/ml} \quad V = 62.70 \text{ ml}$$

Nota: si se desea recuperar el cromo como hidróxido  $\text{Cr}(\text{OH})_3$ :



Aguas ácidas (ajuste de pH)

$$120 \text{ g NaOH} / 1000 \text{ L de efluente} \times 100 \text{ L} = 12 \text{ g} = \mathbf{0.012 \text{ Kg NaOH}}$$

Neutralización

$$180 \text{ g NaOH} / 1000 \text{ L de efluente} \times 200 \text{ L} = 36 \text{ g} = \mathbf{0.036 \text{ Kg NaOH}}$$

Precipitación

$$\text{- Cr: } 25 \text{ L} \times 440 \text{ ppm} = 11.0 \text{ g} = \mathbf{0.011 \text{ Kg Cr}}$$

$$\text{De la relación: } 2.3 \text{ Kg NaOH/ Kg Cr} \times 0.011 \text{ Kg Cr} = \mathbf{0.0253 \text{ Kg NaOH}}$$

**- Cu:**

$$\text{alcalino: } 25 \text{ L} \times 180 \text{ ppm} = 4.5 \text{ g} = \mathbf{0.0045 \text{ Kg}}$$

$$\text{ácido : } 25 \text{ L} \times 230 \text{ ppm} = 5.75 \text{ g} = \mathbf{0.00575 \text{ Kg}}$$

$$\text{Total} = \mathbf{0.01025 \text{ Kg Cu}}$$

$$\text{De la relación: } 2 \text{ Kg NaOH/ Kg Cu} \times 0.0103 \text{ Kg Cu} = \mathbf{0.0206 \text{ Kg NaOH}}$$

- **Ni:**  $25 \text{ L} \times 340 \text{ ppm} = 8.5 \text{ g} = 0.0085 \text{ Kg Ni}$

De la relación:  $2.0 \text{ Kg NaOH/ Kg Ni} \times 0.0085 \text{ Kg Ni} = \mathbf{0.017 \text{ Kg NaOH}}$

- **Zn:**  $25 \text{ L} \times 120 \text{ ppm} = 3.0 \text{ g} = 0.003 \text{ Kg Zn}$

De la relación:  $2.0 \text{ Kg NaOH/ Kg Zn} \times 0.003 \text{ Kg Zn} = \mathbf{0.006 \text{ Kg NaOH}}$

Consumo de la arcilla modificada:

Considerando la relación experimental de:  $0.05 \text{ Kg arcilla por L efluente}$  contenido en cada una de las cubetas de aguas de enjuague antes de ser recolectadas:

$0.05 \text{ Kg/L} \times 25 \text{ L} = 1.25 \text{ Kg de arcilla}$

Para los 5 efluentes (Cr, Cu ácido, Cu alcalino, Ni y Zn):

$1.25 \times 5 = \mathbf{6.25 \text{ Kg de arcilla por tratamiento}}$

**Tabla N° XII.6.5-a Cálculos para determinar el costo de operación  
del tratamiento de las aguas de enjuague**

Volumen a tratar: 125 L

<b>1. <u>Materia prima</u></b>	<b>US\$/trat</b>
Arcilla Termoactivada	
6.25 Kg AA x 2.65 US\$/Kg AA	<b>16.56</b>
<b>2. <u>Costo Variable</u></b>	
<b>a. Reactivos</b>	
<u>Eliminación de cianuros:</u> V = 50 L	
NaClO:	
0.1653 Kg NaClO x 1.5 US\$/Kg NaClO =	0.2480
NaOH	
0.00384 Kg NaOH x 13.6 US\$/Kg NaOH =	0.0522
<u>Reducción de Cr (VI):</u> V = 25 L	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
0.005464 Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> x 0.5 US\$ / Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =	0.0027
NaHSO <sub>3</sub>	
0.028846 Kg NaHSO <sub>3</sub> x 1.5 US\$ / Kg NaHSO <sub>3</sub> =	0.0433
<u>Aguas ácidas (ajuste de pH):</u> V = 50 L	
NaOH	
0.006 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.0816
<u>Neutralización:</u> V = 125 L	
NaOH	
0,0225 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.306
<u>Precipitación:</u> V = 25 L c/ metal	
2.3 Kg NaOH / Kg Cr      2 Kg NaOH / Kg (Cu, Ni y Zn)	
Cr: 0.08625 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.1173
Cu: 0.0070 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.0952
Ni : 0.0060 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.0816
Zn: 0.0020 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	<u>0.0272</u>
Total costo de reactivos	1.0554

**b. Servicios****US\$ /trat**AguaLavado del filtro prensa:  $2 \text{ m}^3 \times 0.09 \text{ US\$/m}^3 = 0.180$ Desionizada:  $0.01 \text{ m}^3 \times 0.5 \text{ US\$/m}^3 = 0.005$ 

Total costo de agua 0.185

Electricidad	HP	Kw-h	t (h)	Kw
- Cianuros				
AT-01	1	0.75	0.5	0.375
AT-02	1	0.75	1.5	1.125
- Reducción Cr(VI)				
AT-03	1	0.75	0.5	0.375
- Aguas ácidas				
AT-04	1.5	1.125	0.5	0.5625
- Neutralización / Precipitación				
AT-05	2	1.50	0.5	0.75
- Bombeo				
BP-01	1	0.75	0.5	0.375
BP-02	1	0.75	0.5	0.375
BP-03	1	0.75	0.5	0.375
- Tratamiento con arcilla				
AT-06	3	2.25	12	27.00
- Filtración				
BP-04	3	2.25	0.5	1.125
Total Kw = 32.4376				

Total electricidad:  $32.4376 \text{ Kw} \times 0.08 \text{ US\$/ Kw} = 2.595$ **Total Costo Variable****3.8354****3. Costo Fijo****a. Mano de obra total: 3600 US\$/año**

10 % → fabricación de arcilla = 360 US\$/año

90 % → trat. de efluentes = 3240 US\$/año

 $3240 \text{ US\$} / 12 \text{ meses} = 270 \text{ US\$/ mes}$  $270 \text{ US\$/mes} \times 1 \text{ mes} / 3 \text{ trat} = 90 \text{ US\$/trat}$ **b. Laboratorio costo total: 4680 US\$/año**

1 % → arcilla modificada = 46.8 US\$/año

99 % → análisis de efluentes = 4633.2 US\$/año

 $4633.2 \text{ US\$} / 12 \text{ meses} \times 1 \text{ mes} / 3 \text{ trat} = 128.7 \text{ US\$/trat}$ **Total Costo Fijo****218.7****Costo Total de Operación****239.1**

**Tabla N° XII.6.5-b Cálculos para determinar el costo de operación del tratamiento de las aguas de recuperación**

Volumen a tratar: 200 L

<b>1. <u>Materia prima</u></b>	<b>US\$/trat</b>
Arcilla Termoactivada	
6.25 Kg AA x 2.65 US\$/Kg AA	<b>16.56</b>
<b>2. <u>Costo Variable</u></b>	
<b>a. Reactivos</b>	
<u>Eliminación de cianuros: V = 75 L</u>	
NaClO:	
0.6281 Kg NaClO x 1.5 US\$/Kg NaClO =	0.9422
NaOH	
0.01461 Kg NaOH x 13.6 US\$/Kg NaOH =	0.1987
<u>Reducción de Cr (VI): V = 25 L</u>	
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	
0.01603 Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> x 0.5 US\$ / Kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> =	0.0080
NaHSO <sub>3</sub>	
0.08462 Kg NaHSO <sub>3</sub> x 1.5 US\$ / Kg NaHSO <sub>3</sub> =	0.1269
<u>Aguas ácidas (ajuste de pH): V = 100 L</u>	
NaOH	
0.012 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.1632
<u>Neutralización: V = 200 L</u>	
NaOH	
0,036 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.4896
<u>Precipitación: V = 25 L c/ metal</u>	
2.3 Kg NaOH / Kg Cr      2 Kg NaOH / Kg (Cu, Ni y Zn)	
Cr: 0.0253 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.3441
Cu: 0.0206 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.2788
Ni : 0.0170 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	0.2312
Zn: 0.0060 Kg NaOH x 13.6 US\$/ Kg NaOH =	<u>0.0816</u>
<b>Total costo de reactivos</b>	<b>2.8643</b>



**b. Servicios****US\$ /trat**AguaLavado del filtro prensa:  $2 \text{ m}^3 \times 0.09 \text{ US\$/m}^3 = 0.180$ Desionizada:  $0.01 \text{ m}^3 \times 0.5 \text{ US\$/m}^3 = \underline{0.005}$ 

Total costo de agua 0.185

Electricidad

	HP	Kw-h	t (h)	Kw
- Cianuros				
AT-01	1	0.75	0.5	0.375
AT-02	1	0.75	1.5	1.125
- Reducción Cr(VI)				
AT-03	1	0.75	0.5	0.375
- Aguas ácidas				
AT-04	1.5	1.125	0.5	0.5625
- Neutralización / Precipitación				
AT-05	2	1.50	0.5	0.75
- Bombeo				
BP-01	1	0.75	0.5	0.375
BP-02	1	0.75	0.5	0.375
BP-03	1	0.75	0.5	0.375
- Tratamiento con arcilla				
AT-06	3	2.25	12	27.00
- Filtración				
BP-04	3	2.25	0.5	1.125
Total Kw = 32.4376				
Total electricidad: $32.4376 \text{ Kw} \times 0.08 \text{ US\$/ Kw} = 2.595$				

## - Cianuros

AT-01 1 0.75 0.5 0.375

AT-02 1 0.75 1.5 1.125

## - Reducción Cr(VI)

AT-03 1 0.75 0.5 0.375

## - Aguas ácidas

AT-04 1.5 1.125 0.5 0.5625

## - Neutralización / Precipitación

AT-05 2 1.50 0.5 0.75

## - Bombeo

BP-01 1 0.75 0.5 0.375

BP-02 1 0.75 0.5 0.375

BP-03 1 0.75 0.5 0.375

## - Tratamiento con arcilla

AT-06 3 2.25 12 27.00

## - Filtración

BP-04 3 2.25 0.5 1.125

Total Kw = 32.4376

Total electricidad:  $32.4376 \text{ Kw} \times 0.08 \text{ US\$/ Kw} = 2.595$ **Total Costo Variable****5.6443****3. Costo Fijo****a. Mano de obra total: 3600 US\$/año**

10 % → fabricación de arcilla = 360 US\$/año

90 % → trat. de efluentes = 3240 US\$/año

 $3240 \text{ US\$} / 12 \text{ meses} = 270 \text{ US\$/ mes}$  $270 \text{ US\$/mes} \times 1 \text{ mes} / 3 \text{ trat} = 90 \text{ US\$/trat}$ **b. Laboratorio costo total: 4680 US\$/año**

1 % → arcilla modificada = 46.8 US\$/año

99 % → análisis de efluentes = 4633.2 US\$/año

 $4633.2 \text{ US\$} / 12 \text{ meses} \times 1 \text{ mes} / 3 \text{ trat} = 128.7 \text{ US\$/trat}$ **Total Costo Fijo****218.7****Costo Total de Operación****240.9**