

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

DISEÑO DE UNA PLANTA DE VALORIZACIÓN DE LODOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL ANODIZADO DE PIEZAS DE ALUMINIO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

FAUSTO MAURICIO ACOSTA FIALLOS
quimicamauro@hotmail.com

DIRECTORA: ING. ALICIA GUEVARA PhD.
alicia.guevara@epn.edu.ec

Quito, junio 2016

© Escuela Politécnica Nacional (2016)
Reservados todos los derechos de reproducción

DECLARACIÓN

Yo, Fausto Mauricio Acosta Fiallos, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Fausto Mauricio Acosta Fiallos

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Fausto Mauricio Acosta Fiallos.

Ing. PhD. Alicia Guevara
DIRECTOR DE PROYECTO

AUSPICIO

La presente investigación contó con el auspicio financiero del proyecto semilla PIS- 02-2010, que se ejecuta en el Departamento de Metalurgia Extractiva de la Escuela Politécnica Nacional

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por darme la luz todos los días, por permitirme conocer las cosas buenas y malas de la vida, y descubrir los misterios que se guardan en nuestro maravilloso planeta, a través de la ciencia.

A mi familia, en especial a mis padres: Melida Fiallos y Antonio Acosta, por toda su paciencia, apoyo y ejemplo para formarme, y por mostrarme todo su amor en los momentos más difíciles. A mis hermanos Marcelo, Patricio y, especialmente a José Luis, por la dicha de compartir junto a él los momentos más felices de aventura y locura en el devenir de la vida. En cualquier lugar que te encuentres hermano, gracias por hacerme ver el mundo desde otra perspectiva. A mi sobrina Shopia por llenarnos el espacio vacío de nuestro corazón, que nos dejó nuestro tan querido PEPE.

A Carlos Haro y Dayan Moya, quienes me acompañaron durante la realización de este sueño. A mis amigos de estudio Julio Toresano, Rommel Romero y Grace Manobanda, por compartir las amanecidas y momentos alegres. A Luis Tapia, Karina Flores, Josefina Villarreal, Diego Mena, Víctor Solís y María Belén González por ser buenos camaradas. Y por cierto a ese amor que está creciendo en mi corazón

A la Ing. Alicia Guevara, quien fue el pilar fundamental para la realización de este proyecto de tesis, al permitirme ser parte del equipo DEMEX, gracias por toda su ayuda y paciencia. Al Ing. Ernesto de la Torre, por sus consejos para que sea viable esta propuesta, además por compartir el mismo gusto por el deporte más divertido, el ECUAVOLEY. Profesores como ustedes hacen de la carrera de Ingeniería Química, una de las mejores. Asimismo, mi agradecimiento al personal del Departamento de Operaciones Unitarias, que me permitieron realizar todos los ensayos necesarios. Agradezco también a la Sra. Ruth Tapia y al Ingeniero Patricio Flor, por la apertura al uso del horno de su laboratorio.

A Vinicio López por haber aportado con sus ideas ingenieriles, y por las enseñanzas de AUTOCAD, gracias por todas las charlas realizadas junto a un café, y por sus sabios consejos.

“Todos los errores están permitidos, excepto uno: ¡aferrarse a lo antiguo!”

Assar Gabrielsson (1891-1962)

DEDICATORIA

Dedico la consecución de este sueño a mis Padres por toda su entrega y amor, y a mis hermanos por estar siempre en los buenos y malos momentos.

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN		xv
INTRODUCCION		xvii
1	REVISION BIBLIOGRAFICA	1
1.1	Proceso de anodizado y recubrimiento superficial de aluminio	1
1.1.1	Aluminio	1
1.1.2	Industria de los perfiles de aluminio	3
1.1.3	Proceso de producción de perfiles de aluminio	4
1.1.3.1	Extrusión	6
1.1.3.2	Tratamiento superficial	6
1.2	Métodos utilizados para el procesamiento y valoración de los lodos anódicos	14
1.2.1	Lodos anódicos producidos en el proceso de anodizado de perfiles de aluminio	14
1.2.2	Valoración de los lodos anódicos	15
1.2.3	Solubilidad del hidroxido de aluminio en medio ácido y básico	20
1.3	Propiedades de los materiales alúmina y mullita	21
1.3.1	Alúmina	21
1.3.1.1	Estructura cristalina de la Alúmina (corindón).	22
1.3.1.2	Sistema $Al_2O_3-SiO_2$	23
1.3.1.3	Producción de alúmina por el método Bayer	24
1.3.1.4	Propiedades y aplicaciones de la alúmina	27
1.3.2	Mullita	30
1.3.2.1	Estructura cristalina de la Mullita.	30
1.3.2.2	Producción de mullita	31
1.3.2.3	Propiedades y aplicaciones	33
2	PARTE EXPERIMENTAL	34
2.1	Caracterización física, química, térmica y mineralógica de los lodos residuales	37
2.1.1	Caracterización física de los lodos anódicos	37
2.1.1.1	Determinación de la humedad de muestras de los lodos anódicos	37
2.1.1.2	Determinación de la densidad aparente de muestras de los lodos anódicos	38
2.1.1.3	Determinación de la densidad real de muestras de lodos anódicos	38
2.1.1.4	Determinación del área superficial de los lodos anódicos	39

2.1.1.5	Determinación del tamaño de partícula (d_{80})	40
2.1.2	Caracterización química y morfológica de los lodos anódicos	40
2.1.2.1	Caracterización química y morfológica	40
2.1.2.2	Determinación del pH de la muestra de lodos anódicos	42
2.1.3	Caracterización mineralógica de los lodos anódicos	42
2.1.4	Caracterización térmica de los lodos anódicos	42
2.2	Recuperación de aluminio en solución a partir de los lodos residuales por procesos hidrometalúrgicos	43
2.2.1	Lixiviación en medio alcalina con lodos anódicos húmedos	43
2.2.2	Lixiviación con ácidos orgánicos e inorgánicos de los lodos anódicos húmedos	45
2.3	Recuperación de aluminio de lodos residuales por ensayos pirometalúrgicos	46
2.3.1	Ensayos de calcinación de los lodos anódicos	47
2.3.2	Caracterización físico y química de los lodos calcinados	47
2.4	Diagrama de flujo y dimensionamiento de equipos para una planta de valorización de 1 000 kg/día	48
2.5	Evaluación económica preliminar de una planta de valorización de 1 000 kg/día	52
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
3.1	Caracterización física, química, térmica y mineralógica de muestras de lodos anódicos	54
3.1.1	Caracterización física de los lodos anódicos	54
3.1.2	Caracterización química, morfológica de muestras de los lodos anódicos	56
3.1.2.1	Determinación de la concentración de los metales presentes en los lodos anódicos mediante la espectrofotometría atómica	56
3.1.2.2	Caracterización morfológica de muestras de lodo anódico	57
3.1.2.3	Caracterización de cristalinidad del lodo anódico	59
3.1.3	Caracterización térmica del lodo anódico	60
3.1.3.1	Lodos anódicos húmedos	60
3.1.3.2	Lodos anódicos secos	61
3.2	Ensayos hidrometalúrgicos para la recuperación de aluminio de los lodos anódicos	63
3.2.1	Lixiviación en pulpas diluidas con ácidos inorgánicos	63
3.2.2	Lixiviación en pulpas diluidas con ácidos orgánicos	65
3.2.3	Lixiviación en pulpas diluidas con hidróxido de sodio	68
3.3	Ensayos de recuperación de aluminio por procesos pirometalúrgicos	69

3.3.1	Caracterización mineralógica de la fase cristalina de los lodos anódicos calcinados	69
3.3.1.1	Ensayos de calcinación de los lodos anódicos a 200, 600 y 800 °C	70
3.3.1.2	Ensayo de calcinación de los lodos anódicos a 1 000 °C	72
3.3.1.3	Ensayo de calcinación de lodos anódicos a 1 200 °C	73
3.3.2	Caracterización de los lodos anódicos calcinados a 1 200 °C por microscopía electrónica de barrido (MEB)	75
3.3.3	Determinación del área superficial de los lodos anódicos calcinados a 1 200 °C y 600 °C	79
3.3.4	Caracterización física de los lodos calcinados a 1 200 °C	81
3.4	Definición del diagrama de flujo del proceso, dimensionamiento de los equipos y evaluación económica preliminar	81
3.4.1	Selección de la mejor alternativa de la valoración de los lodos anódicos	81
3.4.2	Estudio de la cinética llevado a cabo durante la calcinación de los anódicos	84
3.4.3	Diagrama de flujo de la planta de valoración de lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio	87
3.4.3.1	Consideraciones para el flujo de alimentación y la instalación de la planta de valoración de lodos anódicos	87
3.4.3.2	Descripción del proceso de producción de corindón (α -alúmina)	89
3.4.4	Dimensionamiento de los equipos requeridos en la planta de valoración de lodos	90
3.4.4.1	Dimensionamiento del secador invernadero	90
3.4.4.2	Dimensionamiento de la banda transportadora	94
3.4.4.3	Dimensionamiento de la tolva de almacenamiento	94
3.4.4.4	Dimensionamiento de horno de calcinación para obtener corindón	95
3.4.4.5	Dimensionamiento de la bandeja de enfriamiento	97
3.4.4.1	Dimensionamiento del molino de rodillo	98
3.4.4.2	Ensayo	98
3.4.4.3	Diagramas de los equipos dimensionados para la producción de corindón	99
3.5	Evaluación económica preliminar de la planta de valoración de los lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio	106
3.5.1	Área del terreno y gastos de construcción de la planta de valoración de los lodos anódicos	106
3.5.2	Costos de suministros para la planta de valoración de lodos anódicos	107
3.5.3	Costos de los equipos requeridos para la planta de valoración de lodos anódicos	108
3.5.4	Mano de obra directa y personal administrativo requerido para la planta de valoración de lodos anódicos	109

3.5.5	Costos de producción y capital de operación mensual de la planta de valoración de lodos anódicos	110
3.5.6	Inversión total del proyecto de valoración de los lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio	111
3.5.7	Estado de pérdidas y ganancias de la evaluación económica preliminar del proyecto de la planta de valoración de lodos anódicos	112
3.5.8	Índices financieros de la evaluación económica preliminar de la planta de valoración de lodos anódicos	112
3.5.9	Punto de equilibrio del proyecto de valoración de lodos anódicos	113
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
4.1	Conclusiones	115
4.2	Recomendaciones	118
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
	ANEXOS	128

INDICE DE TABLAS

		PÁGINA
Tabla 1.1.	Principales países importadores de perfiles de aluminio en América	3
Tabla 1.2.	Medios para limpieza y desengrase del aluminio	7
Tabla 1.3.	Información de los cinco tipos de anodizado	12
Tabla 1.4.	Caracterización de las aguas residuales de una planta de anodizado (capacidad de la planta: 2 500 toneladas/mes)	15
Tabla 1.5.	Cantidad de sólidos generados en el proceso de decapado y anodizado	19
Tabla 1.6.	Propiedades de la α -alúmina	28
Tabla 1.7.	Recomendaciones para escoger polvo de alúmina	29
Tabla 2.1.	Condiciones de operación de lixiviación alcalina	44
Tabla 2.2.	Condiciones de trabajo utilizados para los ensayos de lixiviación de los lodos anódicos húmedos con ácidos inorgánicos y orgánicos	45
Tabla 3.1.	Resultados de la caracterización física de los lodos anódicos	55
Tabla 3.2.	Resultados del análisis químico realizado a los lodos anódicos por espectrofotometría de adsorción atómica	56
Tabla 3.3.	Tamaño de partículas de los lodos anódicos (110 °C por 24 h)	59
Tabla 3.4.	Lixiviación en pulpas diluidas de lodo anódico húmedo con agentes lixiviantes ácidos inorgánicos (1 % de sólidos, tiempo 24 h, 750 rpm ⁻¹)	64
Tabla 3.5.	Lixiviación en pulpas diluidas de lodo anódico húmedo con agentes lixiviantes ácidos orgánicos (1 % de sólidos, tiempo 24 h, 750 rpm ⁻¹)	67
Tabla 3.6.	Lixiviación en pulpas diluidas de lodo anódico húmedo con agente lixiviante básico (1 % de sólidos, tiempo = 24 h, 750 rpm ⁻¹)	68

Tabla 3.7.	Composición mineralógica de los lodos calcinados a 1 200 °C	75
Tabla 3.8.	Tamaño de los cristales formados al calcinar a 1 200 °C	79
Tabla 3.9.	Área superficial a las diferentes temperaturas de calcinación de los lodos	79
Tabla 3.10.	Propiedades físicas de los lodos calcinados a 1 200 °C	81
Tabla 3.11.	Recuperación de aluminio por los procesos hidrometalúrgico y pirometalúrgicos aplicados a los lodos anódico	83
Tabla 3.12.	Parámetros empleados para el dimensionamiento del secador invernadero	91
Tabla 3.13.	Condiciones de operación y dimensiones del secador invernadero	92
Tabla 3.14.	Requisitos energéticos para secar los lodos anódicos del 80 % a un 12 % humedad	93
Tabla 3.15.	Cantidad de agua a evaporar de los lodos anódicos y cantidad de agua que se evapora a condiciones ambientales	94
Tabla 3.16.	Condiciones de operación y características de la banda transportadora	94
Tabla 3.17.	Parámetros y dimensiones de la tolva de almacenamiento	95
Tabla 3.18.	Parámetros para los cálculos de las dimensiones de la cámara del horno y resultado	95
Tabla 3.19.	Características y dimensiones del horno de calcinación seleccionado por catálogos	96
Tabla 3.20.	Parámetros para el cálculo del tiempo de calcinación del lodo anódicos	96
Tabla 3.21.	Tiempo de calentamiento y de calcinación de los lodos anódicos	97
Tabla 3.22.	Parámetros para el dimensionamiento de la bandeja de enfriamiento	97
Tabla 3.23	Dimensiones de la bandeja de enfriamiento y condiciones de funcionamiento	98

Tabla 3.24	Dimensiones del molino de rodillo	98
Tabla 3.25	Condiciones de operación de los horno eléctricos y producción de sacos de 25 kg de corindón	99
Tabla 3.26.	Resultados del dimensionamiento de los equipos requeridos en la planta	99
Tabla 3.27.	Área del terreno y gastos de construcción necesarios para la planta de valoración de lodos anódicos	107
Tabla 3.28.	Requerimientos de suministros para la planta de valoración de lodos anódicos	107
Tabla 3.29.	Requerimiento de equipos para la planta de valoración de lodos anódicos	108
Tabla 3.30.	Nómina de fuerza laboral requerida para la planta de valoración de lodos anódicos	109
Tabla 3.31.	Nómina de fuerza administrativa para la planta de valoración de lodos anódicos	109
Tabla 3.32.	Costos anuales de producción y capital de operación mensual de la planta de valoración de lodos anódicos	110
Tabla 3.33.	Inversión total del proyecto de valoración de lodos anódicos	111
Tabla 3.34.	Estado de pérdidas y ganancias del proyecto de valoración de lodos anódicos	112
Tabla 3.35.	Índices financieros de evaluación económica preliminar de la planta de valoración de lodos anódicos	113
Tabla AI. 1.	Humedad de los lodos anódicos	129
Tabla AI. 2	Resultado del análisis granulométrico de los lodos anódicos secos	131
Tabla AI. 3.	Composición química por absorción atómica de dos muestras de lodos anódicos	134
Tabla AII. 1.	Datos para el cálculo del aluminio presente en los lodos anódicos	138
Tabla AII. 2.	Balace metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido clorhídrico	139

Tabla AII. 3.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido fluorhídrico	141
Tabla AII. 4.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con Ácido nítrico	141
Tabla AII. 5.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido sulfúrico	141
Tabla AII. 6.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido acético	142
Tabla AII. 7.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido cítrico	142
Tabla AII. 8.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido tartárico	142
Tabla AII. 9.	Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con hidróxido de sodio	143
Tabla AIII. 1.	Resultado del análisis granulométrico de los lodos calcinados a 1 200 °C	150
Tabla AIII. 2	Propiedades químicas y físicas de una alúmina comercia A21	151
Tabla AIV. 2.	Porcentaje de los compuestos posibles en los lodos anódicos	152
Tabla AIV. 3.	Datos meteorológicos de la ciudad de la Latacunga del año 2013 (Dirección General de Aviación Civil DAC)	153
Tabla AIV. 3	Datos de energía solar del Centro de Información de Energías Alternativas y Eficiente Energética del año 2013	154
Tabla AIV. 4	Calor específico de los principales componentes del lodo anódico	160
Tabla AIV. 5	Costo de la energía eléctrica en Latacunga	161
Tabla AIV. 6	Parámetros para el cálculo el gasto energético mensual en el proceso de calcinación	162
Tabla AIV. 7	Resumen de los cálculos de energía para la calcinación de los lodos anódico y condiciones de operación	163
Tabla AIV. 8	Costo de energía para la calcinación de los lodos anódicos	164
Tabla AIV. 9	Costo total de los dos hornos para el procesamiento de calcinación	164

Tabla AV. 1.	Sistema de procesamiento para el proceso de calcinación (Horno 1)	165
Tabla AV. 2.	Sistema de procesamiento para el proceso de calcinación (Horno 2)	168
Tabla VI. 1	Parámetros para realizar el análisis del proyecto	172
Tabla VI. 2	Consumo de energía mensual para la planta de producción de corindón	172
Tabla VI.3.	Nómina de administración para la producción de corindón	173
Tabla VI.4.	Nómina de producción para la generación de corindón	173
Tabla VI.5.	Flujo de caja del proyecto de valoración de los lodos anódicos	173

ÍNDICE DE FIGURAS

		PÁGINA
Figura 1.1.	Propiedades particulares que se puede obtener al alear el aluminio con otros metales	2
Figura 1.2.	Diagrama de flujo de un proceso común de anodizado del aluminio	5
Figura 1.3.	Decapado alcalino del aluminio	9
Figura 1.4.	Decapado ácido del aluminio	9
Figura 1.5.	Representación esquemática del proceso de oxidación anódica para los perfiles del aluminio	11
Figura 1.6.	Formación de la capa porosa de óxido de aluminio	13
Figura 1.7.	Secuencia para el intercambio iónico para la recuperación de hidróxido de sodio de los efluentes del baño de decapado	17
Figura 1.8.	Sistema de producción de hidróxido de aluminio y la regeneración de la sosa caustica	18
Figura 1.9.	Recuperación de ácido sulfúrico del proceso de anodizado, a partir de resinas catiónicas	19
Figura 1.10	Efecto del pH en la recuperación de aluminio	21
Figura 1.11	Estructura del corindón	22
Figura 1.12.	Diagrama del sistema en equilibrio de Al_2O_3 - SiO_2	23
Figura 1.13.	Proceso Bayer para obtener alúmina.	24
Figura 1.14.	Secuencia de descomposición térmica de los hidróxidos de aluminio hasta transformar en α - Al_2O_3	27
Figura 1.15.	Estructura de la celda unitaria de la sillimanita (a), (b) se observa la estructura de la mullita, como la derivación de la estructura de sillimanita, donde la sustitución de Si^{+4} con Al^{+4} , conduce a la formación de oxígenos vacantes	31
Figura 1.16.	Región metaestable en el sistema Al_2O_3 - SiO_2	32

Figura 1.1.	Diagrama de flujo del proceso experimental	36
Figura 2.2.	Esquema para la determinación de la composición química de lodos	41
Figura 2.3.	Esquema para caracterización de lodos anódicos calcinados cristalinos	43
Figura 3.1.	Fotografías obtenidas de los lodos anódicos mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), (a) corresponde a un acercamiento de 80x y (b) tiene de 40x	58
Figura 3.2.	Curvas TGA del lodo anódico húmedo	60
Figura 3.3.	Curva TGA de lodos anódicos secos a 110 °C por 24 horas	61
Figura 3.4.	Recuperación de aluminio en soluciones ácidas inorgánicas de concentración 100 g/L (1 % de sólidos, tiempo = 24 h, 600 rpm ⁻¹)	64
Figura 3.5.	Recuperación de aluminio en soluciones ácidas orgánicas de concentración 100 g/L (1 % de sólidos, tiempo = 24 h, 600 rpm ⁻¹)	66
Figura 3.6.	Espectro de DRX de los lodos anódicos calcinados a las temperaturas de 200, 600, 800 °C por 2 horas	70
Figura 3.7.	Espectro de lodos anódicos calcinados a 800 °C (a), espectro obtenido por Vieira et al. (2005), los picos señalados corresponde a γ -alúmina (900 °C) (b).	71
Figura 3.8.	Difractograma (DRX) de lodos anódicos calcinados a 1 000 °C	72
Figura 3.9.	Difractograma (DRX) de lodos anódicos calcinados a 1 200 °C	74
Figura 3.10.	MEB de los lodos anódicos calcinados 1 200 °C, con su respectivo espectro químico EDX (energía dispersa de rayos X)	76
Figura 3.11.	Micrografía puntal realizada a los lodos anódicos calcinados a 1 200 °C, con su respectivo espectro químico EDX	76
Figura 3.12.	Micrografía puntal realizada a los lodos anódicos calcinados a 1 200 °C, con su respectivo espectro químico EDX	77
Figura 3.13.	(a) Micrografía de la investigación llevada a cabo por Kleebe et al. (2001), (b) micrografía de lodos anódicos calcinados a 1 200 °C en esta investigación	78

Figura 3.14	Variación del área superficial de los lodos anódicos con la temperatura de calcinación	80
Figura 3.15.	Balace de masa de la planta de valoración de los lodos anódicos	88
Figura 3.16.	Diagrama de flujo y equipos requeridos en la planta	90
Figura 3.17.	Distribución de equipos en la planta de tratamiento de los anódicos	100
Figura 3.18.	Dimensiones del secador invernadero	101
Figura 3.19.	Dimensiones de la banda transportadora de lodos secos	102
Figura 3.20.	Dimensiones del silo de almacenamiento de los lodos seco	103
Figura 3.21.	Dimensiones de la bandeja de enfriamiento de los lodos calcinados	104
Tabla 3.22.	Dimensiones del molino de rodillo para los lodos calcinados	105
Figura 3.23.	Punto de equilibrio del proyecto de recuperación de los lodos anódicos	114
Figura AI. 1.	Porcentaje pasado acumulado vs tamaño de partícula de los lodos anódicos secos	131
Figura AI. 2.	Análisis del área superficial (110 °C) por el método BET (proceso de adsorción)	132
Figura AI. 3.	Análisis del área superficial (110 °C) por el método BET (proceso de desorción)	133
Figura AI. 4.	Isoterma de adsorción y desorción de los lodos anódicos secos a 110 °C	133
Figura AI. 5.	Análisis químico obtenido de la microscopía electrónica de barrido para una muestra de lodo anódico	136
Figura AI. 6	Observaciones al microscopio electrónico de barrido de una muestra de lodo anódico	136
Figura AI. 7.	Espectro DRX de los secos a 110 °C por 24 horas	137
Figura AIII. 1.	Difractograma del lodo calcinado a 1 100 °C	144

Figura AIII. 2.	Difractograma del lodo calcinado a 1 100 °C	145
Figura AIII. 3.	Análisis químico obtenido de la microscopía electrónica de barrido para una muestra de lodo calcinado a 1 200 °C	146
Figura AIII. 4.	Análisis del área superficial de los lodos calcinados a 600 °C por el método BET (proceso de adsorción)	147
Figura AIII. 5.	Análisis del área superficial de los lodos calcinados a 600 °C por el método BET (proceso de desorción)	147
Figura AIII. 6.	Isotermas de adsorción y desorción de los lodos calcinados a 600 °C	148
Figura AIII. 7.	Análisis del área superficial de los lodos calcinados 1 200 °C por el método BET (proceso de adsorción)	148
Figura AIII. 8	Isoterma de adsorción y desorción de los lodos calcinados a 1200 °C	149
Figura AIII. 9.	Porcentaje pasado acumulado vs tamaño de partícula	150
Figura AIV. 1.	Balance de masa en el secador invernadero	156
Figura AIV. 2.	Materiales que conforman el piso y la pared de los invernaderos	158

ÍNDICE DE ANEXO

	PÁGINA
ANEXO I	
Fichas técnicas de la caracterización física, química, térmica de lodos anódicos	129
ANEXO II	
Fichas técnicas de los ensayos técnicos de lixiviación de los lodos anódicos	138
ANEXO III	
Fichas técnicas de los ensayos piromelúrgicos y caracterización por microscopía electrónica y difracción de rayos x	144
ANEXO IV	
Diseño conceptual de la planta de valorización de lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio	152
ANEXO V	
Sistema de procesamiento (etapa calcinación)	165
ANEXO VI	
Análisis económico preliminar del proyecto de valoración de los anódicos	172

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo el diseño de una planta de valorización de lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio. La materia prima de este estudio, es el lodo anódico que se produce en los tratamientos de limpieza superficial que se realiza a las piezas de aluminio y se generan en la unidad de tratamiento de las aguas residuales. Por lo cual, actualmente constituye un pasivo ambiental difícil de manejar.

Se realizó la caracterización física y química de los lodos anódicos. Se determinó que los lodos anódicos tienen un alto contenido de humedad (80 %), densidad real 1,98 g/mL, área superficial 17,3 m²/g y un tamaño de partícula (d₈₀) de 88 μm. Por el lado químico, los lodos anódicos están constituido principalmente de aluminio (32,0 %), sodio (0,3 %), magnesio (0,8 %), silicio (2,75 %), y Ca (0,04 %), además no presenta una estructura cristalina.

Debido a las características anfóteras del aluminio se utilizó el método hidrometalúrgico para la valoración de los lodos anódicos, para lo cual se utilizaron ácidos orgánicos, inorgánicos (fluorhídrico, clorhídrico, nítrico, sulfúrico, acético, tartárico y crítico e hidróxido de sodio de concentración 100 g/L, con 1 g de lodo húmedo (80 % humedad), 1 % de sólidos, 100 mL de solución, 24 h de lixiviación y 600 rpm⁻¹. Mientras la lixiviación con ácidos orgánicos e inorgánicos se recuperó entre 10,0 y 12,0 % de aluminio, el hidróxido de sodio fue el mejor agente lixivante ya que se alcanzó una recuperación de aluminio del 97,5 % como aluminato de sodio.

La segunda alternativa fue la pirometalurgia, por lo que se procedió a calcinar los lodos anódicos secos a 200 °C, 600 °C, 800 °C, 1 000 °C, 1 110 °C, 1 200 °C, con 1 g de muestra. Con esto se consiguió dos fases cristalinas importantes, una a 1 000 °C llamada mullita (Al₂O₃·SiO₂) y otra alúmina (Al₂O₃) a 1 200 °C. Sin embargo la mullita no demostró ser una fase estable a temperaturas mayores de 1 100 °C, pero la alúmina (corindón) fue la transformación final de los lodos

anódicos. La cantidad de aluminio recuperado en los lodos calcinados a 1 200 °C fue del 99,06 % como alúmina (88 %), y las propiedades físicas fueron densidad real 3,2 g/cm³, área superficial menor a 0,3 m²/g y d₈₀ igual a 60 μm.

Una vez definido el método piro metalúrgico para la valoración de los lodos anódicos, se procedió a determinar el diagrama de flujo para una planta de procesamiento de 5 000 kg/día de capacidad. Se seleccionaron los equipos requeridos y se evaluó la factibilidad económica de este proyecto mediante índices financieros como el valor actual neto, la tasa interna de retorno y la relación costo/beneficio.

Del análisis económico preliminar, se determinó que para iniciar el proyecto son necesarios 279 451,40 USD. En esta línea, el precio de comercialización del producto (alúmina) debe ser de 1,00 USD /kg, para generar utilidades anuales de 108 244,40 USD. Finalmente, se analizó la factibilidad del negocio en base a los índices financieros calculados: VAN = 157 461 USD, TIR = 24,4 % y B/C = 1,6.

INTRODUCCION

El anodizado de aluminio y los procesos de recubrimiento son técnicas comunes que se usan para proteger a los cuerpos metálicos de la corrosión, y para lograr algunos efectos estéticos tal como la coloración. Las etapas que conforman el sistema de anodizado de piezas de aluminio son: desengrase, enjuagues, neutralizado, decapado o matizado, neutralizado, oxidación anódica, coloreado y sellado. Como consecuencia de estos procesos aguas residuales ácidas y básicas (coloides) se generan, y las cuales son enviadas a las unidad de tratamiento de efluentes (Jaramillo, 2006, p. 41).

La depuración común de los efluentes consiste en una mezcla, floculación y por último una filtración en un filtro-prensa. Como resultado, se genera una enorme cantidad de lodos anódicos después del proceso de filtración. La alta cantidad de producción diaria de lodos (4 a 8 toneladas/día) y la dificultad en reducir sus volúmenes, requieren alto costo de transportación y disposición (20- 30 USD/tonelada). Actualmente, en los países de la Unión Europea se generan cerca de 100 000 toneladas métricas por año, (Ribeiro, Tulyaganov, Ferreira y Larincha, 2002, p 319).

Hoy en día, esta situación representa un gran problema ambiental, cuya solución es necesaria y urgente. En efecto, los lodos anódicos producidos en el tratamientos de efluentes están constituidos por altos contenidos de aluminio como: hidróxido de aluminio coloidal y sales solubles tales como Na, K, Mg, Ca y sulfato, que actualmente son un pasivo ambiental, a pesar de que pueden ser recuperados como una materia prima útil para otras industrias, reduciendo el impacto negativo asociado con rellenos sanitarios y la preservación de los recursos naturales no renovables. (Ferreira y Olhera, 2002, p. 2 243; Ribeiro et al. 2002, p. 319).

El aluminato de sodio (NaAlO_2) y sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) son las principales sustancias obtenidas del lodo, encontrándose aplicaciones como pega para la producción de papel, y agente floculante en el proceso de purificación de aguas residuales, respectivamente (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411).

Otra de las formas exitosas de reciclaje propuestas para este tipo de lodo, tienen como principal componente en formulaciones de materiales refractarios mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) o alúmina (corindón). Esto ha permitido encontrar materias primas más económicas y qué mejor si éstas vienen de un residuo industrial, pues el impacto social, ambiental, sumado al beneficio económico es mayor (Ferreira y Olhera, 2002, p. 2 243).

Con la presente investigación, se busca realizar un estudio de valorización de los lodos generados en las plantas de anodizado de piezas de aluminio, para obtener productos de características comerciales. Para lo cual, se realiza un análisis económico preliminar de la planta de valoración de los lodos anódicos, donde se determina la inversión inicial, la utilidad anual y los índices financieros que le permiten al inversionista analizar la factibilidad del proyecto.

1 REVISION BIBLIOGRAFICA

1.1 PROCESO DE ANODIZADO Y RECUBRIMIENTO SUPERFICIAL DE ALUMINIO

1.1.1 ALUMINIO

El aluminio es uno de los metales más abundantes de nuestro planeta, constituyendo cerca del 8 % de la corteza terrestre. Además, este es un metal muy moderno, apenas tiene 120 años desde que se aislado por primera vez en 1872. Ahora, el aluminio debido a sus propiedades se ha convertido en el metal más consumido en el mundo (García y Echeverría, 2004, p. 45; González, Sánchez y Solís, 2011, p.100).

En la naturaleza no se encuentra libre debido a que es un metal muy activo, por esta razón se encuentra combinado con muchos minerales. Los minerales más importantes son bauxita y criolita además, es donde el aluminio se encuentra en mayor concentración. De estos minerales se extrae la alúmina como materia prima para la producción de aluminio metal (González, et al, 2011, p.100; Totten y Mackenzie, 2003, p. 7).

El aluminio tiene una masa atómica de 26, un punto de fusión de 660 °C, un punto de ebullición de 2 467 °C y una densidad relativa de 2,7. Estas propiedades hacen al aluminio un metal muy duro, pero al mismo tiempo ligero, además es muy dúctil, maleable y posee una alta conductividad térmica y eléctrica. Por otro lado, es un metal muy electropositivo y extremadamente reactivo, por esta razón, al estar en contacto con el aire se cubre rápidamente de una capa dura y transparente de óxido de aluminio, que lo protege de la corrosión. No obstante, el aluminio puro es bastante blando, pero débilmente aleado se puede modificar la resistencia y otras propiedades como la dureza, elasticidad, por los cual ofrece infinitas oportunidades de aplicaciones. Los elementos más comúnmente utilizados son el magnesio, zinc, cobre, y fluctúa entre 0,2 % y el 0,7 % (Totten y Mackenzie, 2003, pp. 81-36).

La Figura 1.1, muestra las propiedades que adquiere el aluminio al juntarse con otros metales, donde se observa que al alearse con magnesio, silicio, manganeso y cobre le proporciona alta resistencia a la corrosión. Por otro lado, el magnesio aumenta la resistencia y la dureza, mientras que con el manganeso se aumenta el límite de elasticidad y la carga a la rotura. Por último, el aluminio con zinc y magnesio le proporciona aleaciones tratables térmicamente (Totten y Mackenzie, 2003, p. 81).

Al	+	Zn Zinc	Aumenta la resistencia y la dureza. Posibilidad de corrosión. Combinada con Mg, proporciona aleaciones tratables térmicamente.
Mg Magnesio	Si Silicio	Cu Cobre	Proporciona aleaciones tratables. Aumenta la dureza y la resistencia. Reduce la resistencia a la corrosión
Aumenta la resistencia y la dureza. Buena resistencia a la corrosión. Aumenta la soldabilidad.	Combinado con Magnesio proporciona aleaciones tratables. Buena resistencia a la corrosión.	Mn Manganeso	Aumenta el límite elástico y la carga de rotura. Buena resistencia a la corrosión.

Figura 1.1. Propiedades particulares que se puede obtener al alear el aluminio con otros metales
(Hidro aluminium, 2005, p. 24)

Gracias a las propiedades interesantes del aluminio puro o en sus aleaciones, se puede producir una gran variedad de perfiles, que brindan a los ingenieros, arquitectos y diseñadores la posibilidad de crear una variedad de diseños. Por esta razón, el aluminio tiene una amplia gama de aplicación industrial, tales como la del transporte, refrigeración, eléctrica, envases, electrónica, aeronáutica, y su mayor uso se encuentra en la industria de la construcción. (Totten y Mackenzie, 2003, p. 82).

1.1.2 INDUSTRIA DE LOS PERFILES DE ALUMINIO

Actualmente, la producción de los perfiles de aluminio se estima en 250×10^6 m² de superficie anual en la Unión Europea, además que esta producción aumentara cerca del 3 % cada año. Por otro lado, los Estado Unidos en el 2008 importó 385.30 millones USD. Alemania como principal productor, exportó 1 628,00 millones USD, seguido por Francia con 836,00 millones USD.

En la Tabla 1.1, muestra los países importadores de perfiles de aluminio en toda América, ordenados de mayor a menor importador. En primer lugar se encuentra los Estados Unidos con 559,83 miles USD y en último lugar se encuentra Venezuela con 1,39 miles USD. Entre estos países, se encuentra el nuestro que en el 2008 importó 7 784,00 miles USD. (Cámara de Industrias de Guayaquil, 2010, p. 2).

Tabla 1.1. Principales países importadores de perfiles de aluminio en América

PAISES	MILES USD (año 2008)
Estados Unidos de América	559,83
Canadá	253,30
México	117,95
Chile	31,63
Brasil	20,21
Colombia	17,06
República Dominicana	10,83
Guatemala	9,93
Perú	9,89
Honduras	9,89
Costa Rica	8,02
Ecuador	7,78
Argentina	6,42
Nicaragua	4,16
El Salvador	4025,00
Cuba	4,00
Panamá	2,96
Uruguay	3,33

Tabla 1.1. Principales países importadores de perfiles de aluminio en América
(Continuación...)

PAISES	MILES USD (año 2008)
Guyana	2,39
Trinidad y Tobago	1,69
Suriname	1,51
Venezuela	1,39

*(Cámara de Comercio Guayaquil, 2010, p. 8)

1.1.3 PROCESO DE PRODUCCIÓN DE PERFILES DE ALUMINIO

La materia prima para la producción de perfiles de aluminio es el cilindro de extrusión, que se forma por la fundición de aluminio primario o reciclado. Las dimensiones más comunes de los cilindros de extrusión (tocho, billet) son de un diámetro de 150 a 300 mm, una longitud de 400 a 1 000 mm, y vienen con una amplia variedad de aleaciones como se muestra en la Figura 1.1. Esta aleación que depende del tipo de material que se quiera elaborar, en otras palabras del tipo de utilidad que se le va a dar al perfil de aluminio (Hidro-aluminium, 2005, p. 14; Indalum, 2010, p. 4).

Por otro lado, el billet extruido es el material que ingresa al proceso de producción para la obtención de perfiles de aluminio, median previos tratamientos como son el calentamiento hasta los 450 °C para luego pasar a la máquina de extrusión, donde se obtiene las formas requeridas. La producción de perfiles de aluminio con lleva aproximadamente cinco etapas entre las más importantes están los baños químicos para la limpieza, enjuagues, neutralizados, anodizado y por último el procesos de sellado (Hidro-aluminium, 2005, p. 14).

En la Figura 1.2, se muestra el sistema de tratamiento superficial más ampliamente usado, debido a su alta eficiencia, en los cual se puede ver los procesos de limpieza y desengrase, decapado (que puede ser ácido o alcalino), enjuagues para la eliminación de impurezas, anodizado, coloración electrolítica u orgánica e inorgánica, y finalmente el sellado (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 410).

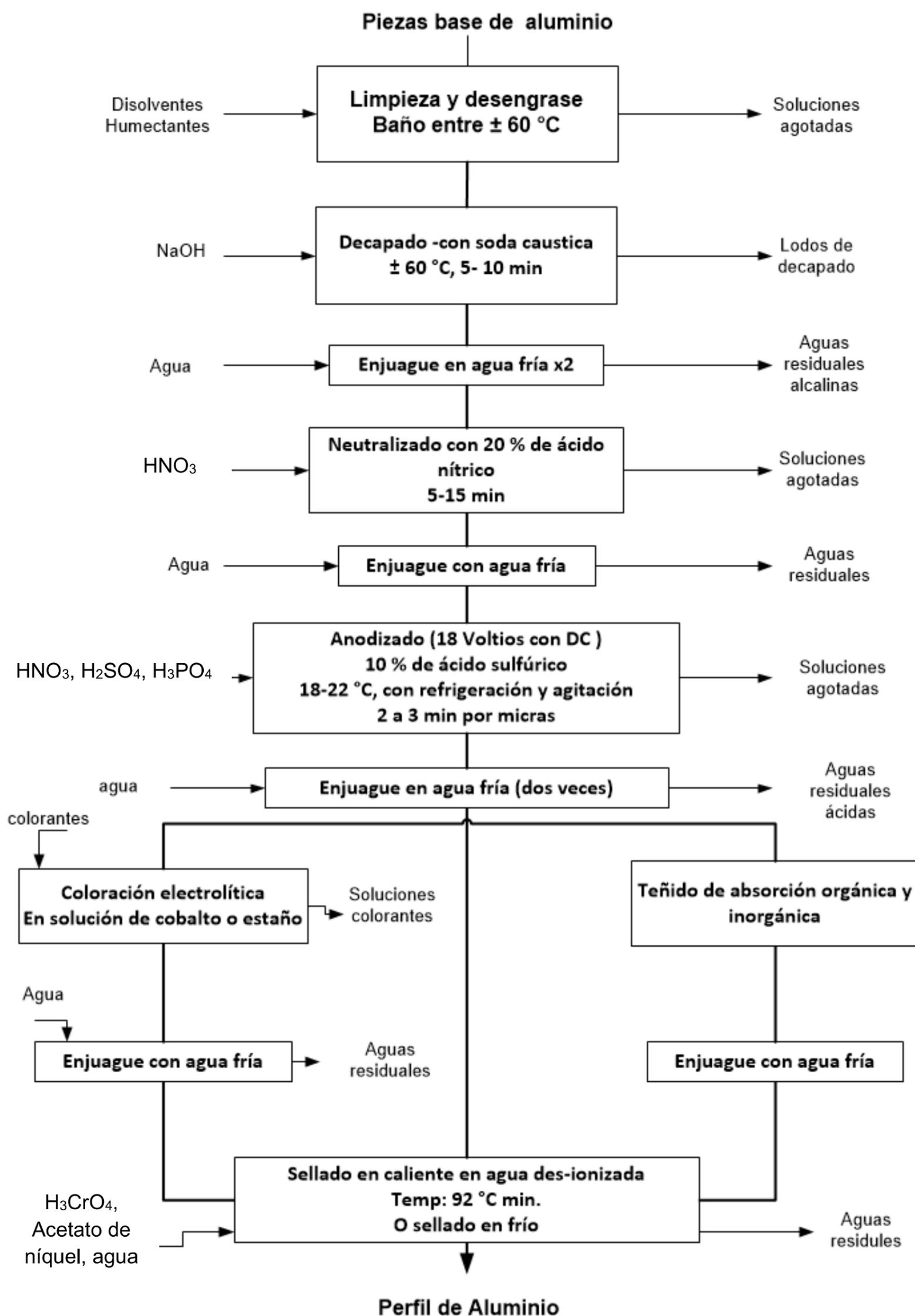


Figura 1.2. Diagrama de flujo de un proceso común de anodizado del aluminio (AFSA, 2004, p. 11)

A continuación se detalla cada uno de los procesos para la elaboración de los perfiles de aluminio.

1.1.3.1 Extrusión

El proceso de extrusión, consiste en atravesar al billete de aluminio caliente (480 – 550 °C) a alta presión (800 -6 000 toneladas) por una matriz. Luego, el aluminio formado es estirado y enderezado, para mantener sus medidas y posterior corte (Hidro-aluminium, 2005, pág. 15).

1.1.3.2 Tratamiento superficial

A partir de los procesos llevados a cabo durante el tratamiento superficial se logran dos importantes características en los perfiles de aluminio una es la protección contra los agentes atmosféricos y la otra es proporcionarle un aspecto decorativo o estético.

A continuación se describe las etapas del tratamiento superficial, que se muestran en la Figura 1.2.

Proceso de desengrase y limpieza, el desengrase consiste en la eliminación de cualquier tipo de grasa, ya sea de origen mineral o vegetal. La limpieza de las piezas es muy importante para los consecutivos baños electrolíticos, para alcanzar la máxima calidad de pre-tratamiento y la homogeneidad del resto de operaciones. Las soluciones desengrasantes son de tipo orgánicas e inorgánicas, tales como: percloroetileno estabilizado y solución nítrica respectivamente (Hufnagel, 2004, p. 723).

Los sistemas de limpieza y desengrase más comunes se muestran en la Tabla 1.2, donde se indica la variedad de productos químicos, condiciones de operaciones al igual que los efectos que producen en la base metálica.

Tabla 1.2. Medios para limpieza y desengrase del aluminio

Medio de Tratamiento	Efectos
1. Solución de sosa (10 a 20 % de NaOH), eventualmente con aditivos, 50 a 70 °C, es necesario un tratamiento posterior con ácido nítrico frío.	Decapado de la superficie metálica y eliminación de las capas de óxidos y productos de corrosión, originados por elevadas temperaturas, el ataque es a veces, irregular.
2. Ácido nítrico frío/ácido fluorhídrico (15 a 35 % HNO ₃ , 1 a 5 % HF) sol. de HNO ₃ al 10 % para el tratamiento posterior de costuras de soldaduras, lavado con agua completamente desalinizada (precaución).	En el medio de tratamiento 1, el ataque es menor, pero más uniforme.
3. Ácido fosfórico conteniendo plastificantes (con aditivos especiales, aplicación en frío y caliente).	Eliminación de productos de corrosión, limpieza y desengrase aplicados en caliente.
4. Solución de sosa débil conteniendo plastificante (2 a 5 %, 70 hasta 90 °C, 5 a 10 min).	Limpieza y desengrasantes por plastificantes y emulgentes, asimismo eliminación de aceites y grasas, así como partículas sólidas inorgánicas y pequeñas manchas de corrosión.
5. Desengrase hirviendo con limpiadores débilmente alcalinos, libre de silicatos.	Desengrase y ligero decapado, pequeña eliminación de material.
6. Emulsiones acuosas de disolventes.	Eliminación de residuos de aceites minerales y pequeñas partículas de polvo.
7. Disolventes orgánicos: percloroetileno, bencina especial, homólogos del benceno, diluciones de laca y limpiadores.	Eliminación de aceites y grasas minerales, vegetales y animales; actividad casi nula frente a partículas sólidas inorgánicas, que se eliminan con simple limpieza en frío con un paño. En instalaciones de desengrase en caliente, por el disolvente condensado que se desliza por las piezas.

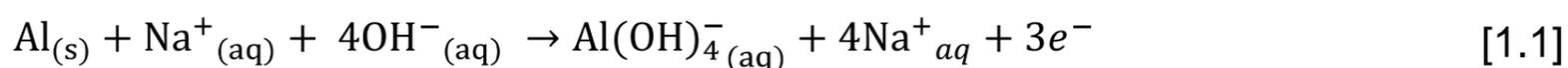
*(Hufnagel, 2004, p. 722)

En los medios de limpieza fuertemente alcalinos el pH es superior a 11,5 lo que conlleva una gran disolución del metal aluminio, pero se logra bloquear debido a la presencia de inhibidores tales como silicatos, cromatos, bórax, etc. Este proceso se realiza por emersión en cubas donde se encuentran los solventes. Las condiciones óptimas de este tipo de proceso se realizan de 5 o 10 min a 60- 80 °C, esto se ve favorecido con una agitación mecánica. Pues bien, para una operación típica para procesar 3 000 kg de aluminio extruido en estas condiciones básicas y de temperatura se estima pérdidas de 1-2 kg metal (Hufnagel, 2004, p. 722).

Otro medio de desengrase es el medio ácido, al igual que el alcalino éste se realiza por inmersión en cubas de acero inoxidable o cloruro de polivinilo durante 5 a 30 min (Hufnagel, 2004, p. 723).

Proceso de decapado alcalino/ácido, el proceso de decapado químico consiste en preparar al aluminio para el proceso siguiente, además le da a la superficie de aluminio una apariencia mate, como producto de la eliminación de una delgada capa de aluminio por disolución del metal. Se debe también resaltar que existen dos tipos de decapado, el alcalino y el ácido (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 410)

En el decapado alcalino se utiliza una solución de hidróxido de sodio, en un rango de concentración entre 50 y 200 g/L, y a una temperatura que va desde los 40 °C hasta los 70 °C. El baño caliente provoca que el ataque de sosa sea muy agresivo sobre la superficie de aluminio, lo que provoca la disolución de este metal según la reacción que se muestra en la ecuación 1.1.



En la ecuación 1.1 se observa que mientras aumenta la concentración de tetrahydroxoaluminato ($\text{Al}(\text{OH})_4^-_{(aq)}$) la actividad de la solución de hidróxido de sodio disminuye. Por otro parte, el tetrahydroxoaluminato formado en el baño se hidroliza y precipita como alúmina. En la Figura 1.3 se observa este fenómeno. Esta alúmina forma sarro en las cubas, espesa el baño y ensucia el perfil de aluminio. Generalmente para evitar este inconveniente, se añade 1 % de gluconato de sodio, que aglomera la alúmina. Además, se debe descargar una porción de la solución de decapado cuando la disolución del aluminio se pone demasiado alta, en otras palabras la solución se desgasta y es necesario nuevamente concentrarle con hidróxido de sodio y otra parte de esta solución de descarga a la plata de tratamiento de aguas residuales. Como consecuencia se genera un residuo con alto contenido de aluminio y en Europa se estima la producción de este efluentes en aproximadamente 14 000 m³ por año, por lo que provoca un continuo gasto de materias primas en este proceso. (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411; Tansens, Rodal, Machado, Soares, 2011, p. 455).

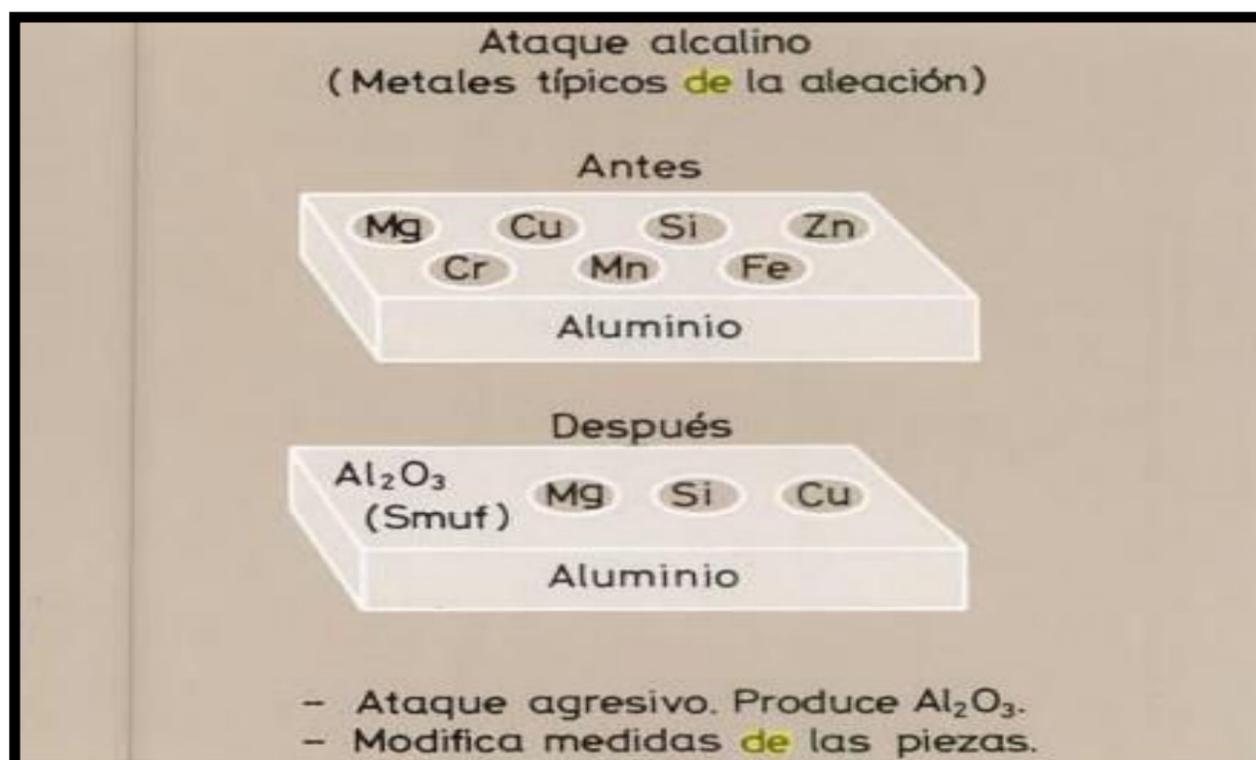


Figura 1.3. Decapado alcalino del aluminio
(Ortega, 1990, p. 73)

Por otro lado, el decapado ácido está constituido de una mezcla de ácidos como el nítrico (3-6 %), sulfúrico (10-20 %) y fosfóricos (80-85 %) a una temperatura entre 90-150 °C, que provocan una superficie amirror-shiny (efecto espejo). En la Figura 1.4 se muestra el resultado del decapado ácido, que es un ataque más controlado y menos fuerte, lo que provoca una superficie limpia (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 410).



Figura 1.4. Decapado ácido del aluminio
(Ortega, 1990, p. 73)

La diferencia entre el decapado ácido y alcalino, radica en que en el decapado ácido hay menos producción de alúmina, y las cotas del perfil no se ven modificadas. Además, el decapado ácido deja en perfectas condiciones la superficie de aluminio para el siguiente proceso (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411).

Proceso de neutralizado, uno de los motivos de este proceso es detener el ataque del hidróxido de sodio (decapado alcalino) del proceso anterior. Además, elimina los óxidos de los metales de la aleación de aluminio, disueltos en la superficie debido a los procesos de decapado y limpieza. La aparición de estos óxidos depende de la aleación de aluminio, como se observa en la Figura 1.1, donde se indica los diferentes metales utilizados en las aleaciones aluminio. Los óxidos más comunes son los de cobre, hierro, manganeso y silicio, que tienden a contaminar la solución de anodizado provocando un acabado del perfil de aluminio de mala calidad. Este proceso se lo realiza por inmersión de las piezas de aluminio en una solución de ácido nítrico diluido (Álvarez-Ayuso, 2009, p 410).

Proceso de anodizado, el anodizado es un proceso electrolítico que proporciona una densa capa oxido (A_2O_3) sobre la superficie de aluminio, la cual aumenta las propiedades de resistencia a los agente químicos y atmosféricos, le da mayor dureza y una excelente terminación para aplicaciones arquitectónicas (Ordoñez, 2012, p. 34).

En general, el sistema de anodizado está formado de una cuba con una solución electrolítica (20 % ácido sulfúrico), cátodo (polo negativo) inatacable (níquel o plomo) y un ánodo de aluminio conectados a fuente continua. La corriente que pasa a través de la solución de ácido sulfúrico es de 2 000 y 3 000 amperios, la cual provoca la reacción química y esto conlleva a la formación de una capa anódica en el aluminio. En esas condiciones, se observa un desprendimiento del hidrógeno por el lado del cátodo y ningún desprendimiento en el ánodo. Al mismo tiempo, se evidencia que en el ánodo de aluminio se genera una capa de óxido de aluminio, que le cubre a éste. (Ordoñez, 2012, p. 34)

En la Figura 1.5, se muestra e esquema del proceso de anodizado de aluminio.

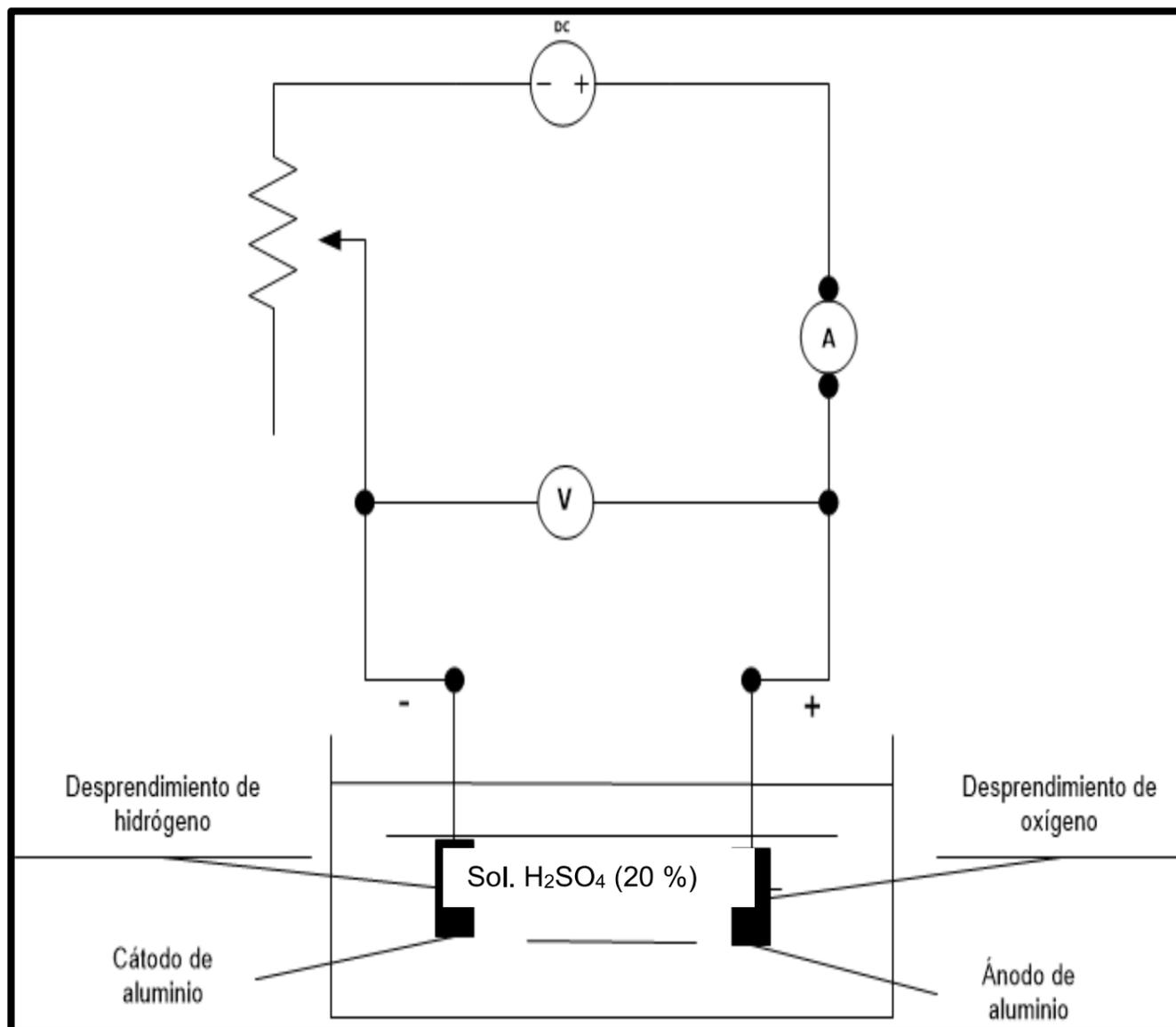


Figura 1.5. Representación esquemática del proceso de oxidación anódica para los perfiles del aluminio
(Lizarbe, 1984, p. 467)

El oxígeno es suministrado por la disociación electrolítica del agua, que es utilizada para oxidar el aluminio del ánodo. La ecuación 1.2, describe la reacción del proceso de anodizado, donde se indica que en el perfil de aluminio se genera nano poros debido al voltaje aplicado y al medio ácido.

Por otro lado, las reacciones que se dan tanto en el cátodo como en el ánodo se muestran en las ecuaciones 1.3 y 1.4, respectivamente (Sifco, 2010, p. 2; Jai, Ali y Fawcett, 2011, p. 491; Asthana, Kumar y Dahotre, 2006, p. 345)



Los cinco principales tipos de anodizado son: cromito, sulfúrico, fuerte, bórico- sulfúrico y fosfórico, cada uno de estos procesos se detallan en la Tabla 1.3 donde se indica la finalidad y el espesor de la capa en la superficie de aluminio.

Tabla 1.3. Información de los cinco tipos de anodizado

Tipo de Recubrimiento	Finalidad de recubrimiento	Típico Espesor (in)
Crómico	Protección contra la corrosión. Base para pintado y acabados orgánicos.	0,00005-0,0003
Sulfúrico	Corrosión y/o resistencia al desgaste.	0,0001-0.001
Recubrimiento duro	Principalmente resistencia al desgaste, pero también protección contra la corrosión.	0,0005-0,0045
Bórico-sulfúrico	Protección contra la corrosión.	0,00002-0,0007
Fosfórico	Base para el pegado.	0,00005-0,0001

*(Totten y Mackenzie, 2003, p. 500)

El anodizado con ácido sulfúrico es el tipo más común realizado en la industria, esto se debe a varios aspectos tales como: económicos, alta dureza, resistencia química y satisfactorios resultados en el acabado. Las condiciones de trabajo para este tipo de anodizado son: la concentración de ácido sulfúrico está dentro de un rango de 16-18 %, temperatura de 18-20 °C, una densidad de corriente de 1 A/dm² a 2 A/dm² (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 410).

Proceso de coloreado, la capa de óxido de aluminio formada en el proceso de anodizado que se mostró en el Figura 1.5, crea una superficie con una estructura porosa, transparente e incolora. Esta capa tiene la capacidad de absorber ciertos colorantes orgánicos o inorgánicos, a este proceso se lo conoce como teñido de absorción. Otro tipo de proceso es la coloración electrolítica, donde se sumerge el perfil de aluminio en soluciones de cobalto o estaño. En la Figura 1.6, se muestra claramente los poros formados, donde el colorante puede ingresar (Anderson, 2008, p. 3).

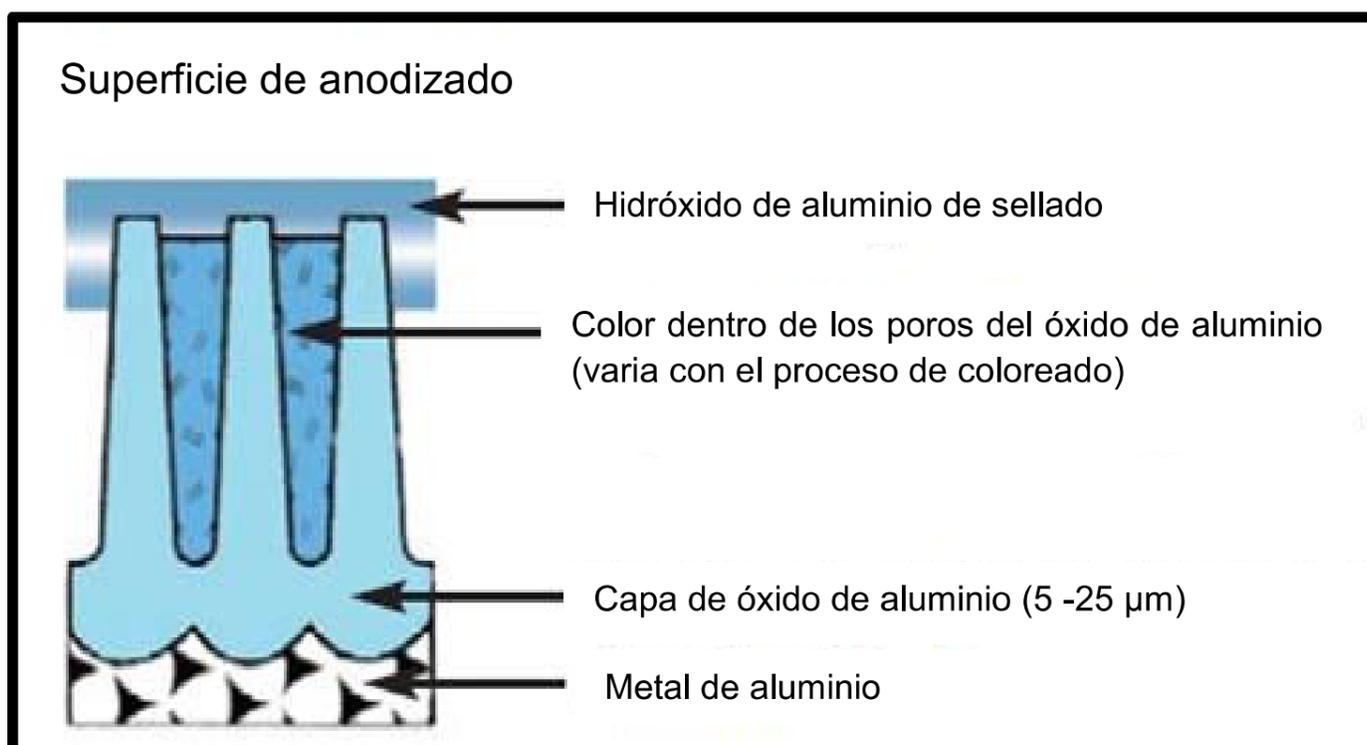
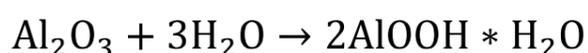


Figura 1.6. Formación de la capa porosa de óxido de aluminio (AFSA, 2004, p. 12)

Proceso de sellado, este proceso conserva la apariencia de anodizado durante su vida de servicio, esto lo hace al cerrar los poros superficiales generados en el anodizado. Además el sellado es el último de los pasos del proceso del proceso de anodizado. Este proceso consiste en sumergir la pieza de aluminio coloreada en agua hirviendo (97- 100 °C) a pH $6,0 \pm 0,5$, por un período de 2 y 3 minutos. En estas condiciones se produce una reducción de la porosidad, incremento de la capacidad de retención de los colorantes y un aumento en la resistencia a la corrosión (Cembrero, Ferrer, Pascual y Pérez, 2005, p. 73; Castaño y Echeveria, 2010, p. 4).

Lo que se induce a través del sellado es la formación de varios tipos de alúminas hidratadas gelatinosas, resultando un aumento de volumen que motiva a ocupar el espacio de los poros. Una de las alúminas hidratadas formada es la bohemita (Castaño y Echeveria, 2010, p. 4; Le Blanc, 2009, p. 18).

La reacción química para el sellado en agua se muestra a continuación en la ecuación 1.5, donde se forma una alúmina hidratada, que en general es la bohemita.



[1.5]

1.2 MÉTODOS UTILIZADOS PARA EL PROCESAMIENTO Y VALORACIÓN DE LOS LODOS ANÓDICOS

1.2.1 LODOS ANÓDICOS PRODUCIDOS EN EL PROCESO DE ANODIZADO DE PERFILES DE ALUMINIO

La gran parte de la producción de perfiles de aluminio se realiza a partir de los procesos desengrasado/limpieza, decapado, anodizado, coloreado y sellado, y estos procesos se efectúan por inmersión en tanques de 20 m³ a 24 m³. En estas condiciones, los procesos para la elaboración de los perfiles de aluminio consumen una gran cantidad agua (221,82 m³/día). Además, estas aguas son descartadas periódicamente cuando su actividad química está por debajo de un nivel aceptable para su propósito, dejando así una gran cantidad de agua residual que debe ser tratada, en la planta de tratamiento de aguas (Gomes, Labrincha y Novaes de Oliveira, 2005, p. 9 501; Solís, 2008, p. 29).

La depuración común de los efluentes líquidos de la industria de anodizado, que provienen de las aguas concentradas de los baños químicos (alcalino e ácidos) es la mezcla de estos residuos, luego pasan a una floculación y por último filtración por prensa. El producto final de estos procesos son los lodos anódicos. La cantidad de estos producen problemas relacionados con la gestión de residuos, almacenamiento y/o costos de transporte (22 -30 USD) para su eliminación. Además estos lodos anódicos son un pasivo ambiental para las empresas de producción de perfiles de aluminio. (Gomes, Labrincha y Novaes de Oliveira, 2005, p. 9501; Correia et al. 2005, p. 341; González et al., 2000, p. 3; Ferreira y Olhero, 2001, p. 2 243).

Unos datos importante son la cantidad generada por los países de la Unión Europea que esta alrededor de 100 000 toneladas métricas de lodos anódicos por año, mientras que en Brasil se encontró que por cada tonelada de aluminio anodizado, una tonelada de lodo anódico se genera. La Tabla 1.4, muestra las caracterización de aguas residuales que se producen en una planta anodizado de aluminio (Gomes, et al., 2005, p. 9 501; Moraes et al., 2010, p. 119).

Tabla 1.4. Caracterización de las aguas residuales de una planta de anodizado (capacidad de la planta: 2 500 toneladas/mes)

Descripción	Aguas residuales alcalinas	Aguas residuales ácidas	Aguas de enjuague
pH	Sol. Fuerte alcalina	Sol. Fuerte ácida	4-5
Temperatura de líquido (°C)	15-60	15-60	15-25
NaOH (%)	5-7	----	----
H ₂ SO ₄ (%)	----	15	----
Al ³⁺ (%)	5,0-9,0	1,5-1,8	
^a Sólidos suspendidos (mg/L)	----	----	100-200
Flujo	56 m ³ /día	60 m ³ /día	250 m ³ /h

*(Le Blanc, 2009, p. 102). (a) Principalmente Al (OH)₃ insoluble

Generalmente, estos lodos anódicos tienen una composición variada, pero están constituidos básicamente por agua (85 % de humedad), hidróxido de aluminio, sulfatos de aluminio, y sales solubles de Na, K, Ca, Mg (Correia et al., 2005, p. 341; Ferreira y Olhero, 2001, p. 2 243).

Los lodos anódicos se eliminan colocándolos en rellenos sanitarios. Por lo que, posteriormente, los lodos anódicos representan un gran problema medio ambiental, cuya solución es urgente y necesaria. Sin embargo, se han encontrado alternativas de reutilización o reciclaje del lodo anódico, contribuyendo a la reducción y la generación de materias primas mediante procesos adecuados (Mitrakas, Bakaloulis y Gkinis, 2010, p. 2; Gomes, et al., 2005, p. 9 501).

1.2.2 VALORACIÓN DE LOS LODOS ANÓDICOS

El campo de aplicación de los lodos ha sido la industria cerámica, tratamiento de aguas residuales y reciclaje, debido a que muchos investigadores lo han encontrado como un elemento valioso al aluminio. Una de sus aplicaciones es la incorporación de este lodo anódico a la industria del cemento, vidrio y cerámica refractaria, debido a que tienen altos contenidos de alúmina (Al₂O₃), mullita (3Al₂O₃·2SiO₂) y cordiorita (2Al₂O₃·5SiO₂·2MgO), previo proceso de calcinación. Con este antecedente, se ha estudiado el diseño de una composición adecuada,

mezclando el lodo anódico con materiales cerámicos como caolín y diatomea, para la formulación de cuerpos refractarios. Por otro lado, se han probado en la formación de pigmentos, debido a la transformación de los lodos anódicos en una estructura cristalina llamada mullita (Ribeiro, Abrantes y Labrincha, 2006, p. 300; Ferreira y Olhero, 2001, p. 2 243; Chavez y Machuca, 2007, p. 1; Khezri, Poshtegal, Khoramipour, Ghafari, 2010, p. 1 158).

Mitrakas et al. (2010), en sus estudios obtuvieron valores del área superficial de los lodos anódicos, que están comprendidos entre 60 y 216 m²/g. Con estos valores y además de su composición, ellos utilizaron los lodos anódicos en la adsorción de arsénico (V) en aguas residuales industriales (p. 5).

El hidróxido de aluminio presente en la composición de los lodos, se utiliza para la producción de sulfato de aluminio y aluminato de sodio bajo previos tratamientos. El sulfato de aluminio se ha utilizado como floculante para la purificación de efluentes líquidos municipales y para los efluentes generados en la industria de la pintura, Por otro lado, el aluminato de sodio se utiliza como agente de encolado para la producción del papel. Por lo tanto, el lodo anódico constituye un beneficio ecológico (Iranzo, 2002, p. 2; Correia et al., 2005, p. 342; Correia Chambino, Gonçalea, Ribeiro, Bartolomeu, 2001, p. 129; González et al., 2000, p. 1).

Por otra parte, las aguas de decapado alcalino contienen una alta concentración de hidróxido de sodio, por lo que los investigadores han encontrado algunos métodos para su recuperación. Uno de ellos consiste en la utilización de resina catiónica para la retención de soda, la Figura 1.7 detalla el sistema en sí (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411; Jaramillo, 2006, p. 43).

El sistema consiste en alimentar las aguas de decapado a un filtro de arena para eliminar los sólidos que se encuentran como coloides, luego pasan un tanque donde se encuentra una resina catiónica llamada amberlita. La resina catiónica separa el aluminio presente en las aguas y la solución con sosa se recupera, que pasa a ser reciclado tanto en los procesos de decapado como los de lavado (Jaramillo, 2006, p. 43).

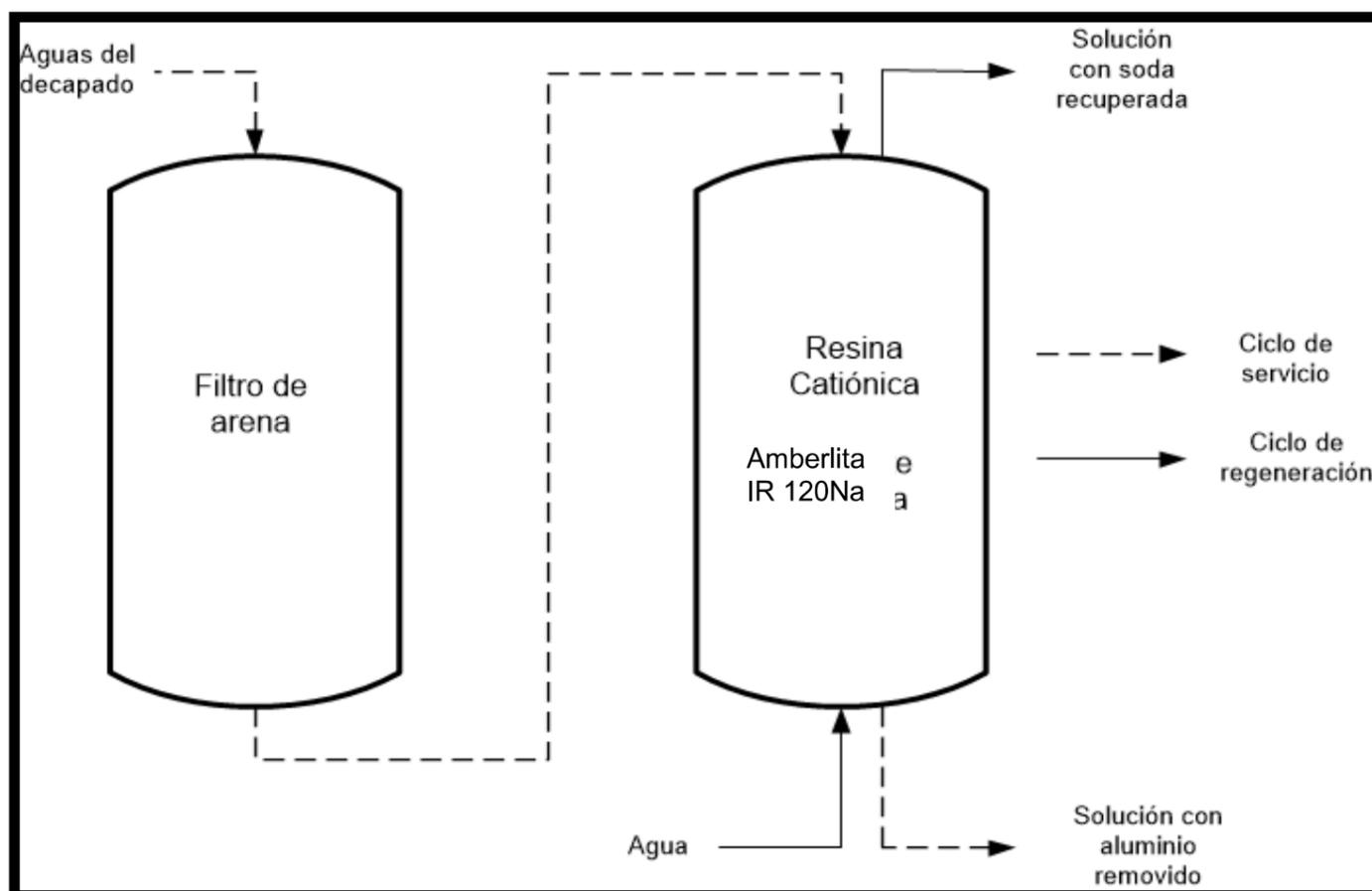


Figura 1.7. Secuencia para el intercambio iónico para la recuperación de hidróxido de sodio de los efluentes del baño de decapado
(Jaramillo, 2006, p. 43)

Otro proceso para el tratamiento de las aguas de decapado que se da a la base de aluminio está basado en el proceso de Bayer. Tal sistema, consiste en la transformación del aluminato de sodio en hidróxido de aluminio (alúmina hidratada). La primera reacción que ocurre en este proceso se muestra en la ecuación 1.6, donde el aluminio reacciona con el hidróxido de sodio (Jaramillo, 2006, p. 43; Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411)



La operación consiste en bombear las aguas continuamente a un tanque cristizador donde se siembra semillas de alúmina cristalizada, lográndose así la formación de la alúmina hidratada, más conocida como bohemita. En la Figura 1.8, se muestra esquemáticamente el sistema, el cual está formado de un proceso de cristalización junto a una centrifugación, que permiten obtener un producto con una buena pureza. La segunda reacción para la formación de hidróxido de aluminio cristalizado se indica en la ecuación 1.7, así como también la liberación del hidróxido de sodio (Jaramillo, 2006, p. 43; Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411).



[1.7]

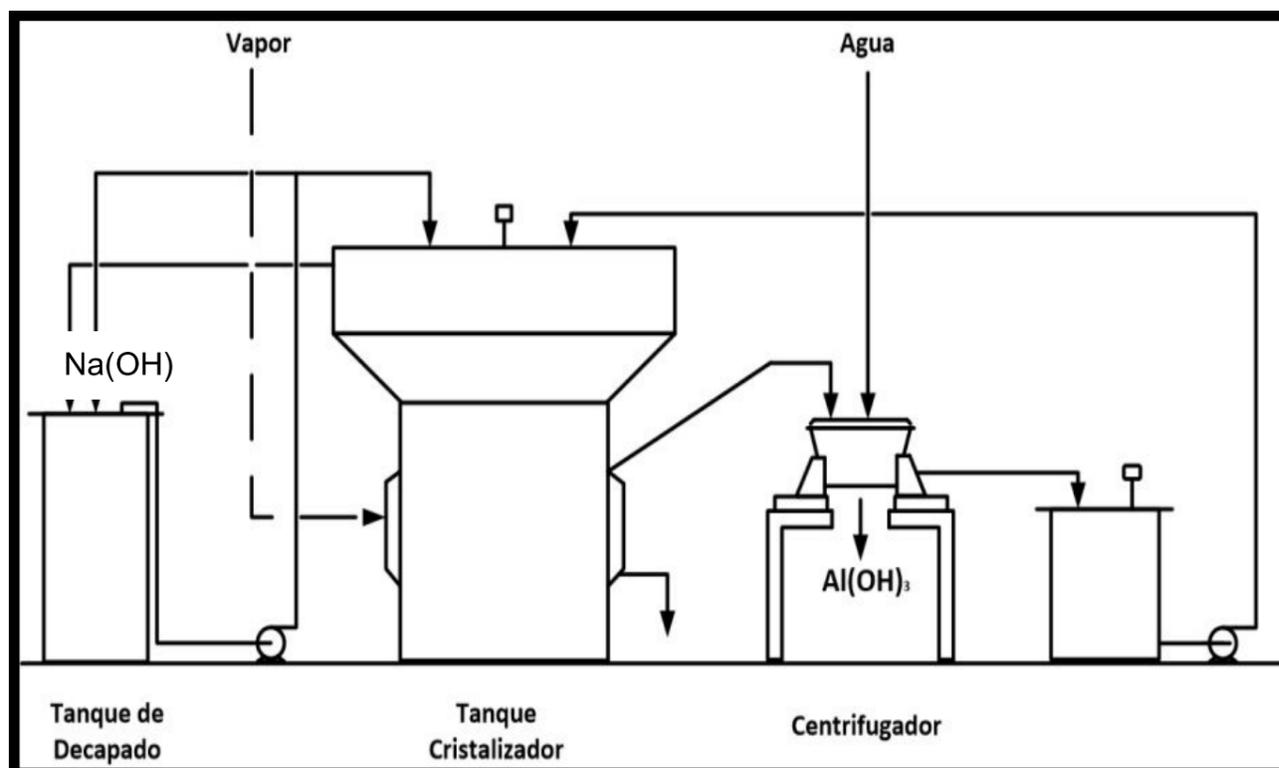


Figura 1.8. Sistema de producción de hidróxido de aluminio y la regeneración de la sosa caústica

(Tansens, Rodal, Machado y Soares, 2011, p. 464)

La alúmina hidratada se coloca en el inferior del cristalizador, reduciendo así los niveles de concentración de aluminio y liberando la sosa caústica. Esta sustancia cristalizada es susceptible a la comercialización, mediante previos tratamientos como centrifugación y secado, mientras que el hidróxido de sodio recuperado puede ingresar nuevamente al baño de decapado (Álvarez-Ayuso, 2009, p. 411).

A partir de este proceso se logra la recuperación del 82 % del aluminio presente en las aguas de decapado y se logra regenerar el hidróxido de aluminio para ser utilizado nuevamente. El desarrollo de este método brinda dos soluciones. La primera consiste en bajar los costos de producción a partir de la recuperación del hidróxido de sodio y la segunda es la comercializar del hidróxido de aluminio de alta pureza (97 %) (Tansens, Rodal, Machado y Soares, 2011, p. 464)

Un estudio detallado de la efectividad del proceso de producción de hidróxido de aluminio y la regeneración de hidróxido de sodio a partir de las aguas de decapado, se muestra en Tabla 1.5. El sistema logra reducir 85 % de los sólidos de estas aguas.

Tabla 1.5. Cantidad de sólidos generados en el proceso de decapado y anodizado

Aluminio disuelto en proceso de decapado (38µm decapado)	9,2	kg
Aluminio disuelto en el Anodizado (19 µm películas anodizadas)	0,93	kg
Desperdicio sólidos producidos (15 % w/w de solidos)	196	kg
Residuos sólidos producidos usando la regeneración de las aguas de decapado	29	kg
Residuos reducidos con la regeneración de las aguas de decapado	85	%

*(Pajunen, 1999, p. 1)

En cambio, en el proceso de anodizado de los perfiles se acumula una gran cantidad de este aluminio, por lo que es necesario remplazar la solución electrolítica (ácido sulfúrico) por una nueva. Así se logra remover continuamente el aluminio disuelto en este baño. Por este motivo existe la oportunidad de recuperar el ácido sulfúrico y se ha hecho viable por la sorción ácida, en la Figura 1.9 se muestra el proceso de recuperación del ácido (Jaramillo, 2006, p. 45).

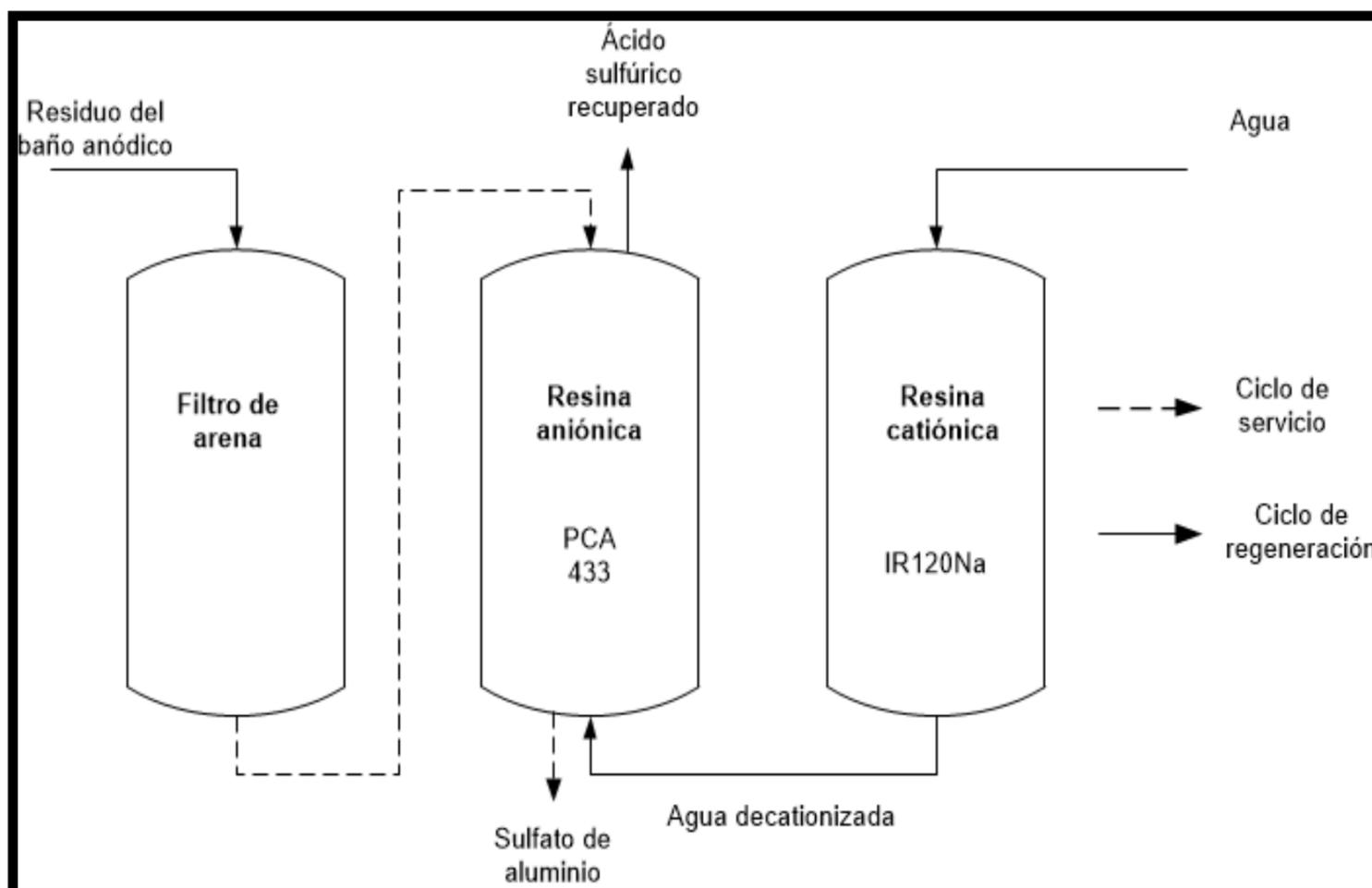


Figura 1.9. Recuperación de ácido sulfúrico del proceso de anodizado, a partir de resinas catiónicas
(Jaramillo, 2006, p. 43)

El proceso consiste principalmente en la recuperación de ácido sulfúrico mediante la remoción de contaminantes metálicos disueltos (iones) de los baños ácidos. Las aguas ácidas atraviesan primero por un filtro de arena para luego pasar por resinas de intercambio iónico, éstas dejan pasar a los cationes contaminantes, pero logran retener los ácidos (proceso de sorción). Y por último, se recupera el ácido sulfúrico con bajos contenidos de aluminio, al hacer pasar las resinas por agua caliente para producir la desorción del ácido. El esquema que detalla este sistema se puede ver en la Figura 1.9 (Jaramillo, 2006, p. 45).

Las alternativas de valoración de los lodos anódicos descritas anteriormente se logran reducir el impacto ambiental negativo asociado a los rellenos sanitario así como la preservación de los recursos no renovables de la naturaleza. Así pues, estos procesos han creado un camino hacia el desarrollo sustentable, a través de la recuperación de las materias primas las cuales pueden ser reutilizadas o comercializadas (Tansens, Rodal, Machado y Soares, 2011, p. 464).

1.2.3 SOLUBILIDAD DEL HIDROXIDO DE ALUMINIO EN MEDIO ÁCIDO Y BÁSICO

La solubilidad del hidróxido de aluminio varía fuertemente con el pH, además este compuesto tiene carácter anfótero, en otras palabras es tanto soluble en medio ácido como en medio básico. Por el lado ácido, el aluminio se disuelve produciendo el catión aluminio Al^{+3} , por el medio básico, se forma el anión aluminato (AlO_2^-), y la mínima solubilidad del hidróxido de aluminio se tiene en un rango de pH de 6,7 a 7,5. No obstante, se debe tener en cuenta que el aluminio forma complejos estables con tartratos, citratos y oxalatos. Las reacciones en medio ácido como en medio básico se muestran en las ecuaciones 1.8 y 1.9 (Boaventura, Duarte y Almeida, 2000, p. 2).



En la Figura 1.10 se muestra la solubilidad de los lodos de agua de tratamiento de efluentes con alto contenido de aluminio en función del pH, donde se indica que la mejor recuperación de aluminio en medio ácido se tiene en un rango de bajo pH (1 a 4.5), mientras que en medio ácido se tiene la mejor extracción a pH 13.6.

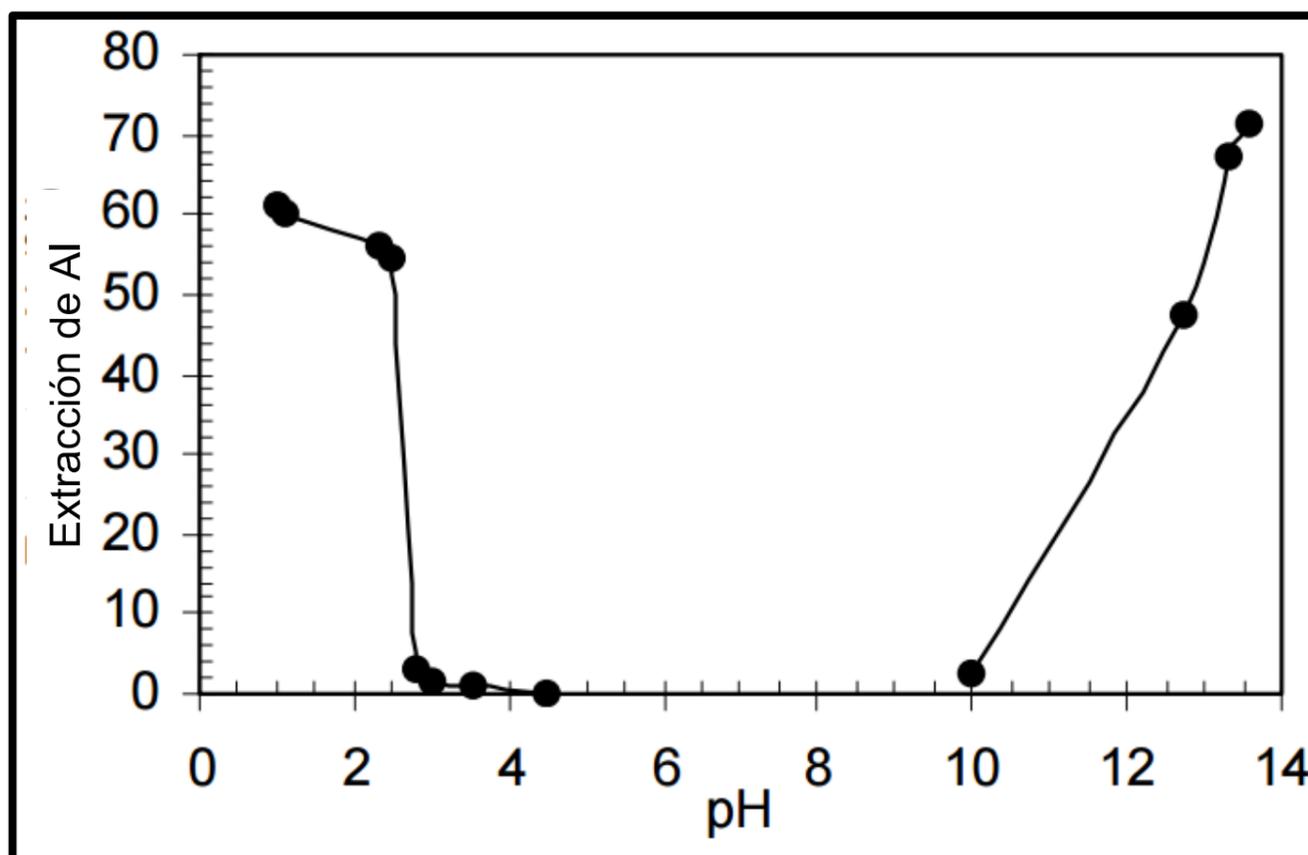


Figura 1.10. Efecto del pH en la recuperación de aluminio
(Boaventura, Duarte y Almeida, 2000, p. 3)

1.3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES ALÚMINA Y MULLITA

1.3.1 ALÚMINA

La alúmina es el material cerámico más ampliamente usado y estudiado tanto en su estado puro o en combinación con otros elementos. La abundancia y los bajos costos de la materia prima hacen que la producción de la alúmina sea comercialmente ventajoso. Por lo que, los usos de este material son muy amplios debido a su variedad de propiedades. Además, las propiedades y características de este material varían considerablemente con la composición, densidad y tamaño de grano, esto hace que sea muy estudiado. La principal fuente de este material es el mineral llamado Bauxita, que mediante el proceso Bayer se puede extraer.

Comercialmente existe la alúmina anhidra, llamada corindón y las hidratadas conocidas como óxidos hidratados, entre estos se encuentran la gibbsita y bohemita. (Shackelford y Doremus, 2008, p. 1; Wagh, 2004, p. 36)

1.3.1.1 Estructura cristalina de la Alúmina (corindón).

El óxido de aluminio cristalino más conocido es el corindón y es una de las formas más estables termodinámicamente. Tanto las características como las propiedades del corindón se ven reflejado en su estructura tridimensional. Por lo que, en la estructura del corindón ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), el paquete de aniones de oxígeno están en un arreglo hexagonal formando capas paralelas al plano, con una secuencia de apilamiento AB-AB, y los cationes de aluminio ocupan las posiciones disponibles del octaedro como lo muestra la Figura 1.11. Esto hace que su estructura sea muy compacta (Hudson, Misra, Perrotta, Wefers, Williams, 2005, p. 4; Askeland, Fulay y Wright, 2002, p. 89).

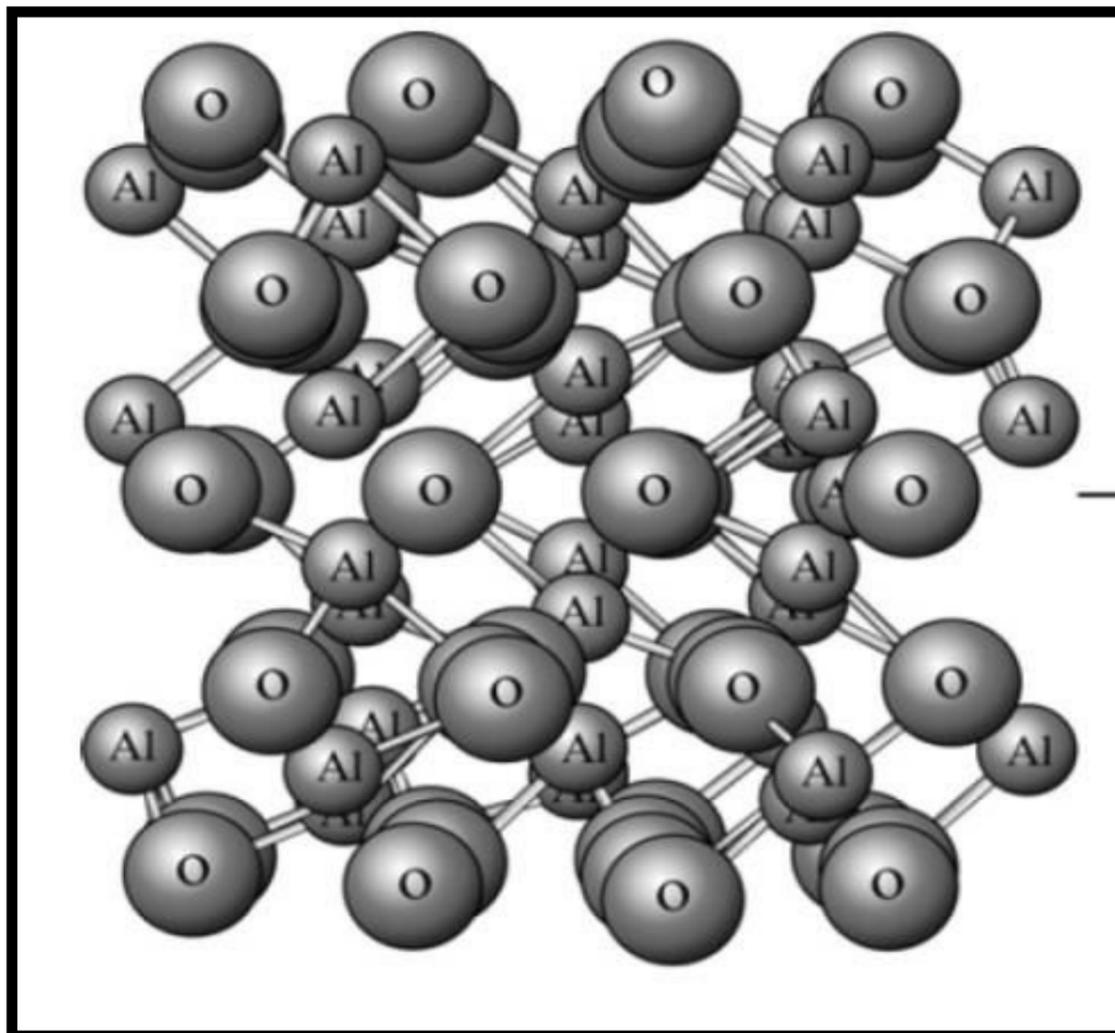


Figura 1.11. Estructura del corindón
(Shackelford y Doremus, 2008, p. 5)

1.3.1.2 Sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

El diagrama de fases del sistema binario $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ es el más importante debido a que el óxido de aluminio y el óxido de silicio son los componentes de muchos materiales refractarios. En la Figura 1.12 se muestra el diagrama de fases de este sistema (Shackelford y Doremus, 2008, p. 6).

El diagrama de fases silicio-alúmina de equilibrio consta de un amplio rango de aluminos-silicatos, entre ellos se observa sílice, semisilica, arcilla refractaria, baja alúmina, mullita, alta alúmina y corindón. El silicio en su forma polimórfica conocida como cristobalita es estable hasta los $1\,587\text{ °C}$. Además se puede observar que el silicio y la alúmina no son solubles una en otra. Finalmente, otra particularidad de este diagrama es la formación de mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 - 2\text{SiO}_2$), que se produce alrededor del 72 % en peso de Al_2O_3 y funde en forma incongruente a $1\,828\text{ °C}$. Y a más altas temperaturas se observa el incremento de alúmina en mullita, y también se puede apreciar alguna solubilidad de SiO_2 (cristobalita) en Al_2O_3 (corindón) para formar mullita. (Shackelford y Doremus, 2008, p. 6; Kleebe, Siegelin, Straubinger y Ziegler, 2001, p. 2 521)

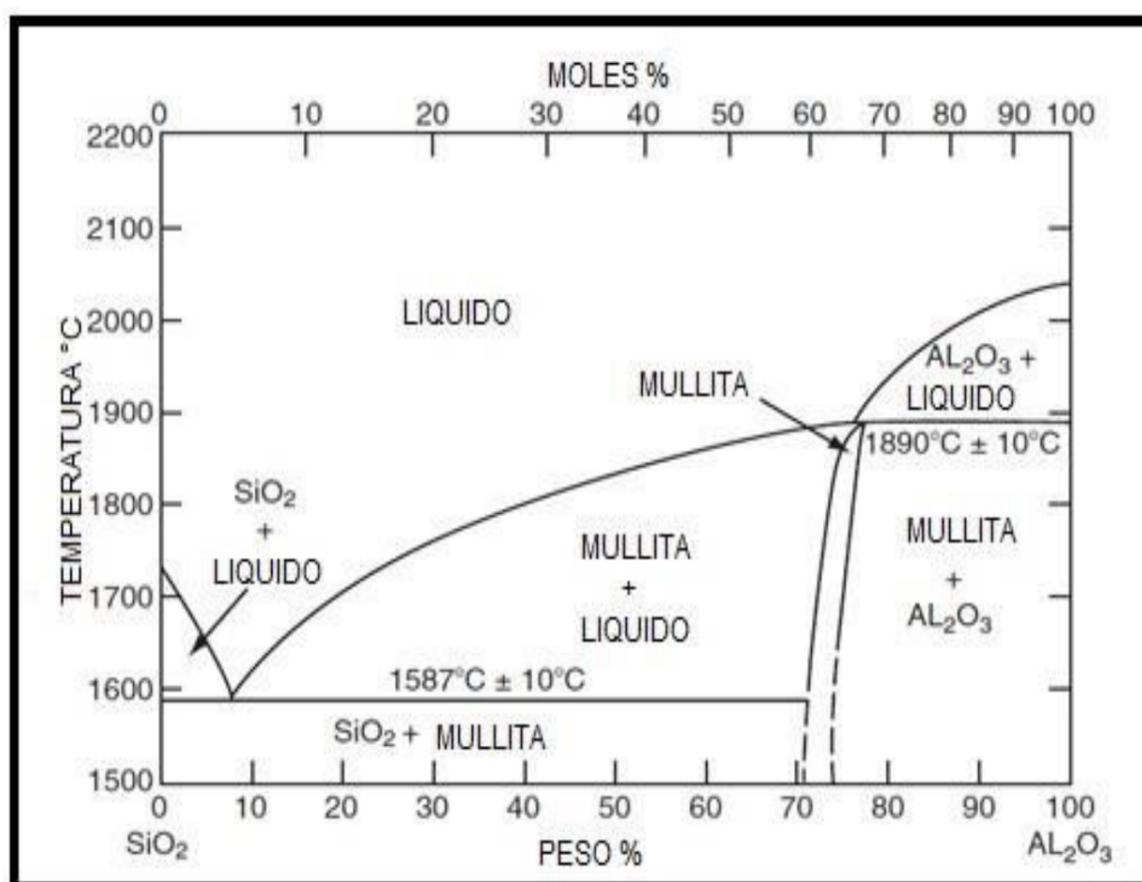


Figura 1.12. Diagrama del sistema en equilibrio de $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (Shackelford y Doremus, 2008, p. 6)

1.3.1.3 Producción de alúmina por el método Bayer

El proceso más conocido para extraer alúmina del mineral bauxita es el llamado proceso Bayer, que fue patentado por Karl Bayer en 1888. Es el más viable económicamente, que se dispone durante más de 100 años, pero que ha venido innovándose tecnológicamente a través del tiempo para bajar los costos de producción (Davis, 2010, p. 113).

El mineral bauxita está constituido principalmente de óxidos hidratados de aluminio, tales como la gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), boehmita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), diáspora ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$) y de impurezas de hierro, silicio y titanio. Además, contiene el 45,5 % en peso de Al_2O_3 y menos del 20 % de Fe_2O_3 y 3,5 % de SiO_2 . Por otro lado, cerca del 15 % del mineral se utiliza para la producción de alúmina, mientras que la otra parte se emplea para la obtención de aluminio metal (Hufnagel, 2004, p.10; Cornelis, Cornelius y Hurlbut, 2003, p. 440; Mohanty, Biswal, Reddy y Misra, 2003, p. 30; Karamalidis y Dzombak, 2010, p. 4).

El proceso Bayer consiste en la transformación de la bauxita en alúmina mediante los siguientes subprocesos: trituración y molienda, digestión, clarificación, precipitación y calcinación, como se observa en la Figura 1.13.

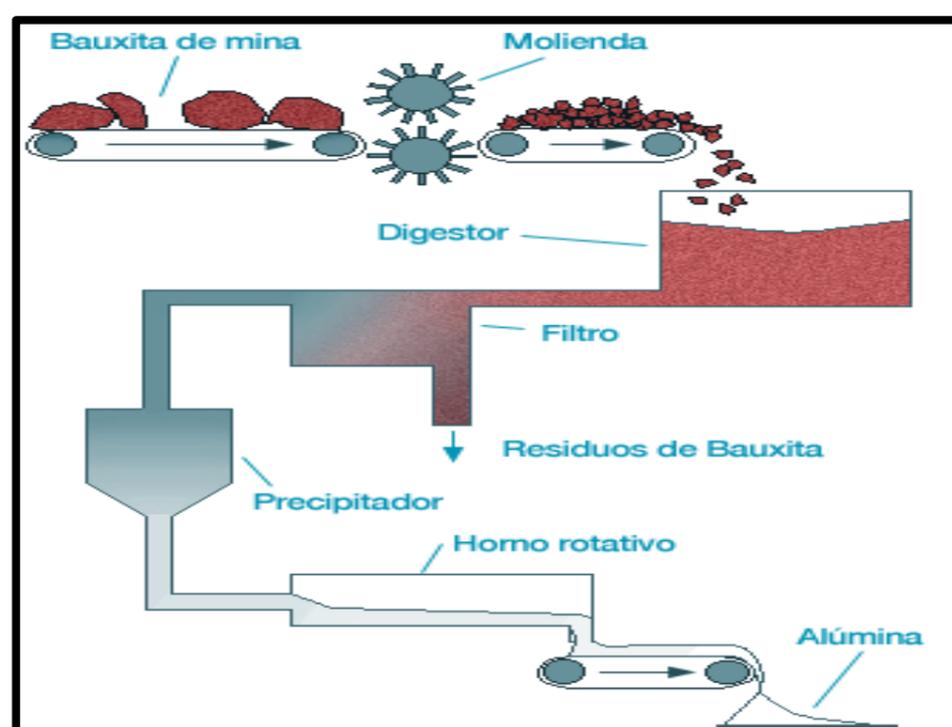


Figura 1.13. Proceso Bayer para obtener alúmina.
(Hidro aluminium, 2005, p. 27)

Trituración y molienda: el proceso Bayer comienza con una trituración para alcanzar un tamaño uniforme. Con este fin, se utiliza una trituradora de martillo para que el mineral alcance un diámetro menor a 30 mm. Luego el material triturado es alimentado a grandes molinos, y se mezcla con una solución alcalina (hidróxido de sodio) caliente, para asegurar suficiente contacto sólido-líquido, mejorando así la eficiencia de extracción de la alúmina en la digestión. El proceso de molienda sigue hasta alcanzar un tamaño de partícula de 1,5 mm (Mohanty et al., 2003, p. 29; Mantell, 2003, p. 365; Kogel, Trivedi, Barker y Kruskowski, 2006, p. 238-239; Karamalidis y Dzombak, 2010, p. 4).

Proceso de digestión: el mineral molido se introduce en una autoclave junto con sosa cáustica y se trata a una presión de 4 atmósferas de vapor, por ocho horas y 150 °C. En este ataque solo se disuelve Al_2O_3 de otros óxidos insolubles. Las condiciones de ataque van a cambiar dependiendo de la composición de la bauxita. Las reacciones químicas que se producen en este proceso se muestran a continuación en las ecuaciones 1.10 y 1.11 (Mantell, 2003, p. 365; Kogel et al. 2006, p. 239).

Para la gibbsita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)



Para la bohemita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

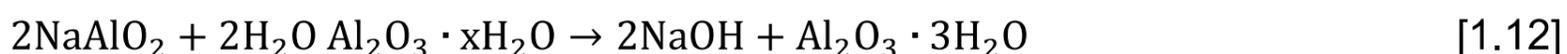


El licor resultante llamado suspensión contiene aluminato de sodio disuelto y metales no disueltos como hierro, silicio y titanio. Estas sustancias no disueltas son residuos comúnmente llamados “lodo rojo” (Karamalidis y Dzombak, 2010, p. 4; Davis, 2010, p. 113).

Proceso de clarificación: consiste en separar y eliminar mediante tanques de decantación, sedimentación y filtración, las sustancias no disueltas en la anterior

etapa. La solución clarificada está compuesta principalmente de aluminato de sodio que ingresará a la siguiente etapa (Davis, 2010, p. 113).

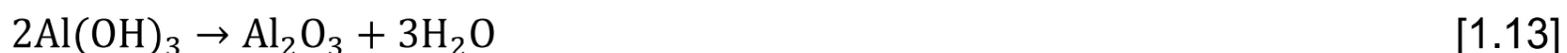
Proceso de cristalización: la solución de aluminato de sodio se lleva a depósitos de precipitación, donde se añade semillas de cristales de hidróxido de aluminio. Además, junto a una agitación lenta se favorece la hidrólisis del aluminato de sodio, por lo cual precipita la alúmina hidratada, como se indica en la ecuación 1.12. Por último, la sustancia precipitada se sedimenta, se lava y se seca (Misra, 2003, p. 20, Kogel et al. 2006, p. 365).



Igualmente, el licor de sosa se reconcentra por evaporación para luego ser calentado y se recicla para que vuelva al digestor con el objetivo de disolver más alúmina (Misra, 2003, p. 20)

Proceso de calcinación: la alúmina hidratada se calcina en hornos rotatorios, entre 900 °C a 1 100 °C para la producción del metal aluminio, mientras para obtener α -Alúmina se calcina entre 1 200-1 400 °C. Además, para bajar esta temperatura se añade sales de fluoruro (Mantell, 2003, p. 365; Kogel et al. 2006, p. 238-239; Karamalidis y Dzombak, 2010, p. 4).

La reacción producida durante la calcinación a 1 200 °C se muestra en la siguiente ecuación 1.13, donde se indica que existe un proceso de deshidratación:



Las alúminas hidratadas que se generan a bajas temperaturas, son las llamadas de transición, que son óxidos de aluminio con una estructura específica y propiedades inherentes para cada una de ellas. Una gran variedad de óxidos de aluminio se puede obtener a determinadas temperaturas, pero con la particularidad de que siempre se llega α -alúmina, como lo muestra la Figura 1.14 (Kogel et al., 2006, p. 253).

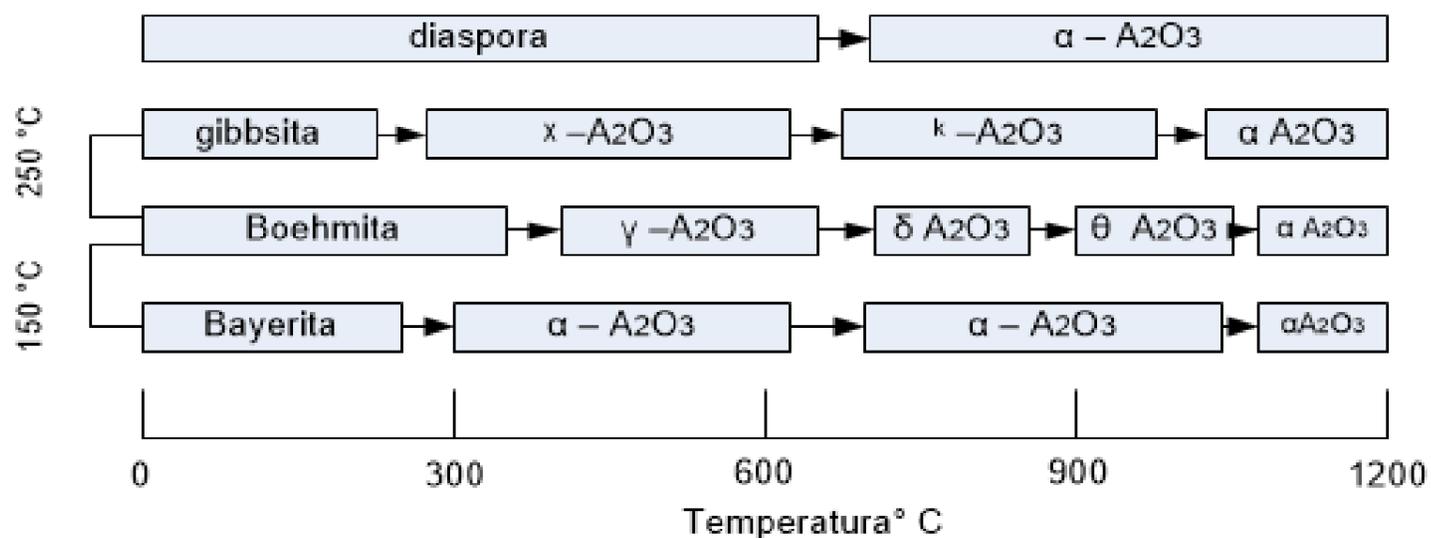


Figura 1.14. Secuencia de descomposición térmica de los hidróxidos de aluminio hasta transformarse en α - Al_2O_3 .

(Karamalidis y Dzomback, 2010, p. 30)

En general, el proceso Bayer ha tenido algunas modificaciones para intentar resolver el problema del contenido de impurezas como SiO_2 y Fe_2O_3 que provocan problemas en el proceso de refinación y por lo tanto gasto económicos (Hudson et al., 2005, p. 11).

En estas últimas décadas, los investigadores están buscando nuevas materias primas diferentes a la roca bauxita, a consecuencia de los elevados aranceles impuesto a esta roca. Una alternativa de materia prima para obtener Al_2O_3 está enfocada en las arcillas y silicatos aluminosos presentes en los residuos de lavado de la hulla, que se ha convertido una materia prima muy importante (Hudson et al. 2005, p. 12)

1.3.1.4 Propiedades y aplicaciones de la alúmina

Las aplicaciones del óxido de aluminio (Al_2O_3) se deben a su gran variedad de propiedades inherentes. Una de estas propiedades es la gran estabilidad química y la no reactividad a altas temperaturas ya que tiene un alto punto fusión de $2\,054\,^\circ\text{C}$. Debido a esta característica particular de la alúmina, este material se utiliza en la fabricación de reactores, hornos y hervidores que trabajan elevadas temperaturas, que sobrepasan los $1\,200\,^\circ\text{C}$ (Shackelford y Doremus, 2008, p. 1).

Por otro lado, las propiedades mecánicas son excelente gracias a que su microestructura le proporciona alta dureza, un alto módulo de elasticidad, satisfactoria resistencia mecánica, resistencia al uso y buena refractariedad . Por lo tanto, este material ha sido utilizado en la fabricación de materiales abrasivos, herramientas de corte, porcelana resistente al calor. Un sector que está vinculado a la alúmina es la cerámica, como es la industria de las vajillas y sanitarios debido a su resistencia mecánica y química y en especial a su blancura (Shackelford y Doremus, 2008, p. 1; Boch y Niepce, 2007, p. 205).

Otra de sus propiedades interesantes es la alta resistencia eléctrica que tiene este material. Por esta razón, la alúmina se utiliza como componente de aisladores eléctricos. En cambio, la industria electrónica utiliza la alúmina en equipos de acumulación y generación de potencia eléctrica, así como en la fabricación de porcelana aislante. Todos estos usos se deben a sus propiedades como la resistencia a altas temperaturas, alta resistencia eléctrica, conductividad térmica. (Cornelis et al., 2003, p. 441; Boch y Niepce, 2007, p. 200; Rodríguez, Villaquirán y Cobo, 2001, p. 255).

Por otro lado, la mezcla de una buena conductividad térmica y una superficie de control que tiene este material permite ser muy estable a las condiciones de operación (500 °C -600 °C). Por esta razón, la alúmina en la industria química se utiliza como soporte de catalizador, especialmente en industria del refinamiento del petróleo. En la Tabla 1.6 se resume algunas propiedades mencionadas anteriormente (Cornelis et al., 2003, p. 441; Boch y Niepce, 2007, p. 200).

Tabla 1.6. Propiedades de la α -alúmina

Propiedades	Unidades	Valor
Dureza (diamante (25 °C))	kg mm ⁻²	3 000
Conductividad térmica (1 100 °C)	Jm ⁻¹ /(sK ⁻¹)	5,9
Conductividad eléctrica (1 100 °C)	Log conductividad ohm ⁻¹ cm ⁻¹	9,7

*(Shackelford y Doremus, 2008, p. 13)

Por último, las alúminas trihidratadas ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) son un grupo de alúmina meta estable que se producen a más bajas temperaturas y además son menos densas que el corindón (α -alúmina). Pero esto lo que quita la utilidad de este tipo de alúminas. Por tal razón, estas alúminas son el principal recurso para la producción de todas las aplicaciones químicas del aluminio, como soporte de catalizadores, adsorbente, metal aluminio, incluso es consumido como aditivo en el papel, relleno de pinturas, plásticos y polímeros. Por lo cual tienen una diversidad de aplicaciones, y son grandemente comercializadas. Dentro de este grupo se encuentran los minerales más conocidos: Gibbsita, bayerita, nordstrandita (Kogel et al., 2006, p. 253; Vieira et al., 2007, p. 183).

En la Tabla 1.7, se muestra las diferentes aplicaciones, características y el contenido de sodio de las alúminas calcinadas, para la industria cerámica como son aisladores, piezas electrónicas, esmaltes y filtros.

Tabla 1.7. Recomendaciones para escoger polvo de alúmina

Aplicaciones	Principales características	Contenido de sodio/reactivo
Aisladores de alto voltaje	Resistencia eléctrica y mecánica, resistencia al choque térmico	Normal
Bujías	Resistencia eléctrica y mecánica, contracción controlada, durabilidad, facilidad de trabajo en verde, resistencia la choque térmico	Normal a baja
Cerámica para electrónica	Resistencia a altas temperaturas, alta resistencia eléctrica, conductividad térmica, caso de metalización	Baja
Azulejos, esmaltes	Propiedades químicas y mecánicas, fusión y viscosidad controlada, ajuste de los efectos de superficie	Intermedia
Sustratos Metalizados	Buena conductividad térmica, caso de metalización	Baja/reactivo
Soporte de catalizador	Preparación de cordierita, conductividad térmica, superficie de control	normal
Filtro cerámico para metal fundido	Superficie de control, buena conductividad térmica, resistencia al choque térmico	normal

Tabla 1.7. Recomendaciones para escoger polvo de alúmina
(Continuación...)

Aplicaciones	Principales características	Contenido de sodio/reactivo
Vajilla, sanitaria	Resistencia mecánica y química, blancura	normal
Cerámica para mecánica	Resistencia mecánica, conductividad térmica, resistencia a la corrosión, abrasión y choque térmico	Normal a débil/reactivo
Tribología	Microestructura uniforme, compromiso entre dureza y tenacidad	Normal

*(Boch y Niepce, 2007, p. 206)

1.3.2 MULLITA

La mullita se considera una solución en fase sólida, y es la única fase cristalina estable a altas temperatura a presión atmosférica. La composición estequiometría de la mullita corresponde a $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. En la naturaleza este compuesto raramente se encuentra como un mineral, debido a las condiciones especiales de formación a altas temperaturas y bajas presiones. Por esta razón, en la naturaleza existe tres grupos silicatos alumínicos que son la silimanita, andalucita y la distena o cianita; sin embargo, casi un siglo atrás se encontró, un depósito natural de este mineral al oeste de Escocia en la llamada isla de Mull. La aparición de este mineral en la isla Mull, puede deberse a la actividad volcánica post-Celedonia, donde el magma en contacto con los depósitos de arcillas, formaron mullita a altas temperaturas. (Aksay, Dabbs y Sarikaya, 1991, p. 2 344; Shackelford y Doremus, 2008, p. 27).

1.3.2.1 Estructura cristalina de la Mullita.

La estructura de la mullita se deriva de la silimanita $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, sustituyendo los iones Si^{3+} con iones Al^{4+} en posiciones tetraédricas y eliminando oxígenos para balancear las cargas eléctricas. El abandono del oxígeno provoca el movimiento de

dos cationes (Al^{3+} y Si^{4+}) de una posición tetraédrica T a otra T^* , como lo muestra la Figura 1.15. La estructura cristalina promedio de la estequiometría de la mullita es ortorrómbica de $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ (3/2) a $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}$, (3/1) (Hou, Basu y Sarin, 2001, p. 470).

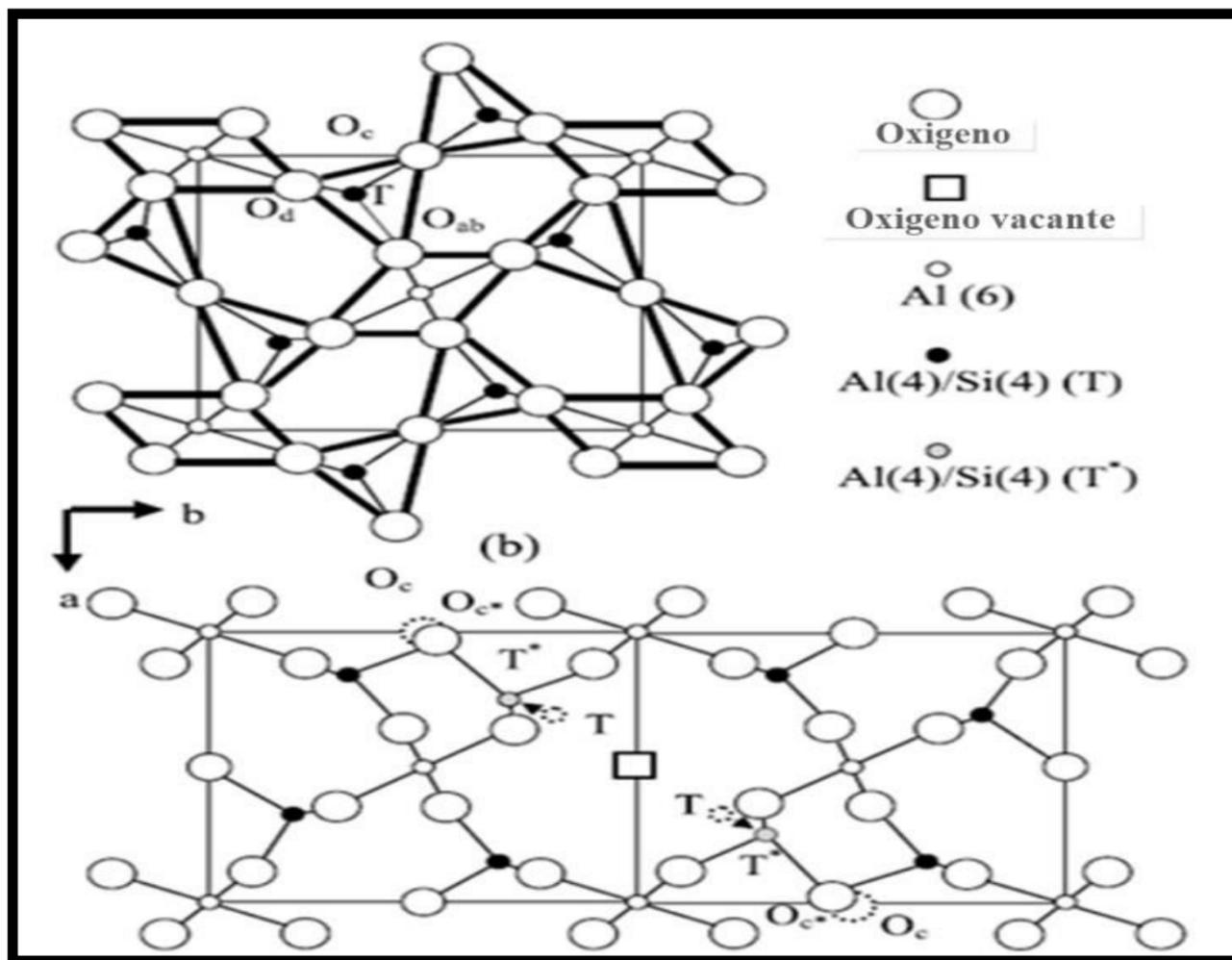
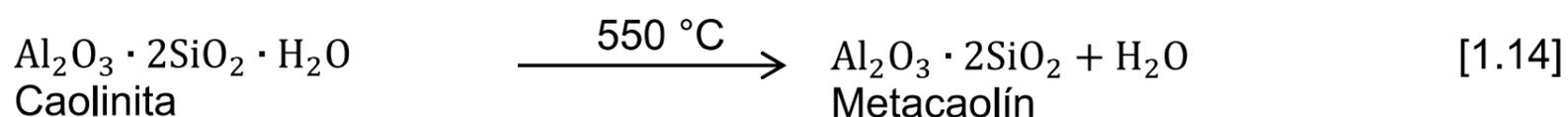
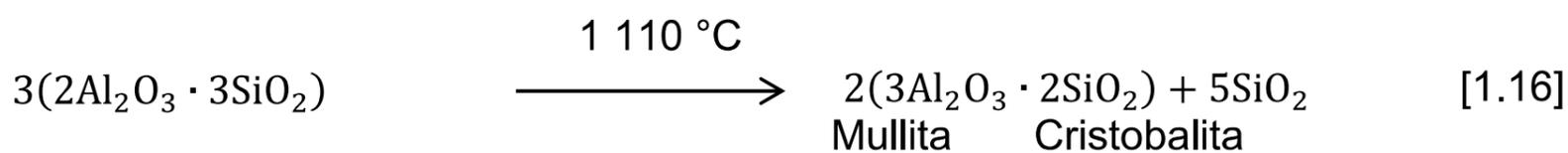
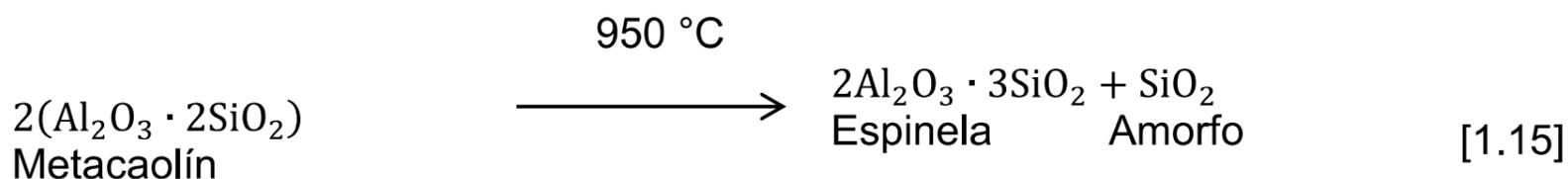


Figura 1.15. Estructura de la celda unitaria de la silimanita (a), (b) se observa la estructura de la mullita, como la derivación de la estructura de silimanita, donde la sustitución de Si^{4+} con Al^{3+} , conduce a la formación de oxígenos vacantes (Hou et al., 2001, p. 470)

1.3.2.2 Producción de mullita

Tanto la estructura y la morfología de la mullita, depende fuertemente de los materiales precursores y de la historia del proceso. El primer método para encontrar mullita (3:2) consiste en calentar arcillas. En las ecuaciones 1.14, 1.15, 1.16 muestran el proceso térmico de las arcillas.





Las reacciones indican que entre 925 - 950 °C se forma la fase cúbica con estructura espinela, llamada espinela de alúmina-silicio, la cual es una estructura inestable. La composición química de la espinela de aluminio y silicio $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2$, la que se muestra en la Ecuación 1.16, se transforma en mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) debido a que el silicio se difunde de la estructura de la espinela. La Figura 1.14, muestra la zona de la mullita meta estable (Shackelford y Doremus, 2008, p. 33).

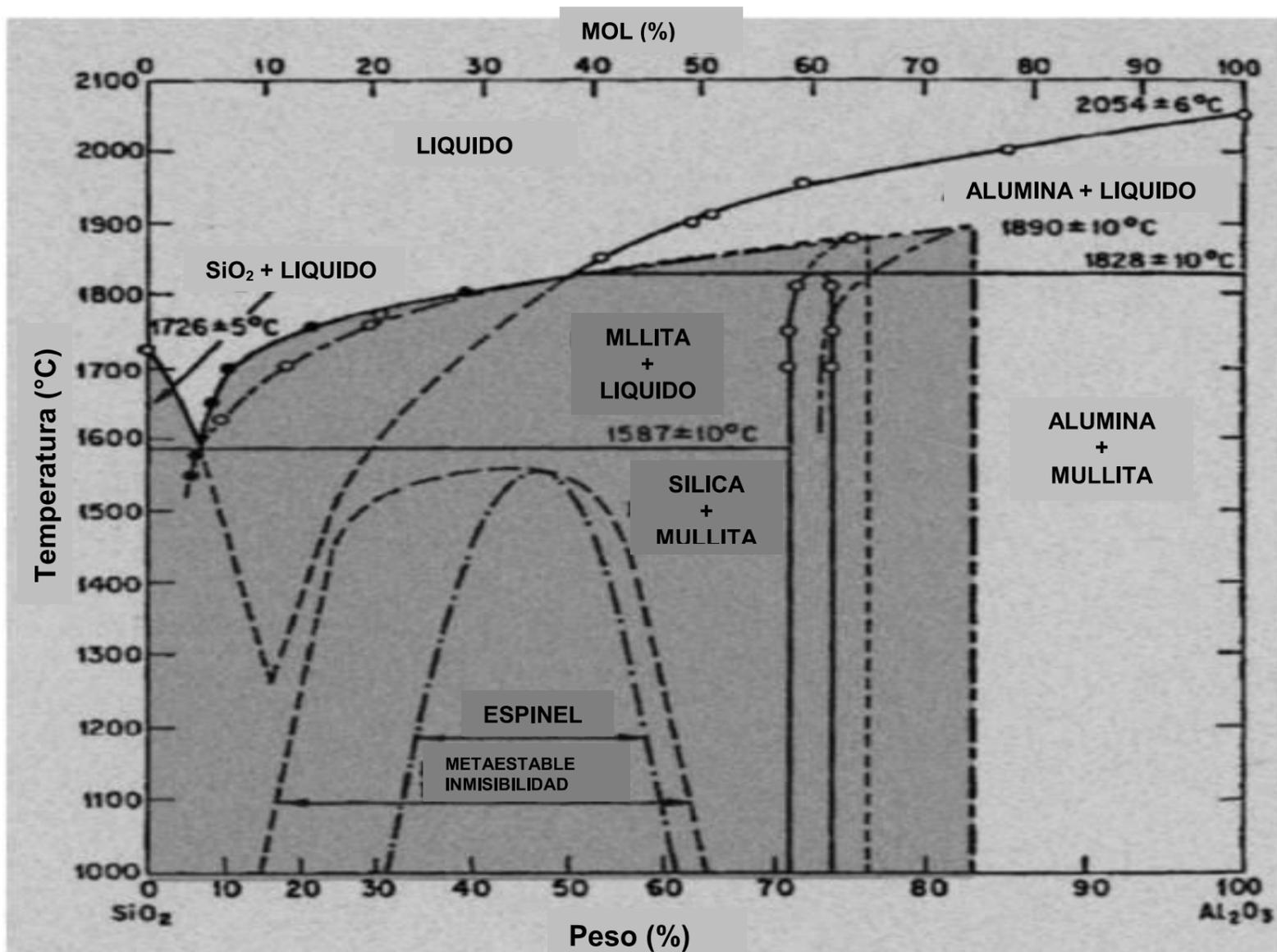


Figura 1.16. Región metaestable en el sistema $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (Shackelford y Doremus, 2008, p. 36)

La mayor parte de la mullita obtenida, son por vías de descomposición térmicas de materiales naturales. También, se la obtiene por mezclas de materia primas puras de Al_2O_3 y SiO_2 , que se funden a temperatura cercana a 1 850 °C. Sin embargo, existen otras tecnologías que se han desarrollado como el método sol-gel, la síntesis hidrotérmica, la combustión de polvos cerámicos y la síntesis a partir de hidroxihidrogeles. (Ribero, Restrepo, Paucar y García, 2006, p. 2)

1.3.2.3 Propiedades y aplicaciones

La mullita es de gran importancia dentro de la ingeniería, debido a que se atribuye muchas propiedades de interés. Este es un material cerámico excelente, con una alta resistencia a la deformación y dureza. Muchas investigaciones sobre este material, han sido publicadas por su gran importancia en la ciencia y técnica, esto se puede explicar por su alta estabilidad, baja conductividad y expansión térmica. En el mundo de la mullita, existen tres tipos de policristales: mullita monolítica, mullita de recubrimiento y mullita compuesta (Shackelford y Doremus, 2008, p. 27, Schneider, Schreuer y Hildmann, 2008, p. 330)

La mullita cerámica monolítica, se ha usado para aplicaciones tradicionales y avanzadas. El campo que abarca son la porcelana, vajillas, cerámica para la construcción e ingeniería, refractarios, dispositivos electrónicos, sustrato para convertidores catalíticos, materiales para hornos y otros materiales cerámicos (Schneider et. al, 2008, p. 330).

Mullita para revestimientos, las aplicaciones de este tipo de mullita se van hacia el recubrimiento de metales y cerámicos, con el objetivo, de evitar la degradación cuando se encuentran expuestos a la oxidación, ambientes químicos fuertes y ambientes a altas temperaturas. Bajo estas condiciones la mullita ha sido aplicada en hornos tubulares, y como protector térmico y la mullita *compuesta*, estas incluyen las fibras de mullita y la matrices, que se han utilizado en la estructura de motores de turbina a gas, escudos de calor para vehículos espaciales y mobiliario para hornos (Schneider, et. al. 2008, p. 331).

2 PARTE EXPERIMENTAL

En el presente trabajo se busca diseñar una planta de valorización de lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio a partir de procesos hidrometalúrgicos y pirometalúrgico. Con este fin, se desarrolló los procesos que se indica en la Figura 1.2.

Primero, los lodos anódicos se caracterizaron físicamente y químicamente. En la caracterización física se determinaron la densidad aparente, densidad real, pH, humedad, granulometría, por otro lado en la caracterización química se determinó el Al, Na, Si, Mg, Ca por espectrofotometría absorción atómica A. Analyst 300 marca Perkin Elmer. En cambio por difracción de rayos X en un equipo D8 Advance (Bunker) se encontró si los lodos con un secado previo a 110 °C por 24 h presentan alguna fase cristalina. Se realizó además un análisis termo gravimétrico (Sozimatzu TGA-50) y la caracterización morfológica que fue hecha por microscopia electrónica de barrido (MEB-EDX Tescan con analizador de rayos X (Bruker) y por último se obtuvo el valor del área superficial para lo cual se utilizó el método BET en equipo Quantachrome.

A partir de la caracterización del lodo anódico se definió dos métodos de valoración: hidrometalúrgico y pirometalúrgico.

En el tratamiento hidrometalúrgico se lixiviaron con ácidos orgánicos, inorgánicos y en medio alcalino, con el fin de determinar la influencia de los agentes lixiviantes sobre los lodo anódicos, así se escogerá la solución que presente mayor selectividad, por ende mayor recuperación de aluminio. Tanto para la lixiviación acida y alcalina, se trabajó con los lodos originales con una concentración de 1 g/L de agente lixivante y un 1 % de sólidos bajo agitación. Al final de los procesos de lixiviación, se obtuvo las soluciones “fuertes”, soluciones de “lavado” y “relave”. Con las soluciones fuerte, lavado y relave con un previa disgregación acida fueron analizadas por la técnica de espectrofotometría de absorción atómica en un equipo A. Analyst 300 marca Perkin para determinar la recuperación se aluminio a partir de un balance metalúrgico.

Con el proceso pirometalúrgico se realizó ensayos de calcinación a diferentes temperaturas (200, 600, 800 °C) en una mufla eléctrica (Linderberg-Blue M), mientras que para las temperaturas de 1 000, 1 100 y 1200 °C se calcinó en un horno eléctrico (Nabertherm HT 16/16) con un ciclo de calentamiento de 10 °C/min. El tiempo de calcinación para cada una de las temperaturas fue de 2 horas. Los lodos calcinados fueron analizados mediante la técnica de difracción de rayos X para determinar la temperatura a la cual el lodo anódico llega a formar un material cristalino, termodinámicamente estable y comercialmente rentable para su comercialización.

Los lodos calcinados a la temperatura de cristalización (1 200 °C) fueron caracterizados física, química, morfológica y mineralógica. Por lado físico los lodos calcinados a la temperatura de cristalización se determinaron la densidad, área superficial y tamaño de partícula (d_{80}). El análisis elemental de los componentes químicos y morfología de los lodos calcinados se realizó con un microscopio electrónico de barrido con analizador de rayos X (MEB-EDX Tescan con analizador de rayos X (Bruker)). La mineralogía se analizó a partir de la técnica de difracción de rayos X. Esta caracterización se realizó con el objetivo de determinar si este material tiene características de una materia prima comercial utilizada en la industria cerámica y refractaria.

Con base en los mejores resultados obtenidos del trabajo experimental se diseñó la planta de valoración de los lodos anódicos. Se realizó el balance de masa y el diagrama de flujo de la planta, y con las capacidades de los equipos requeridos se evaluó la factibilidad económica de este proyecto de valoración de los lodos anódicos ya sea por vía hidrometalurgia como pirometalurgia mediante índices financieros como el TIR (tasa interna de retorno), el VAN (Valor actual neto) y la relación beneficio/costo.

En la Figura 2.1 se muestra un resumen del procedimiento experimental realizado a los lodos anódicos generados en la planta de tratamiento de perfiles de aluminio, además se indica las condiciones de trabajo, equipos y reactivos utilizados en cada ensayo.

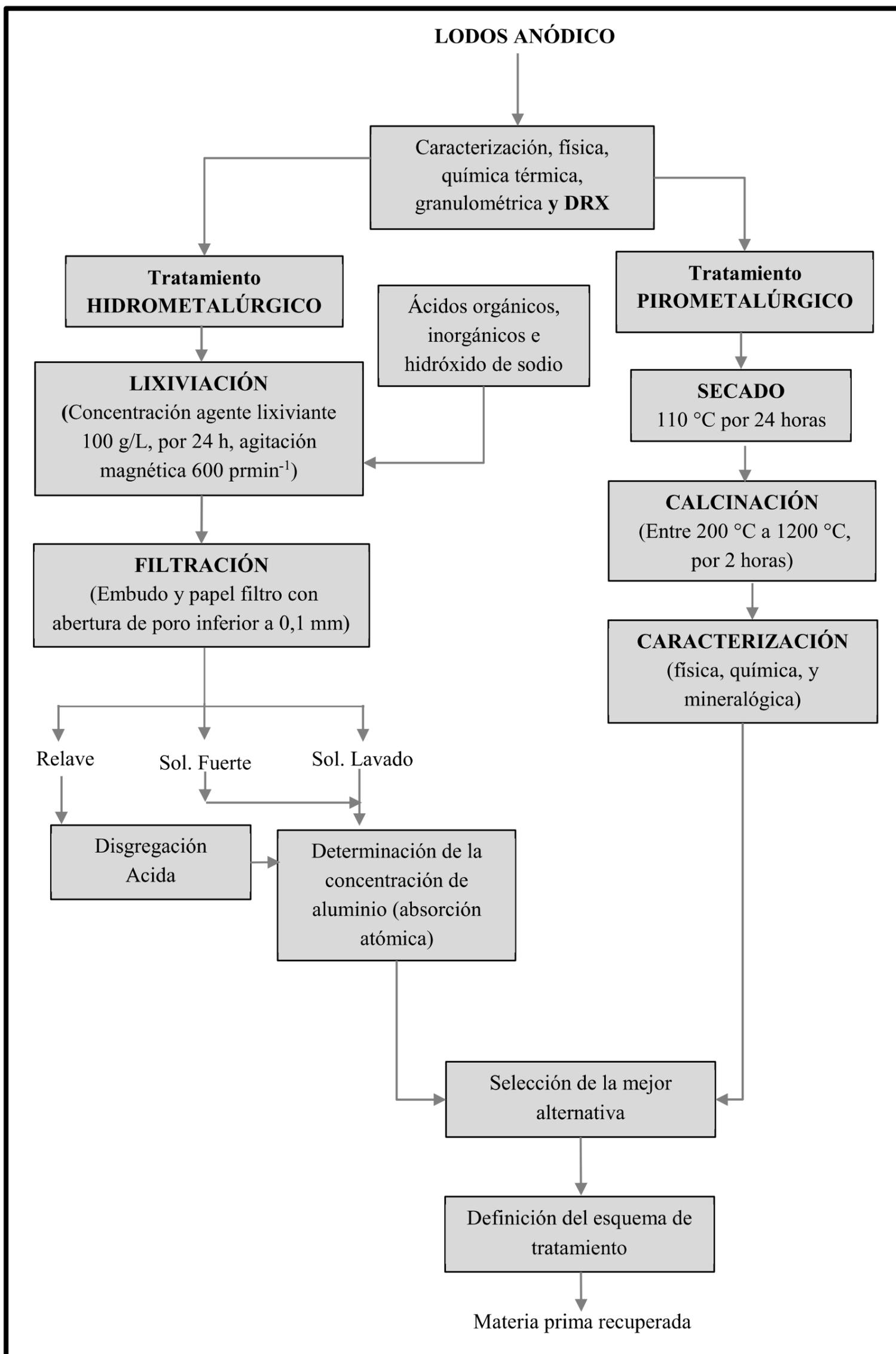


Figura 2.1. Diagrama de flujo del proceso experimental

2.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA, TÉRMICA Y MINERALÓGICA DE LOS LODOS RESIDUALES

La materia de estudio fue el lodo anódico que se genera en la unidad de tratamiento de efluentes de una planta de anodizado de aluminio, ubicada en la ciudad de la Latacunga, provincia de Cotopaxi. La cantidad de lodo anódico que se recolectó, fue de aproximadamente 25 kg que estaba contenido en sacos de capacidad 1 000 kg.

2.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS LODOS ANÓDICOS

Para la caracterización física de los lodos anódicos se determinó los siguientes parámetros: humedad, densidad aparente, densidad real, área superficial y granulometría.

2.1.1.1 Determinación de la humedad de muestras de los lodos anódicos

Para determinar la humedad, se efectuó los procesos que se describen a continuación:

- Se taro un crisol de porcelana en una mufla (Linderberg-Blue M) a 950 °C, durante una hora.
- Se enfrió el crisol de porcelana en un desecador. Luego se pesó el crisol (W1).
- Se pesó aproximadamente 1 gramo de muestra (W2), el cual se agregó al crisol tarado y nuevamente se pesó (W3).
- Luego se introdujo el crisol con la muestra de lodo a una estufa (Fisher econotemp™) a 110°C por 24 horas, nuevamente se pesó (W4).
- Se retiró el crisol de la estufa y se dejó enfriar 30 min en un desecador, para evitar que la muestra absorba agua.

- Se registró su peso en una balanza analítica (Sartorius TE 1245).

La ecuación 2.1, se empleó para determinar la humedad de los lodos anódicos:

$$H = \frac{W_2 - (W_3 - W_4)}{W_2} \times 100 \quad [2.1]$$

Donde:

H = Humedad de la muestra expresada en porcentaje.

W_2 = Peso inicial de la muestra.

W_3 = Peso del crisol más muestra

W_4 = Peso del crisol más muestra a 110 °C después de 24 horas.

2.1.1.2 Determinación de la densidad aparente de muestras de los lodos anódicos

La densidad aparente se determinó con la siguiente metodología:

- Se secó la muestra durante 24 h a 110 °C
- Se redujo de tamaño la muestra seca
- Se pesó una probeta de 1 litro limpia y seca en una balanza Sartorius TE1245.
- Se añadió en la probeta la muestra hasta completar su volumen.
- Se pesó la probeta con la muestra y se registró su peso. Finalmente se calculó la densidad aparente con la relación de masa registrada y volumen.

2.1.1.3 Determinación de la densidad real de muestras de lodos anódicos

Para determinar la densidad real se procedió de la siguiente manera:

- La masa del picnómetro Gay Lussac marca Boeco con tapón capilar de 25 mL de capacidad fue pesado en la balanza analítica Sartorius TE1245.

- Luego se agregó 1 g de muestra al picnómetro y se registró la masa del picnómetro con la muestra.
- Se añadió agua destilada hasta llenar el picnómetro, se colocó el tapón capilar retirando el exceso de agua que emergió del tapón capilar con ayuda de una toalla de papel, y se registró la masa del picnómetro con muestra y agua.
- Finalmente el picnómetro fue lavado en agua destilada, se secó por fuera; luego se agregó agua destilada hasta llenarlo, se colocó el tapón capilar, se eliminó el exceso de agua emergente del tapón capilar con ayuda de una toalla de papel y se registró la masa del picnómetro con agua. En el Anexo I, se muestra los cálculos respectivos, con los pesos que se tomaron anteriormente.

2.1.1.4 Determinación del área superficial de los lodos anódicos

El área superficial específica de los lodos anódicos originales se midió por el método BET (modelo de Brunauer, Emmett y Teller), la cual se obtuvo a una temperatura de 77 °K (temperatura del nitrógeno líquido), en un equipo Quantachrome NOVA[®] 4200e Surface Area Analyzer.

Para este análisis se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

- Los lodos anódicos fueron secados a 110 °C por 24 h, para luego colocar la muestra en un contenedor de la cámara de desgasificación, para eliminar impurezas (agua y aceites).
- El proceso de desgasificación se lleva a cabo en vacío durante aproximadamente 2 h a 300 °C, con nitrógeno (grado 4,8) seco como gas de medición.
- Finalmente con la muestra limpia se midió el área superficial específica de los lodos anódicos a partir de las isotermas de absorción y desorción de N₂, fueron analizadas empleando las ecuaciones de BET (Brunauer, Emmett, y Teller).

2.1.1.5 Determinación del tamaño de partícula (d_{80})

- Para la determinación el tamaño de partícula d_{80} del lodo anódico se secó en una estufa (FISHER ECONOTEMP™) a 110°C por 24 horas.
- Se empleó el sistema separación mecánica por una serie de tamices, para lo cual se utilizó 250 g de muestra y se dejó durante 15 min encendido el vibro tamiz (ATM ARROW). Al final de este proceso se pesó la cantidad de lodo retenido en cada tamiz.
- Con los valores obtenidos se realizó los cálculos para determinar el d_{80} y la curva granulométrica.

2.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y MORFOLÓGICA DE LOS LODOS ANÓDICOS

2.1.2.1 Caracterización química y morfológica

Para determinar la composición química de los lodos anódicos, se empleó el método estándar de disgregación ácida en microondas del Departamento de Metalurgia Extractiva, para obtener la concentración de elementos presentes en los lodos anódicos por absorción atómica en el equipo AAnalyst 300. Adicionalmente, se utilizó un microscopio electrónico de barrido MEB-EDX (Vega-Tescan) para encontrar la composición elemental semi-cauntitativa de lodos anódicos con un analizador de rayos X Quantax. Los elementos que se determinaron fueron: Al, S, Si, Na, Ca y Mg, mediante el programa Spirit 1.8 (Bruker). En la Figura 2.2 se presentan los equipos utilizados en la caracterización química. A continuación se describe la técnica empleada:

- Se pesaron 100 mg de lodo anódico original en un reactor de teflón. Luego fue añadico 3 mL de HNO₃ y 3 mL de HF en ese orden y se cerró el reactor.
- El reactor de teflón es colocado dentro de un horno de microondas (Potencia de 50 W), junto con 100 mL de agua fría en un vaso de precipitación y se calentó el reactor por 2 min y 30 s.

- Con el tiempo cumplido, el reactor pasa a enfriar durante 20 min en un congelador, una vez enfriado el reactor, se colocaron 5 mL de HCl.
- El reactor de teflón es nuevamente es llevado al microondas (Potencia de 50 W) junto con 100 ml de agua, por un tiempo de 2min y 30 s y luego enfriado por 20 min en un congelador. Luego fue añadido a un matraz de 100 mL el contenido del reactor de teflón enfriado y es aforado con agua destilada. Con la solución obtenida se determina el contenido de los metales presentes.

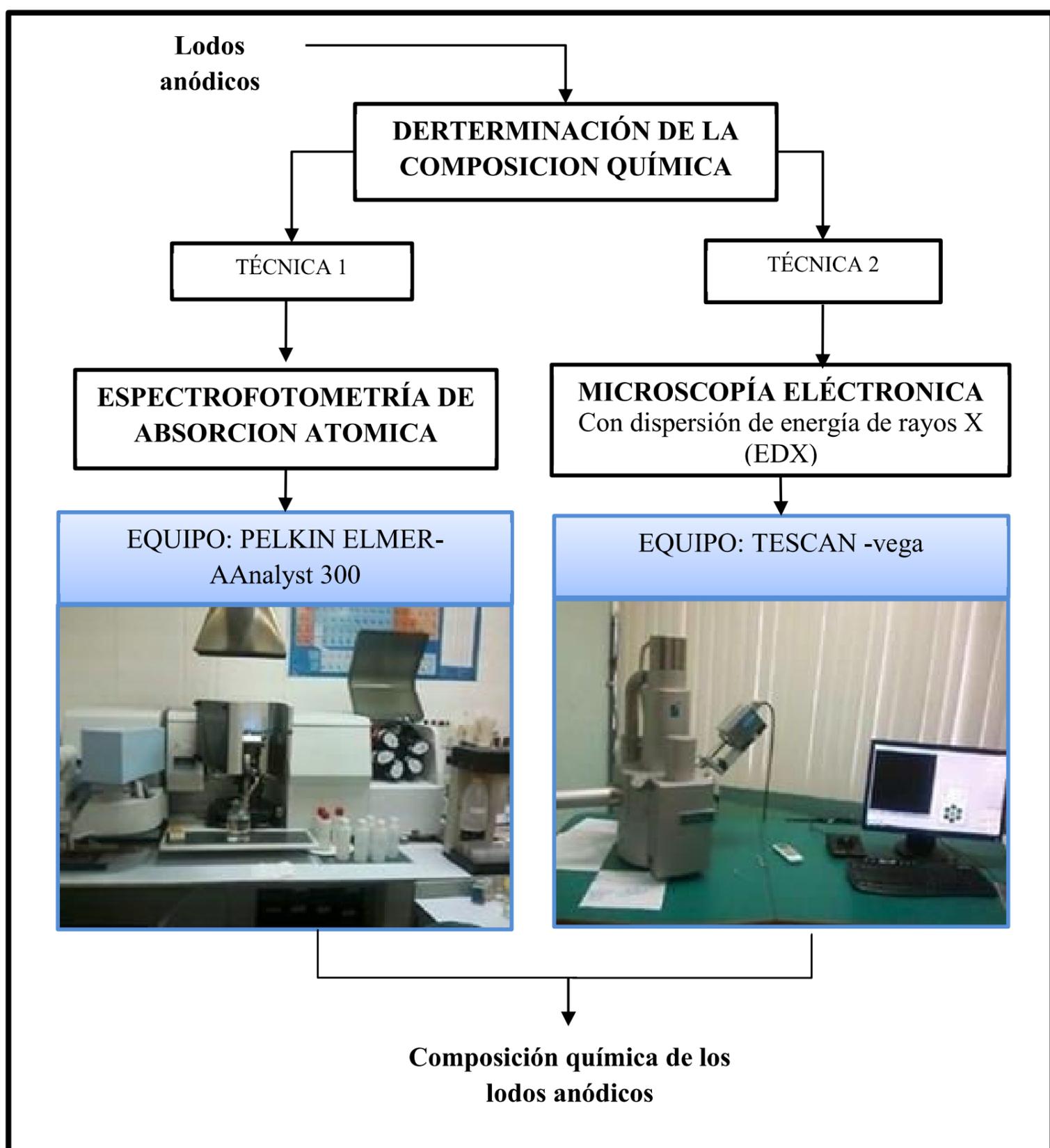


Figura 2.2. Esquema para la determinación de la composición química de lodos

2.1.2.2 Determinación del pH de la muestra de lodos anódicos

Para determinar el pH, se preparó una pulpa con la muestra al 40 % de sólidos en agua destilada bajo agitación durante 5 min, y se registró la medida de pH con el pHmetro (INOLAB p. 720). Para determinar el pH, se utilizó un vaso de precipitación de 250 mL para la preparación de la pulpa (40 % de sólidos).

2.1.3 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LOS LODOS ANÓDICOS

En la determinación de compuestos con cristalización definida presentes en la muestra de lodos anódicos secos (110 °C, 24 h), se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX). Para lo cual, se pulverizaron los lodos anódicos secos en un mortero de ágata, a fin de obtener una muestra homogénea con una granulometría menor a 50 µm. La muestra se colocó en un porta muestra permitiendo que forme una capa superficial plana.

La muestra fue analizada en un equipo de difracción de rayos X, modelo D8 ADVANCE BRUKER, junto al software específico Diffrac plus, utilizado para la identificación y la valoración semicuantitativa de las fases cristalinas.

2.1.4 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DE LOS LODOS ANÓDICOS

Se realizó un análisis termogravimétrico (TGA) de los lodos anódicos húmedos y secos (110 °C, 24 h) originales, con el fin de determinar a qué temperatura ocurren cambios bruscos de peso, y así verificar con los análisis de difracción de rayos X si se trata de alguna reacción de descomposición.

Para este análisis, se utilizó el equipo TGA SOSHIMADZU con atmosfera inerte de nitrógeno a un flujo de 50 mL/min y una velocidad de calentamiento 10 °C/min desde temperatura ambiente de 19 °C hasta alcanzar los 950 °C y un peso aproximado de 18 mg.

2.2 RECUPERACIÓN DE ALUMINIO EN SOLUCIÓN A PARTIR DE LOS LODOS RESIDUALES POR PROCESOS HIDROMETALÚRGICOS

Una vez que se realizó la caracterización de los lodos anódicos, se procedió a realizar el proceso de lixiviación con los lodos anódicos. Estos ensayos de lixiviación se realizaron, con el objetivo de observar la influencia del agente lixivante en la selectividad del aluminio presente en lodos anódicos, así como de recuperar la mayor cantidad del metal de interés (aluminio). Se busca obtener sustancias comerciales tales como: sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y aluminato de sodio (NaAlO_2), que se usan como agente floculante para el proceso de sedimentación en el tratamiento de aguas residuales industriales y como agente de encolado para la producción de papel, respectivamente.

También se hicieron lixivitaciones adicionales de los lodos anódicos con ácidos inorgánicos, tales como: sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl), nítrico (HNO_3) y fluorhídrico (HF) y con ácidos orgánicos como ácido acético ($\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_2$), tartárico ($\text{H}_4\text{C}_6\text{O}_6$) y cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$).

2.2.1 LIXIVIACIÓN EN MEDIO ALCALINA CON LODOS ANÓDICOS HÚMEDOS

La lixiviación alcalina con los lodos anódicos se realiza para recuperar el aluminio presente en los lodos anódicos con hidróxido de sodio (NaOH). Las condiciones del proceso de lixiviación fueron: concentración de agente lixivante de 100 g/L, 1 % de sólidos (5 g de lodos anódicos con 80 % de humedad en 96 mL de solución), 24 h de agitación de 600 rpm^{-1} . Durante el proceso de lixiviación se mantuvo un rango de pH de 12-13. Mediante este proceso se buscó obtener aluminato de sodio (NaAlO_2) que se utiliza como agente de encolado para la producción de papel. Para realizar esta lixiviación en medio alcalino se procedió como se explica a continuación:

- Se pesaron 5 g de lodo anódico húmedo (80 % humedad) para tener 1 gramo de lodo anódico seco.
- La solución utilizada de hidróxido sodio fue preparada a una concentración de 100 g/L.
- Con 100 mL de la solución antes preparada y los 5 g de lodo anódico se forma una pulpa de 1 % de sólidos en un vaso de precipitación de 250 ml
- La pulpa formada es agitada con un agitador magnético (equipo LabTech Multi-Position) durante 24 h, a una velocidad de 600 rpm⁻¹.
- Una vez transcurrido el tiempo de lixiviación, y se procedió a realizar la primera filtración de la pulpa en papel filtro cualitativo (abertura de poro inferior a 0,1 mm) y obteniéndose la solución fuerte (solución rica en aluminio), y el relave (torta)
- Posteriormente, la torta obtenida se lavó con 50 mL de agua destilada y filtrada, así obteniéndose la solución débil o de lavado y relave.
- En la solución fuerte y de lavado, se determinó el contenido de aluminio presente en las soluciones por absorción atómica (AA) en un equipo A. Analyst 300 Pelkin Elmer.
- El relave se secó en la estufa MEMMERT a 110 °C por 24 h, y se pesó en una balanza analítica, luego disgregado en medio ácido en microondas para determinar el aluminio presente por absorción atómica (AA). En la Tabla 2.1, se muestra un resumen de las condiciones de lixiviación en medio alcalino.

Tabla 2.1. Condiciones de operación de lixiviación alcalina

ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN ALCALINA	
Agente lixivante	NaOH (Hidróxido de sodio)
Concentración del agente lixivante (g/L)	100
Porcentaje de sólidos (%)	1
Volumen de solución (mL)	100
Cantidad de lodos anódicos húmedos (g)	1
Tiempo de lixiviación (h)	24
Velocidad de agitación (rpm ⁻¹)	600
pH	13-13,6

2.2.2 LIXIVIACIÓN CON ÁCIDOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS DE LOS LODOS ANÓDICOS HÚMEDOS

Para el estudio de la influencia del agente lixivante sobre los lodos anódicos se utilizaron los siguientes ácidos orgánicos: acético ($C_2H_4O_2$), cítrico ($C_6H_8O_7$) y tartárico ($H_4C_6O_6$); ácidos inorgánicos como: sulfúrico (H_2SO_4), clorhídrico (HCl), nítrico (HNO_3) y fluorhídrico (HF) de concentración 100 g/L con cada uno de los ácidos. Para hacer estas lixiviaciones, se procedió de la misma manera como se explica en la Sección 2.2.1.1.

Por la característica anfótero del aluminio se utilizó estos agentes lixiviantes ácidos con el objetivo de recuperar materias primas de los lodos anódicos. La lixiviación con ácido sulfúrico se realizó con el fin de obtener sulfato de aluminio ($Al_2(SO_4)_3$), que se usa como agente floculante para clarificar los efluentes al precipitar los sólidos suspendidos presentes en aguas residuales. Para el resto de En la Tabla 2.2, se muestra un resumen de las condiciones de lixiviación en medio alcalino

Tabla 2.2. Condiciones de trabajo utilizados para los ensayos de lixiviación de los lodos anódicos húmedos con ácidos inorgánicos y orgánicos

ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN ÁCIDOS ORGÁNICOS E INORGÁNICOS	
Agentes lixiviantes	H_2SO_4 , HCL, HF, HNO_3 , $C_2H_4O_2$, $H_4C_6O_6$, $C_6H_8O_7$
Concentración del agente lixivante (g/L)	100
Porcentaje de sólidos (%)	1
Volumen de solución (mL)	100
Cantidad de lodos anódicos húmedos (g)	1
Tiempo de lixiviación (h)	24
Velocidad de agitación (rpm^{-1})	600
pH	1-3

Para este lixiviación el pH se debe mantener entre 1 a 3, con el objetivo de recuperar el aluminio sobre el 60 % (Boaventura, Duarte y Almeida, 2000, p. 2).

2.3 RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE LODOS RESIDUALES POR ENSAYOS PIROMETALÚRGICOS

Primero los lodos anódicos fueron secados a 110 °C por 24 h en una estufa FISHER ECONOTEMP™, luego para la calcinación entre 200 °C y 800 °C en una mufla SNOL 8,2/1100, mientras que para la calcinación entre 1 000 °C y 1 200 °C se realizó en un horno eléctrico Nabertherm HT 16/16. En la Figura 2.3 se muestra el resumen de estos ensayos.

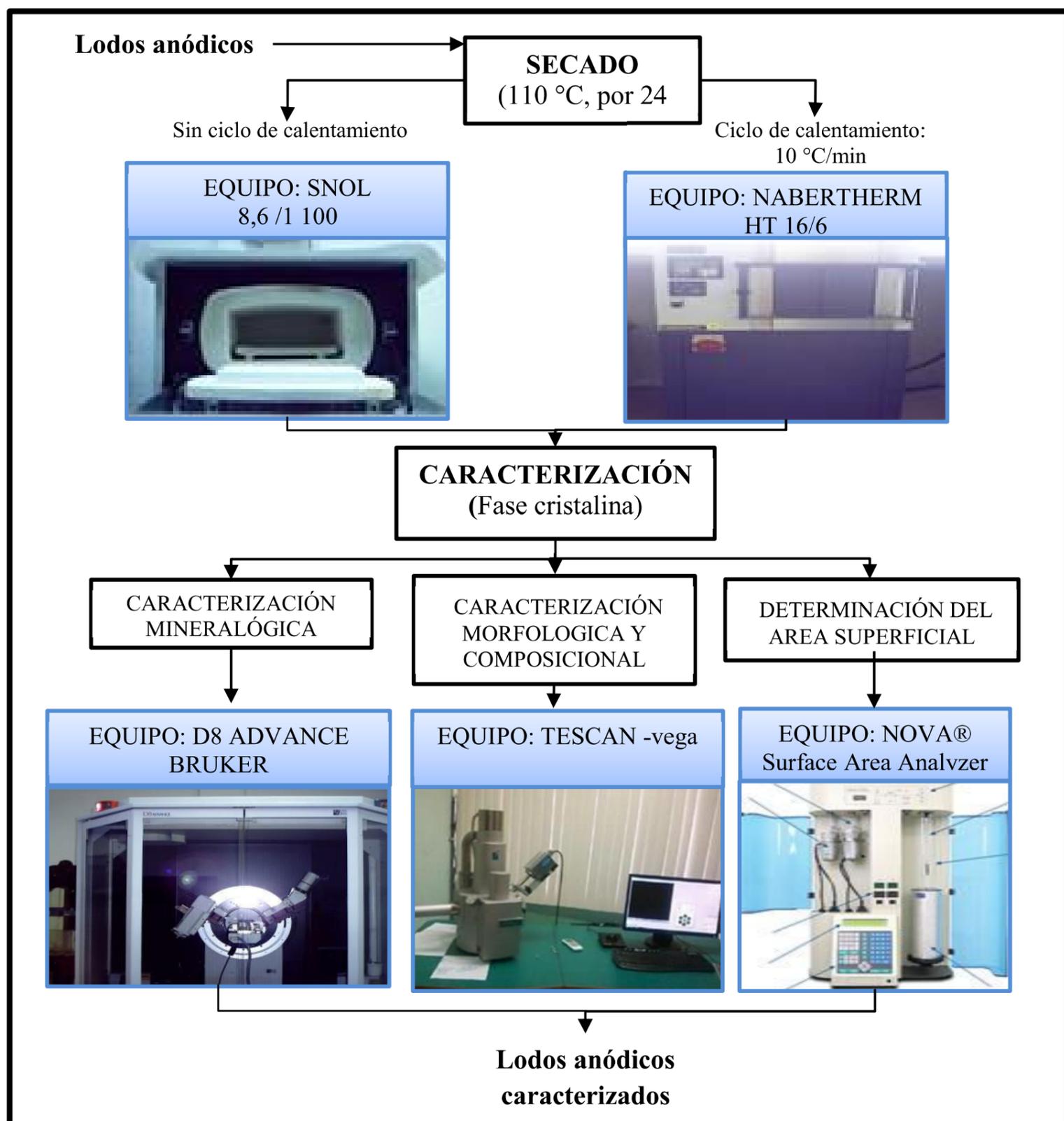


Figura 2.3. Esquema para caracterización de lodos anódicos calcinados cristalinos

Por otro lado, el proceso de caracterización de los lodos calcinados se realizó por tres técnicas. La primera fue la difracción de rayos x en un equipo D8 ADVANCE con el objetivo de determinar las fases cristalinas formadas. La segunda técnica utilizada fue la de microscopia electrónica para determinar la composición química y morfología de los lodos calcinados. Finalmente, se utilizó el método BET para diagnosticar el área superficial de los mismos.

2.3.1 ENSAYOS DE CALCINACIÓN DE LOS LODOS ANÓDICOS

Los ensayos de calcinación se realizaron con el propósito de observar las transformaciones estructurales que sufre el lodo anódico por acción de la temperatura. Para lo cual, los lodos anódicos se calcinaron a diferentes temperaturas (200 °C, 600 °C, 800 °C, 1 000 °C, 1 110 °C, 1 200 °C). Para estos ensayos, se efectuó el siguiente procedimiento:

- Primero se secó la muestra en la estufa a 110 °C durante 24 h.
- Se pesó solo la navecilla, luego se agregó 1 g de muestras seca en la misma.
- Se calcinó la muestra junto con la navecilla en la mufla SNOL 8,2/1100.
- Se dejó calcinar los lodos anódicos hasta alcanzar la temperatura propuesta, y se mantuvo durante 2 horas

En las calcinaciones comprendidas entre 1 000 y 1 200 °C, se utilizó el siguiente ciclo de calentamiento: 10 °C/min en un horno Nabertherm HT 16/16.

2.3.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO Y QUÍMICA DE LOS LODOS CALCINADOS

Luego de encontrar la temperatura de cristalización de los lodos anódicos calcinados se procedió a caracterizar esta fase cristalina, de la siguiente manera:

- Caracterización morfológica y composicional de los lodos anódicos calcinados, para las temperaturas de cristalización (metodología se describe en la sección 2.1.2).
- Determinación del área superficial de los lodos anódicos calcinados, para lo cual la metodología se muestra en la sección 2.1.1.4.
- Análisis de la densidad real con la metodología de la sección 2.1.1.3.
- Además se realizó el análisis granulométrico mediante la metodología estandarizada por tamices Tyler, a partir de la norma ASTM C 136-05. Los lodos anódicos fueron secados a 110 °C por 24 h, y se sometió a una separación mecánica por una serie de tamices. Se utilizó 100 g de muestra y se dejó durante 15 min encendido el vibro tamiz (ATM ARROW).
- Al final de este proceso se pesó la cantidad de lodo retenido en cada tamiz. Con los valores obtenidos se realizó los cálculos para determinar el d_{80} y la curva granulométrica.

2.4 DIAGRAMA DE FLUJO Y DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS PARA UNA PLANTA DE VALORIZACIÓN DE 1 000 kg/DÍA

El diseño conceptual de la planta de valoración de lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio, se realizó sobre la base de los mejores resultados obtenidos en los ensayos hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos, además se consideró la complejidad de la planta de tratamiento y los costos de inversión.

La definición del diagrama de flujo del proceso de tratamiento de los lodos anódicos generados en tratamiento de efluentes de piezas de aluminio, inició con la determinación de la cantidad de materia prima (lodos anódicos). Se realizó el balance de masa en cada operación unitaria y un balance global en la planta mediante la siguiente ecuación 2.2.

$$E-S+G-C=A$$

[2.2]

Donde:

E = Entrada de materia

S = Salida de materia

G = Generación de materia

C = Consumo de materia

A = Acumulación de materia

Con la ecuación 2.3 de conservación de energía que es similar a la ecuación de conservación de masa, se determinó el consumo diario de energía eléctrica (kWh) por parte de los equipos:

$$\left[\begin{array}{c} \text{Acumulación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{hacia el} \\ \text{sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{fuera del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] + \left[\begin{array}{c} \text{Generación} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] - \left[\begin{array}{c} \text{Consumo} \\ \text{de energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right] \quad [2.3]$$

Una vez definido el diagrama de flujo del proceso, se diseñaron los equipos principales como: el secador tipo invernadero, tolva de almacenamiento y horno para la calcinación. De cada uno de los equipos se determinaron las capacidades y tamaños requeridos; además se consultaron proformas con las especificaciones requeridas. También se realizó el plano de la planta, con lo que se determinó los metros cuadrados de terreno necesarios para la instalación de la industria.

El diseño del secador invernadero se realizó en base de los 5 000 kg/día de lodos anódicos húmedos generados. El sistema de operación consiste en la recolección diaria de estos lodos durante una semana. A partir de la ecuación 2.4, se obtiene la masa de lodos anódicos que ingresarán en el secador invernadero:

$$m = F \left[\frac{t}{\text{día}} \right] * 7[\text{días}] \quad [2.4]$$

Donde:

m = masa de lodos que ingresa al invernadero

F = flujos de lodos

Se calcula el volumen que ocupa esta cantidad de lodo anódico a partir de la ecuación 2.5.

$$V_{lodo} = \frac{m}{\rho_1} \quad [2.5]$$

Donde:

V_{lodo} = Volumen de lodo que ocupa en el invernadero

ρ_1 = Densidad aparente de lodos anódicos (con 80 % de humedad)

Tanto el ancho y el largo son datos iterativos que se obtuvo tomando en cuenta la altura de cama del lodo anódico, para lo cual se utilizó la ecuación 2.6

$$h_{cama} = \frac{V_{lodo}}{L * A} \quad [2.6]$$

Donde:

h_{cama} = altura de la cama del lodo dentro del invernadero

L = largo del invernadero

A = ancho del invernadero

La altura del invernadero se obtuvo tomando en cuenta el equipo que operará al interior, para la agitación, carga, descarga e ingreso del aire. Para lo cual se utiliza una retroexcavadora, que se buscare en catálogos.

La ubicación de la entrada de aire se realizara de acuerdo a la dirección del viento en la ciudad de la Latacunga. Para predecir la cantidad de agua evaporada a condiciones ambientales de Latacunga se realizó el cálculo de los milímetros de agua que se evaporan, para lo cual se aplicó la ecuación 2.7, donde se utiliza la ambiente y la velocidad del viento.

$$E = c(P_a - P)\left(1 + \frac{V}{16}\right) \quad [2.7]$$

E = Evaporación de mm/día

C = coeficiente (0.50 para charcos y pantanos)

P_a = Presión de vapor del agua en mmHg

P = Presión del aire en mmHg

V = Velocidad del viento en km/h

Con este valor se calcula el volumen que se puede evaporar dentro de un invernadero en un número de días de secado, como se muestra en la ecuación 2.8.

$$V_{evap} = E * \# \text{ días} * L * A \quad [2.8]$$

A partir de los datos de la energía solar que se muestra en la Tabla IV.3 se determinan la energía disponible para la evaporación de agua contenida en los lodos anódicos, hasta alcanzar un 12 %, parámetro establecido para el mejor manejo de transporte de los lodos anódicos. El dato de energía solar que se utilizó fue el de febrero 2013, ya que este representa el valor mínimo durante este año. Además, se calcula cuánta energía se necesita para evaporar el agua de los lodos anódicos a partir del calor latente y se compara con la energía disponible del sol.

Para el dimensionamiento de la tolva de almacenamiento se toma en cuenta la producción mensual de los lodos anódicos secos (12 % de humedad) y la densidad aparente, así se obtiene el volumen de la tolva. En catálogos se busca un recipiente que cumpla con esta necesidad. La Ecuación 2.4 se realizó el cálculo del volumen y se busca en catálogos la tolva requerida.

$$V_{tolva} = \frac{m_{12\%}}{\rho_{aparente(12\%)}} f \quad [2.4]$$

Donde:

$m_{12\%}$ = producción mensual de los lodos anódicos al 12 % de humedad

$\rho_{12\%}$ = densidad aparente de lodos anódicos al 12 % de humedad

f = factor de seguridad de 1.5

Con base de los resultados obtenidos en los ensayos de pirometalúrgicos se determinó la temperatura de calcinación y tiempo de residencia requerido para obtener un material de características comerciales, como: densidad entre 3 g/m³

a $3,9 \text{ g/m}^3$, tamaño de partícula $50 \text{ }\mu\text{m}$ a $80 \text{ }\mu\text{m}$, pureza 85 % a 95 % (alúmina refractaria A21).

A partir de los resultados antes mencionados y la densidad aparente se determinó el volumen de la cámara de calcinación se seleccionó un horno eléctrico por catálogos.

Para los equipos auxiliares como la banda transportadora, bandeja de enfriamiento y molino de rodillo se diseñaron en función del balance de masa y energía del proceso.

2.5 EVALUACION ECONÓMICA PRELIMINAR DE UNA PLANTA DE VALORIZACIÓN DE 1 000 kg/día

La evaluación económica preliminar se efectuó a partir de los aspectos tecnológicos de la planta (balance de masa, balance de energía, catálogos y distribución de los equipos en planta, mano de obra requerida, terreno, construcción y materiales indirectos). Las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7 se emplearon para determinar los índices financieros: VAN, TIR y B/C, sobre la base de los cuales se discutió la factibilidad del negocio.

El valor actual neto (VAN), que es la diferencia entre la inversión inicial del negocio y los flujos de cajas anuales, se determinó con la ecuación 2.5

$$\text{VAN} = -I_0 + \sum_{t=1}^n F_t(1+i)^{-t} \quad [2.5]$$

Donde:

VAN = Valor actual neto del proyecto.

I_0 = Inversión inicial del negocio (corresponde al flujo de caja en el año cero).

n = Número de periodos considerados para la evaluación financiera (años).

F_t = Flujo de caja del proyecto en cada periodo "t".

i = Tasa de interés o descuento.

La tasa interna de retorno o tasa de rendimiento de un negocio se calcula cuando el VAN es igual a cero:

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n F_t(1 + \text{TIR})^{-t} \quad [2.6]$$

Donde:

TIR = Tasa interna de retorno de la inversión (determinado para un VAN = 0).

La relación costo/beneficio es un indicador financiero, que relaciona las ventas y costos totales del proyecto; su valor indica los dólares que se obtienen de ganancia por cada dólar invertido en el negocio. Con la ecuación 2.7 se determinó dicho índice.

$$\frac{B}{C} = \frac{\sum_{t=0}^n V_t(1+i)^{-t}}{\sum_{t=0}^n C_t(1+i)^{-t}} \quad [2.7]$$

B/C = Relación costo -beneficio.

V_t = Ventas totales en cada periodo "t".

C_t = Costos totales en cada periodo "t".

n = Número de periodos considerados para la evaluación financiera (años).

i = Tasa de interés social (12 %).

t = tiempo

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA, TÉRMICA Y MINERALÓGICA DE MUESTRAS DE LODOS ANÓDICOS

Los lodos anódicos fueron recolectados de la unidad de tratamiento de las aguas (ácidas y básicas desgastadas) que se producen en el proceso del tratamiento superficial del aluminio para la producción de perfiles. Este proceso consiste en la mezcla de las aguas en un tanque para regular el pH a 8, luego pasan al proceso de floculación-clarificación y finalmente ya sedimentado pasan a un filtro prensa, donde se descargan los lodos en sacos de capacidad de una tonelada (Solís, 2008. p. 50)

3.1.1 CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LOS LODOS ANÓDICOS

La caracterización física se siguió con la metodología experimental descrita en la Sección 2.1. Se determinó la humedad, área superficial, densidad aparente y real y tamaño de partícula (d_{80}). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 3.1 y en el Anexo I se detallan los cálculos realizados, así como también los el resultado del análisis del área superficial y el cálculo del d_{80} .

El lodo anódico fue de color blanco y está constituido en mayor cantidad de agua como se puede apreciar en la Tabla 3.1, donde se indica que tiene un 80 % de humedad, valor que se asemeja al de Correia et al. (2005) que obtuvo 75 % de humedad. En el Anexo I, Ficha Técnica 1 se muestra el respectivo cálculo para determinar este parámetro.

El valor de pH que se determinó fue de 8 que se muestra en la Tabla 3.1. El valor del pH se debe a que se utiliza altas concentraciones de soluciones alcalinas en el tratamiento superficial del perfil de aluminio. Esto hace que los lodos anódicos tengan un pH básico (Jaramillo, 2006, p. 44).

Por otro lado, las densidades real y aparente fueron de 1,98 g/mL y de 0,41 g/mL, respectivamente; esta gran diferencia se debe en parte a que los lodos secos (se aglomeran) no son compactos, si no que están bastantes sueltos. Por otro lado el tamaño de partícula (d_{80}) de los lodos fue de 88 μm , como se lo muestra en la Tabla 3.1. El cálculo de la densidad real y el d_{80} se muestra en el Anexo I, Ficha Técnica 2 y 3 respectivamente.

En cuanto a la valor de la densidad real del lodo anódico que fue 1,98 g/mL, es un valor muy cercano a los encontrados por Misra (2003) de algunos hidróxidos de aluminio (gibbsita, bayerita, norstrandita), que se encuentra dentro de un rango de 2,0-2,5 g/mL (p.423).

Esta similitud de densidades se puede ser a que lodos anódicos dentro de su composición tienen una buena concentración de hidróxidos de aluminio, que se forman en el proceso de neutralización de las piezas de aluminio (Moraes et al., 2010, p. 120).

Tabla 3.1. Resultados de la caracterización física de los lodos anódicos

Análisis realizado	Lodo anódico	
	Valor obtenido	Unidades
Color	Blanco	
Humedad	80	%
Densidad aparente	0,41	g/mL
Densidad real	1,98	g/mL
Área superficial	17,3	m^2/g
pH	8	-----
Granulometría d_{80}	88	μm

En cuanto al área superficial específica de lodos anódicos por un lado, Mitrakas et al. (2010) encontraron valores que están entre 60 y 216 m^2/g (p. 5); mientras que, en esta investigación el área superficial específica obtenida, fue de 11 m^2/g como se muestra en la Tabla 3.1. Esta diferencia, puede ser a la composición del perfil

de aluminio y de los químicos utilizados en el proceso de tratamiento superficial como son ácido sulfúrico e hidróxido de sodio que modifican la composición química y por ende al área superficial de los lodos. La isoterma de adsorción de nitrógeno se muestra en el Anexo I, Ficha Técnica 4.

La variación de la composición y las propiedades físicas de los lodos anódicos, se debe al tipo de proceso utilizado en la producción de perfiles de aluminio, como se muestra en la sección 1.1.3, donde se menciona la existencia de diferentes técnicas para la etapa de limpieza, decapado y anodizado

3.1.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA, MORFOLÓGICA DE MUESTRAS DE LOS LODOS ANÓDICOS

3.1.2.1 Determinación de la concentración de los metales presentes en los lodos anódicos mediante la espectrofotometría atómica

En la Tabla 3.2, se presentan los resultados obtenidos del análisis químico realizado a los lodos anódicos mediante las técnicas descritas en la sección 2.1.2, además en el Anexo I, Ficha Técnica 5 se muestra el análisis químico realizado a dos muestras de lodo.

Tabla 3.2. Resultados del análisis químico realizado a los lodos anódicos por espectrofotometría de adsorción atómica

Elemento	Valor obtenido (%)
	Lodo anódico
Al	32
Na	0,3
Mg	0,8
Si	2,75
Ca	0,04

Lo atractivo del análisis químico realizado a los lodos anódicos fue la alta concentración de aluminio (32 %) con respecto a los otros metales. Esto podría

deberse a que en el proceso de anodizado, los baños electroquímicos alcalino y ácido, a los que son expuestos los perfiles de aluminio, disuelven a este elemento como se indica en la sección 1.1.1, ecuación 1.1. Otra fuente de aluminio es la que proporciona por el sulfato de aluminio utilizado en la planta de tratamiento de los lodos anódicos como agente floculante (Vieira, Ramos, Viera, 2005, p. 59).

La presencia del silicio (Si), Magnesio (Mg) y calcio (Ca) se deben a que estos metales son parte de la aleación de los perfiles y son disueltos en los procesos lavado, decapado, electroquímicos, y soluciones de neutralización dados a las piezas de aluminio, como se indica en la Sección 1.1.3.2. La Norma INEN presentada en el ANEXO I, Ficha Técnica 6 se indica la concentración de los metales presentes en las aleaciones de los perfiles (Ferlini, Costa y Ferri, 2006, p. 60).

La alta concentración de aluminio presente en los lodos anódicos, evidencia la presencia de compuestos de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) coloidales, sales solubles tales como de Na, Mg, y Ca, y sulfatos (debido a los agentes floculantes) (Ferreira y Olhero, 2002, p. 2243).

La concentración de cada uno de los elementos químicos varía en función de los procesos aplicados, antes y después de la etapa de anodizado. Además, la presencia de los metales depende mucho de la composición de las aleaciones del perfil de aluminio, tal como se indica en la sección 1.1.

3.1.2.2 Caracterización morfológica de muestras de lodo anódico

En la Figura 3.1, se muestra dos imágenes que se obtuvieron de la caracterización química realizada al lodo anódico (110 °C, 24 h) por microscopía electrónica de barrido, además, en el Anexo I, Ficha Técnica 7 se encuentra la composición química. Este ensayo se realizó con el objetivo de encontrar alguna forma cristalina dentro de los lodos, pero como se muestra no se encontró ninguna forma especial. Por el lado, la composición química se determinó presencia de azufre y fósforo.

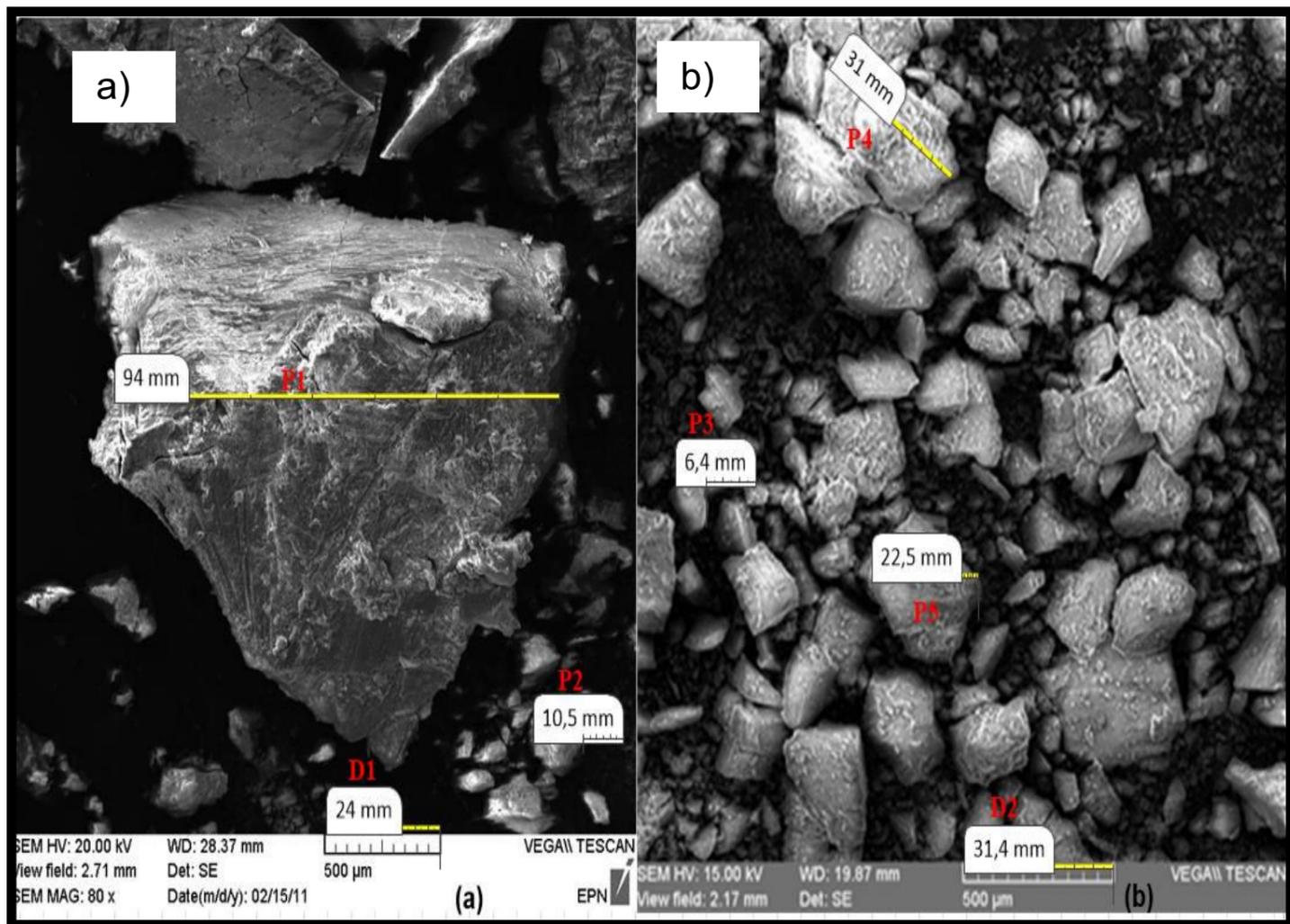


Figura 3.1. Fotografías obtenidas de los lodos anódicos mediante microscopía electrónica de barrido (MEB), (a) corresponde a un acercamiento de 80x y (b) tiene de 40x

La fotografía de la izquierda (a), se generó con un acercamiento de 80x y la de la derecha (b) tiene un acercamiento de 40x. En ninguna de las dos imágenes se puede observar una microestructura definida, o un tamaño homogéneo de partículas. Por lo que, los lodos anódicos secados a 110 °C durante 1 h, no sufren ningún cambio significativo en su estructura.

Lo que se puede apreciar en las imágenes, es que los lodos anódicos presentan tamaños de partículas muy variados. Para el efecto, se tomó en cuenta la distancia D1 y D2, donde 24 mm equivale a 500 μm y 31,4 mm a 500 μm , respectivamente. Con esta equivalencia, y la aplicación de una regla de tres se obtuvo el tamaño de las partículas. Cabe destacar que esto se debe a que lodos se aglomeran después del secado.

En Tabla 3.3 se muestra el tamaño de partículas recolectados de la Figura 3.1 (a) y (b). El tamaño de partícula promedio de los lodos anódicos más grande

corresponde a 1 948 μm , mientras el más pequeño fue de 102 μm , además se tiene un promedio de 626 μm . Esta gran variedad de tamaños, se manifiesta en el valor muy bajo de densidad aparente que se presentó en la sección 3.1.1, que fue de 0,41 g/mL.

Debido a que los lodos anódicos, se generan de la mezcla de las aguas ácidas del anodizado, básicas desgastadas del proceso de decapado y de los procesos previos y posteriores al anodizado de los perfiles de aluminio, no se esperaba un tamaño de partículas homogéneo.

Tabla 3.3. Tamaños de partículas de los lodos anódicos (110 °C por 24 h)

Número de partícula	Tamaño de partícula (μm)
P1	1 958
P2	218
P3	102
P4	494
P5	358
PROMEDIO	626

3.1.2.3 Caracterización de cristalinidad del lodo anódico

La caracterización mineralógica realizada a los lodos anódicos se efectuó con el equipo de difracción de rayos X (DRX) D8 ADVANCE, que utiliza el programa Difrac plus para la cualificación y cuantificación del material. El proceso seguido para la aplicación de esta técnica se describe en Sección 2.1.3.

Los lodos anódicos, previamente secados a 110 °C por 1 h, fueron 100 % amorfos; esto puede ser resultado de la contaminación de varios sustancias, que se utilizan en todo el proceso de producción de perfiles aluminio, que van desde los baños químicos hasta el sellado electroquímicos. Además, todos los residuos de cada etapa de la producción de perfiles de aluminio se mezclan en la planta de tratamie-

nto de aguas residuales. Y por último en el tanque sedimentador donde se mezclan estas aguas, se añade sulfato de aluminio como agente floculante para el proceso de clarificación y así cumplir los estándares de descarga En el Anexo I, Ficha Técnica 8, se muestra el difractograma que se realizó a los lodos anódicos secos a 110 °C por 24 horas (Moraes et al., 2010, p. 121).

3.1.3 CARACTERIZACIÓN TÉRMICA DEL LODO ANÓDICO

3.1.3.1 Lodos anódicos húmedos

Con el análisis TGA (análisis termo gravimétrico) se evalúa la pérdida de peso de los lodos anódicos en función de la temperatura. La Figura 3.2, corresponde a la curva TGA de los lodos anódicos húmedos.

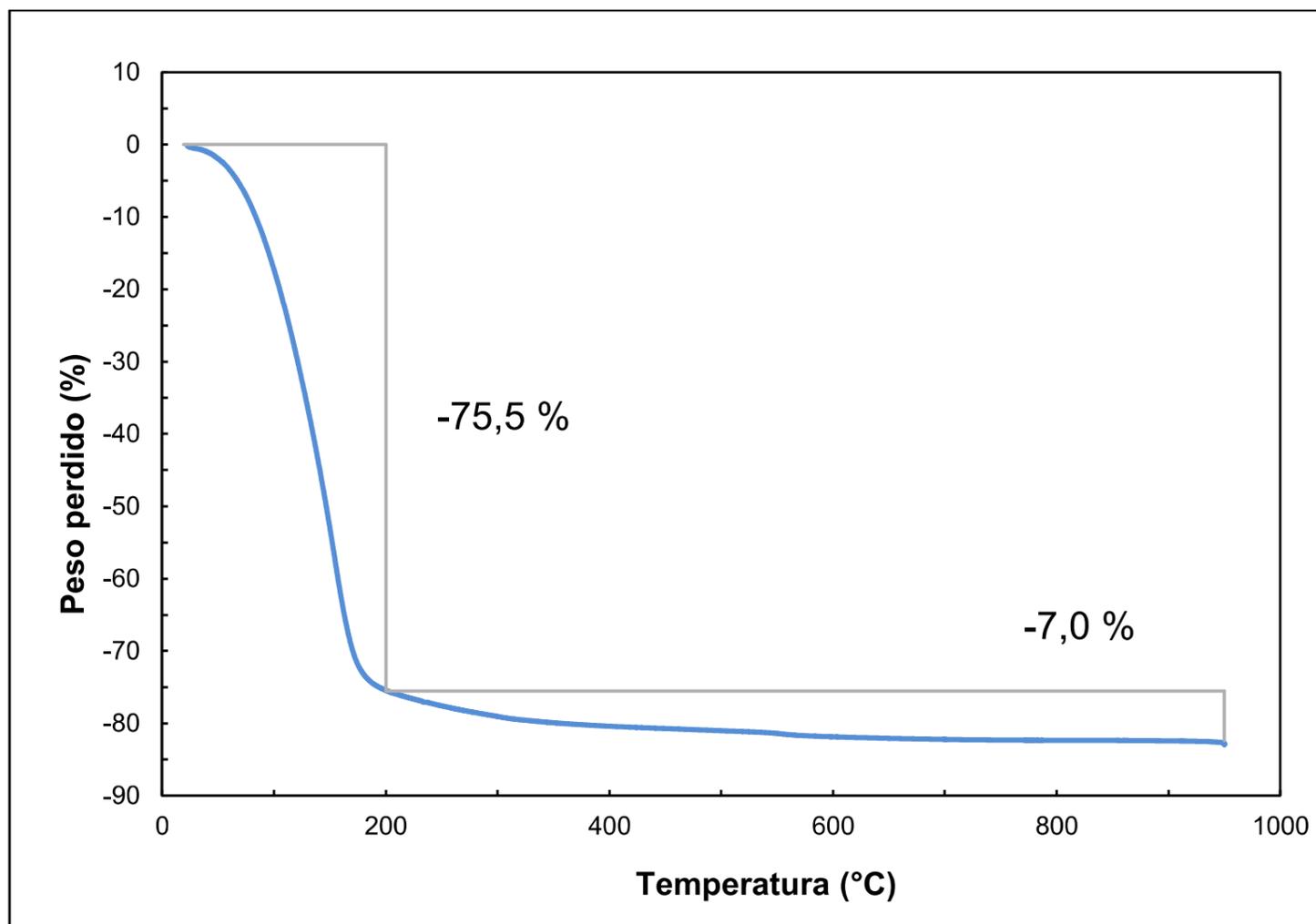


Figura 3.2. Curvas TGA del lodo anódico húmedo

En la Figura 3.2, se observan dos regiones significativas de pérdidas de peso. La primera región es la más notable que esta entre la temperatura de 20 °C y 200 °C,

con un -75,5 % de peso, que corresponde a agua evaporada. La segunda región que es menos significativa, comprende entre 200 °C y 950 °C, la pérdida es de solo -7,0 %. Además, en el ensayo TGA realizado a los lodos anódicos solo se evidencia que no existe ninguna descomposición química, ya que no se evidencia algún cambio importante en la curva TGA.

3.1.3.2 Lodos anódicos secos

El fenómeno ocurrido fuertemente en los lodos anódicos húmedos, se reduce en los lodos anódicos secos (110 °C por 24), como se muestra en la Figura 3.3, donde se indica los resultados de la pérdida de peso en función del tiempo (TGA) y la primera derivada del peso respecto al tiempo (DTG), con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min.

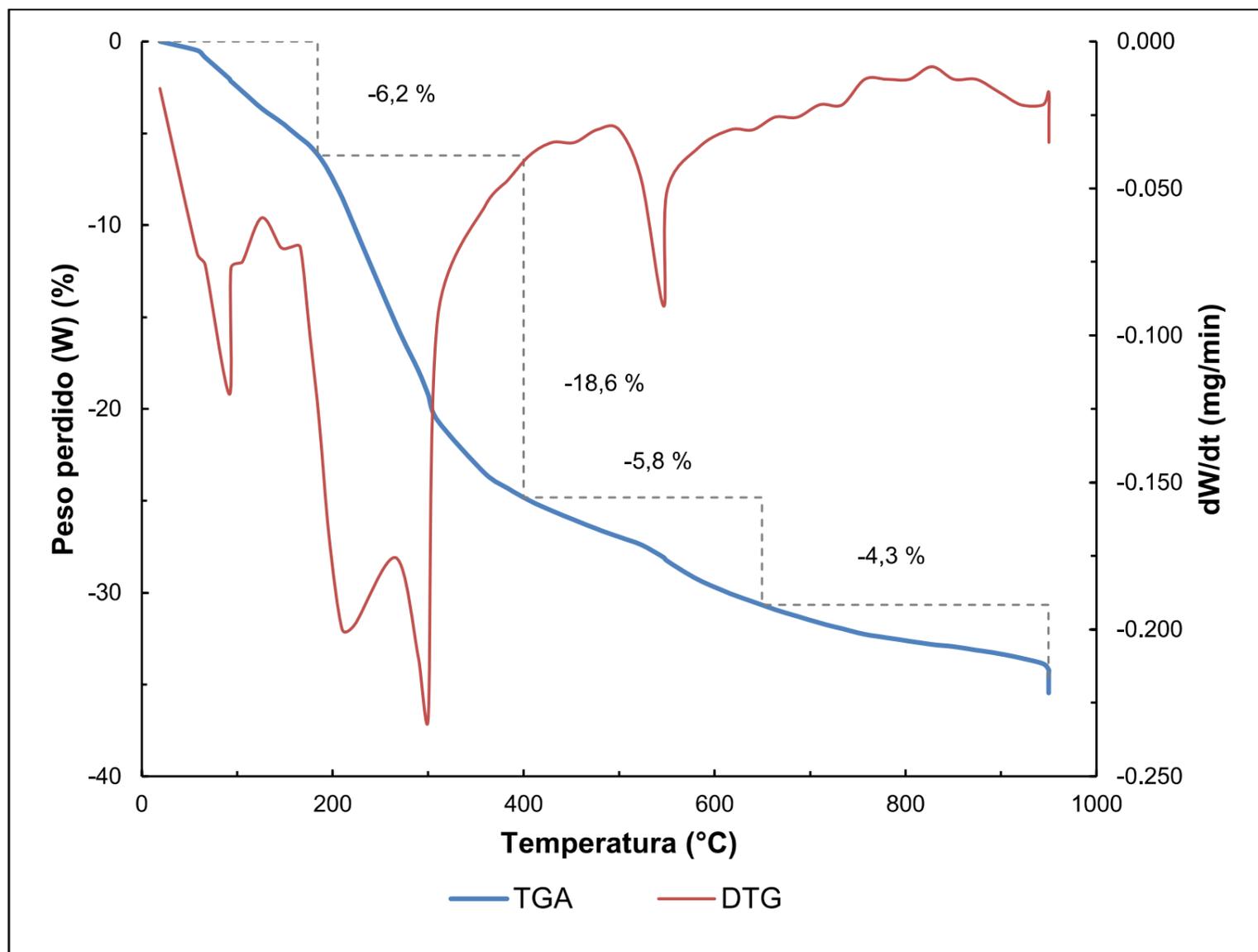


Figura 3.3. Curva TGA de lodos anódicos secos a 110 °C por 24 horas

El resultado de este análisis termogravimétrico de los lodos secos muestra que en todo el rango de temperatura de 19 °C a 950 °C se pierde el 35 % en peso. Además, se puede identificar cuatro regiones importantes: la primera región comprendida entre 19 °C a 184 °C que corresponde a la humedad que no se evaporó en el secado o que se absorbió sobre la superficie del lodo. La pérdida de peso en este rango es cerca al -6,2 % con pico máximo cerca de los 91 °C, como se observa en la curva de la primera derivada (DTG).

La segunda región que comprende desde 184 °C a 400 °C, donde el lodo anódico pierde fuertemente peso que está alrededor del -18,6 %, que podría ser consecuencia de la transformación endotérmica para la transición de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) a bohemita ($\text{AlO}(\text{OH})$). Además, en el análisis DTG evidencia este pico está cercano a los 300 °C (Farinha, Ribeiro, Mendes, Vieira, 2008, p. 4; Ribeiro, Abrantes y Labrincha, 2006, p. 301).

La tercera pérdida de peso (-5,8 %) que comprende entre 400 °C – 650 °C puede asociarse con la transición de la bohemita a γ -alúmina, que está en concordancia con los estudios de Farinha et al. (2008). El análisis DTG donde se evidencia otro pico endotérmico en este rango de temperaturas.

Finalmente para el último tramo de pérdida de peso del lodo anódico que corresponde el -4,3 % se debe principalmente a la descomposición del sulfato de aluminio y sulfato de sodio presente en los lodos anódicos. (Ribeiro et al. 2002, p. 321; Farinha et al. 2008, p. 4).

Ribeiro et al., 2002, propone que la pérdida de peso entre 200 °C y 500 °C se debe a la reacción de descomposición de trihidroxi aluminio como se explicó en la Sección 1.3.2.1, y que la evolución térmica seguida por lodos anódicos es consistente con la estructura de la gibbsita amorfa. Por lo tanto, se puede evidenciar la presencia de hidróxido de aluminio en los lodos anódicos (p. 464).

A partir de este análisis se sugiere que el progreso térmico que presentan los lodos anódicos desde los 19 °C hasta 950 °C puede ser a la deshidroxilación de ocurrida

en la transición de la gibbsita o bayerita a la η -alúmina que esta cerca de 300 °C, mientras que la deshidroxilación ocurrida en la transición de la bohemita a γ -alúmina se da cerca de 450 °C (Tansens et al., 2011, p. 464)

3.2 ENSAYOS HIDROMETALÚRGICOS PARA LA RECUPERACIÓN DE ALUMINIO DE LOS LODOS ANÓDICOS

Los ensayos de lixiviación se realizaron con ácidos orgánicos, inorgánicos, y alcalinos. A través de esta técnica se determinó la influencia del agente lixivante sobre los lodos anódicos con el objetivo de escoger la solución que presente la mayor selectividad y mayores recuperaciones de aluminio. Para cumplir este propósito, se trabajó con concentración de 100 g/L, en volúmenes de 100 mL y con el 1 % de sólidos (5 g de lodos anódicos con 80 % humedad). La recuperación del aluminio se evaluó por medio de balances metalúrgicos, en los cuales se trabajó con los volúmenes adquiridos de las soluciones fuertes, de lavado y relave.

3.2.1 LIXIVIACIÓN EN PULPAS DILUIDAS CON ÁCIDOS INORGÁNICOS

En los ensayos de lixiviación de pulpas diluidas que se efectuaron con ácidos inorgánicos, a partir de: clorhídrico, fluorhídrico, nítrico, sulfúrico de concentración 100 g/L. Se trabajó con 1 % de sólidos (5 g de lodos con un 80 % de humedad) en 96 mL de solución, durante 24 h de operación en lecho agitado a una velocidad de 600 rpm⁻¹. En la Figura 3.4 se muestra los resultados.

En la Figura 3.4 se muestran los resultados obtenidos de la recuperación de aluminio presente en los lodos anódicos. Con la solución de ácido clorhídrico se logró una recuperación de 10,38 %, mientras que con las soluciones de fluorhídrico, nítrico y sulfúrico se obtuvo 10,77 %, 10,38 % y 10,23 % respectivamente. Como se puede observar, la recuperación total de aluminio cuando se utilizaron las soluciones ácidas inorgánicas fue baja, lo cual indica que el aluminio presente en los lodos anódicos (32 %) no se puede recuperar por esta alternativa.

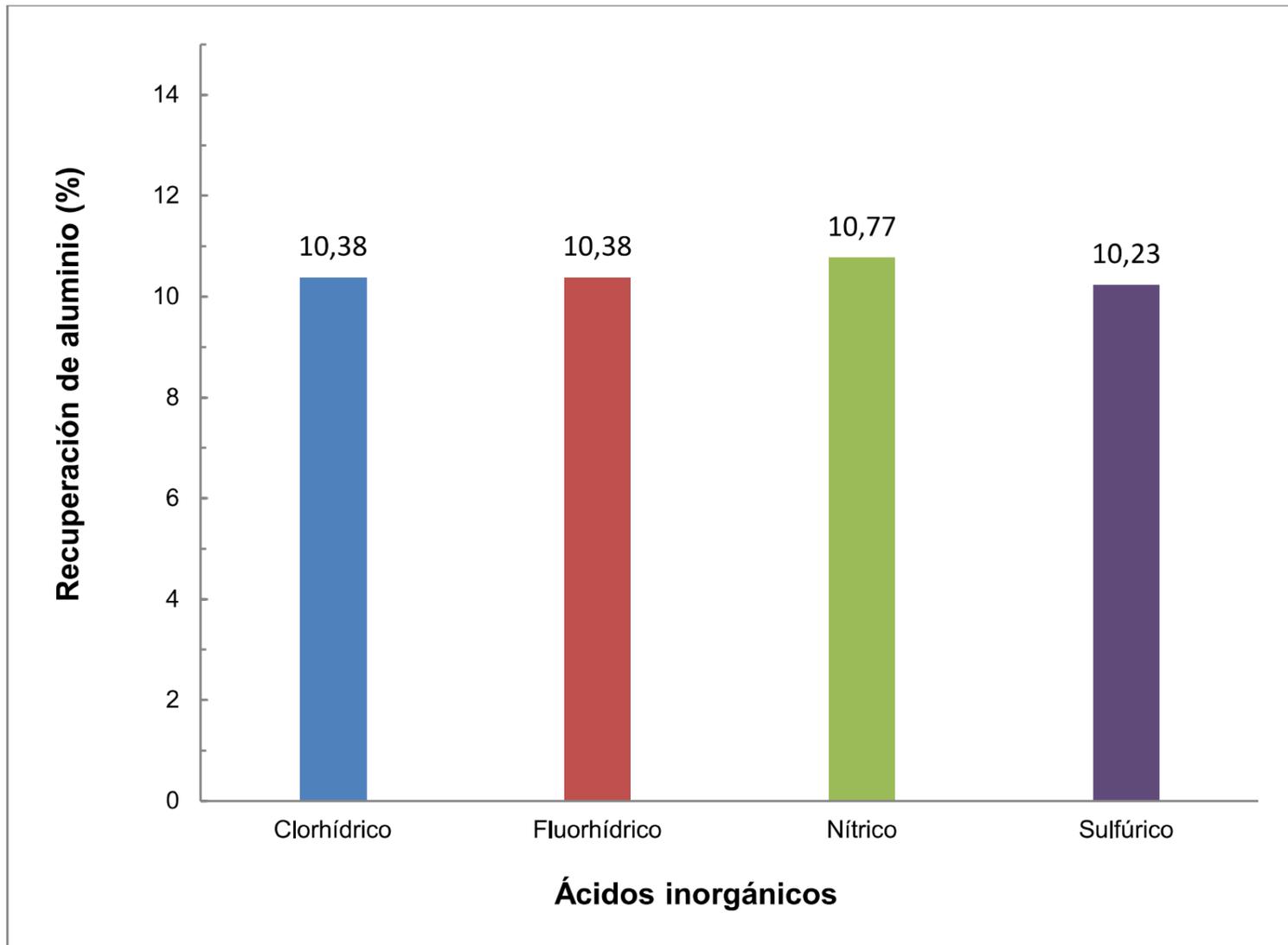


Figura 3.4. Recuperación de aluminio en soluciones ácidas inorgánicas de concentración 100 g/L (1 % de sólidos, tiempo = 24 h, 600 rpm⁻¹)

En la Tabla 3.4, se muestran los volúmenes y recuperación que se obtuvieron con cada uno de los ácidos inorgánicos, para la evaluación de la influencia del agente lixivante sobre las pulpas diluidas, además en el Anexo II, Ficha Técnica 9 se muestra el balance metalúrgico para el aluminio

Tabla 3.4. Lixiviación en pulpas diluidas de lodo anódico húmedo con agentes lixiviantes ácidos inorgánicos (1 % de sólidos, tiempo =24 h, 750 rpm⁻¹)

Ácido Lixivante	Peso muestra seca (mg)	Solución Fuerte (SF)		Solución de Lavado (SL)		Relave
		Volumen (mL)	Recuperación de Al (%)	Volumen (mL)	Recuperación de Al (%)	Recuperación de Al (%)
Clorhídrico	1050	70	10,38	32	1,40	88,22
Fluorhídrico	1050	66	10,38	31	3,08	86,54
Nítrico	1050	72	10,77	33	1,54	87,69
Sulfúrico	1050	84	10,23	30	1,05	88,72
Promedio de volumen de solución		73,0		31,5		

Los volúmenes recuperados de cada una de las soluciones fuertes en estos ensayos se encuentran en un promedio de 73 mL de solución, por lo tanto, el líquido que absorbió la torta está en un promedio del 27 %. En cuanto a las soluciones de lavado, se utilizó 50 mL de agua destilada para el proceso de lavado de la torta, de esta cantidad se recuperó un promedio de 31,5 mL, por consiguiente, la cantidad de solución de lavado que absorbió la torta está en un promedio de 37 %.

Mientras las recuperaciones de aluminio de los lodos anódicos en la solución fuerte fueron alrededor del 10 %, las soluciones de lavado presentan una recuperación entre el 1 % y 3 %. Por otro lado, el relave obtenido concentra todo el aluminio que no se disolvió en las soluciones fuertes y lavadas, y que está entre el 86 % y 88 %.

Por la baja recuperación que se obtuvieron con estas soluciones no se utiliza soluciones más concentradas, ya que solo producirían problemas de cristalización en las soluciones fuertes. En los siguientes ensayos se utilizará ácidos orgánicos para ver si se obtiene mejores resultados en el proceso de lixiviación,

3.2.2 LIXIVIACIÓN EN PULPAS DILUIDAS CON ÁCIDOS ORGÁNICOS

En los ensayos de lixiviación de pulpas diluidas, que se efectuaron con ácidos orgánicos se emplearon las soluciones ácidas de: acético, cítrico, tartárico de concentración 100 g/L. Se trabajó con 1 % de sólidos (5 g de lodos con un 80 % de humedad) en 96 mL de solución, durante 24 h de operación en lecho agitado a una velocidad de 600 rpm⁻¹, Por otro lado, para permitir las condiciones de lixiviación del aluminio adecuadas se debe mantener el pH de solución entre 1 y 3, así la recuperación aumenta.

En la Figura 3.5 se muestra los resultados del ensayo de lixiviación con ácidos orgánicos realizado a los lodos anódicos y el Anexo II, Ficha Técnica 10 se muestra el balance metalúrgico para cada uno de los ácidos, los cuales indican la cantidad de aluminio en las soluciones fuertes, lavado y relaves (Tabla AII.6, Tabla AII.7 y Tabla AII.8)

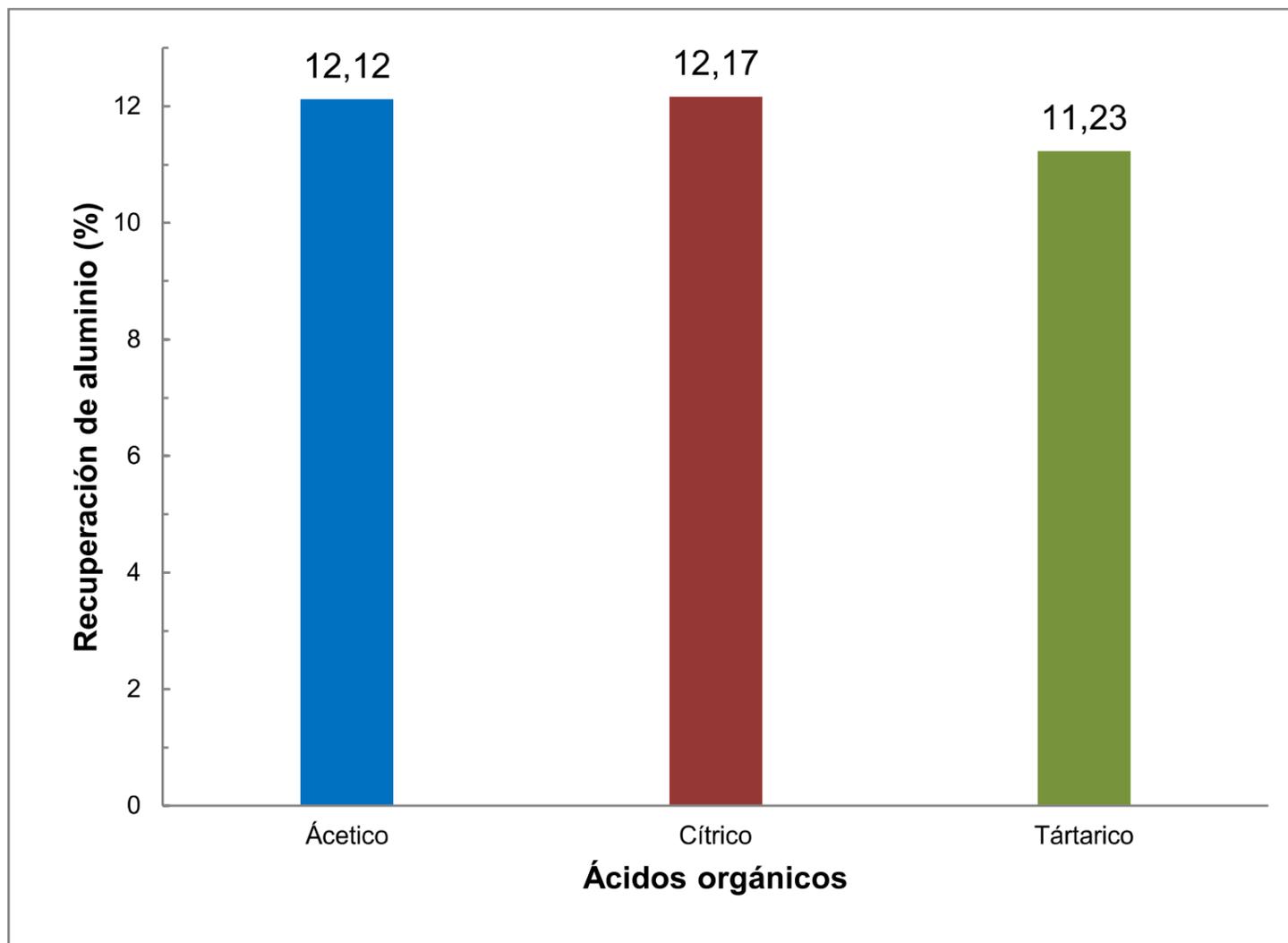


Figura 3.5. Recuperación de aluminio en soluciones ácidas orgánicas de concentración 100 g/L (1 % de sólidos, tiempo = 24 h, 600 rpm⁻¹)

En la Figura 3.5 se muestran los resultados obtenidos de la recuperación de aluminio presente en los lodos anódicos con soluciones orgánicas. Con la solución de ácido acético se logró una recuperación de 12,12 %, mientras que con las soluciones de los ácidos cítrico y tartárico se obtuvo 12,17 % y 11,23 % respectivamente. Como se puede observar, la recuperación total de aluminio cuando se utilizaron las soluciones orgánicas fue baja, se reportaron valores alrededor del 12 % con cada uno de las soluciones propuestas, lo cual indica que el aluminio presente en los lodos anódicos (32 %) no se puede recuperar por esta alternativa

En la Tabla 3.5 se muestran los volúmenes, concentraciones y recuperación que se obtuvieron con cada uno de los ácidos orgánicos, en la evaluación de la influencia del agente lixivante sobre las pulpas diluidas. En otras palabras, se muestra las recuperaciones de aluminio en las soluciones fuertes, lavados y relaves

con cada una de los ácidos orgánicos. En Anexo II, Ficha Técnica No. 9 se detalla el balance metalúrgico.

Tabla 3.5. Lixiviación en pulpas diluidas de lodo anódico húmedo con agentes lixiviantes ácidos orgánicos (1 % de sólidos, tiempo =24 h, 750 rpm⁻¹)

Ácido Lixivante	Peso muestra seca (mg)	Solución Fuerte (SF)		Solución de Lavado (SL)		Relave
		Volumen (mL)	Recuperación de Al (%)	Volumen (mL)	Recuperación de Al (%)	Recuperación de Al (%)
Acético	1050	75	12,12	28	1,37	86,51
Cítrico	1050	77	12,17	29	1,22	86,62
Tartárico	1050	76	11,23	28	1,20	87,56
Promedio de volumen de solución		76,0		28,3		

Los volúmenes recuperados de cada una de las soluciones fuertes en estos ensayos, estuvieron en un promedio de 76 mL de solución, el líquido se absorbió en la torta en un promedio del 24 %. Para el lavado de la torta se utilizó 50 mL de agua destilada, de esta cantidad se recuperó un promedio de 28,3 mL de solución, es decir que, la torta absorbió un 43,33 %.

Las recuperaciones en las soluciones fuertes y lavado relave en la lixiviación de los lodos anódicos presentaron las siguientes concentraciones de aluminio en cada una: en la solución fuerte fueron alrededor del 12 %, las soluciones de lavado presentan una recuperación alrededor del 1 %. Por otro lado, el relave concentra todo el aluminio que no se disolvió en las soluciones fuertes y lavadas, y que está entre el 86 % y 87 %.

La baja recuperación del aluminio por medio de los ácidos acético, cítrico, tartárico se descarta debido a que no sería rentable económicamente y técnicamente por esta vía.

En el siguiente ensayo se utilizará hidróxido de sodio como agente lixivante debido a que tanto los ácidos orgánicos como los inorgánicos usados tuvieron baja selectividad por el aluminio.

3.2.3 LIXIVIACIÓN EN PULPAS DILUIDAS CON HIDRÓXIDO DE SODIO

En los ensayos de lixiviación de pulpas diluidas, se empleó la solución alcalina de hidróxido de sodio de concentración 100 g/L. Se trabajó con 1 % de sólidos (5 g de lodos con un 80 % de humedad) en 96 mL de solución, durante 24 h de operación en lecho agitado, a una velocidad de 600 rpm⁻¹.

Los resultados mostrados en la Tabla 3.6 demuestran que la extracción del aluminio presente en los lodos anódicos con hidróxido de aluminio como agente lixivante, existe la mayor recuperación, que fue del 97,48 %, comparada con las soluciones ácidas orgánicas e inorgánicas, que estuvieron entre el 10 % y 12 %, respectivamente

Tabla 3.6. Lixiviación en pulpas diluidas de lodo anódico húmedo con agente lixivante básico (1 % de sólidos, tiempo =24 h, 750 rpm⁻¹)

Agente Lixivante	Peso muestra seca (mg)	Solución Fuerte (SF)		Solución de Lavado (SL)		Relave
		Volumen (mL)	Recuperación de Al (%)	Volumen (mL)	Recuperación de Al (%)	Recuperación de Al (%)
Hidróxido de sodio	1050	75	97,48	28	2,06	1,02

El volumen de la solución fuerte en este ensayo, fue de 75 mL de solución, el líquido se absorbió en la torta en un 25 %. Para el lavado de la torta, se utilizó 50 mL de agua destilada, de esta cantidad se recuperó 28 mL de solución de lavado, es decir que, la torta absorbió un 44 %.

En el tratamiento superficial dado a las piezas de aluminio se utilizan químicos como: ácidos nítrico, sulfúrico, y alcalino como hidróxido de sodio, etc.; al final, las aguas desgastadas de estos procesos pasan a la planta de tratamiento de aguas residuales, donde se mezclan en un solo tanque. Esto genera que los lodos anódicos adquieran una composición química heterogénea, esta podría ser la razón por la que se tiene bajas recuperaciones de aluminio de los lodos anódicos, tanto en la lixiviación ácida inorgánica como orgánica (Correia et al. 2005, p. 341).

Por otro lado, el hidróxido de sodio fue un buen agente lixiviante, esto se debe a que este es el disolvente tiene una alta selectividad de disolución del óxido de aluminio y es por esta razón se utiliza en el proceso Bayer para la extracción de aluminio del mineral bauxita. El compuesto formado en la lixiviación es el aluminato de sodio que se utiliza en la industria del papel para el proceso de encolado. En el Anexo II, Ficha Técnica 11 se muestra el balance metalúrgico para este ensayo (González et al., 2000, p. 1).

3.3 ENSAYOS DE RECUPERACIÓN DE ALUMINIO POR PROCESOS PIROMETALÚRGICOS

Mediante estos ensayos, se pretende determinar la influencia de la temperatura sobre la microestructura de los lodos anódicos, ya que los lodos anódicos secados a 110 °C son totalmente amorfos. Para cumplir este objetivo, previamente se secó los lodos anódicos a 110 °C por 24 horas, y después se calcinaron a temperaturas comprendidas entre 200 ° y 1 200 °C.

Las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB), permitieron observar el cambio en la microestructura que sufren los lodos anódicos en las diferentes temperaturas.

3.3.1 CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE LA FASE CRISTALINA DE LOS LODOS ANÓDICOS CALCINADOS

La caracterización mineralógica de los lodos calcinados se efectuó en el equipo de difracción de rayos X (DRX) D8 ADVANCE, que utiliza el programa Difrac plus para la cualificación y cuantificación del material, se procedió como se menciona en la sección 2.1.3. Las muestras analizadas en el equipo, fueron previamente secadas a 110 °C, por 1 h, el resultado obtenido de los lodos anódicos calcinados se muestra en los espectros de difracción de rayos X, que encuentran en las Figura 3.6 y Figura 3.7.

3.3.1.1 Ensayos de calcinación de los lodos anódicos a 200, 600 y 800 °C

En la Figura 3.6, se observan los espectros de DRX del lodo anódico calcinado a las temperaturas de 200, 600 y 800 °C, durante 2 horas en la mufla SNOL 8,2/1100.

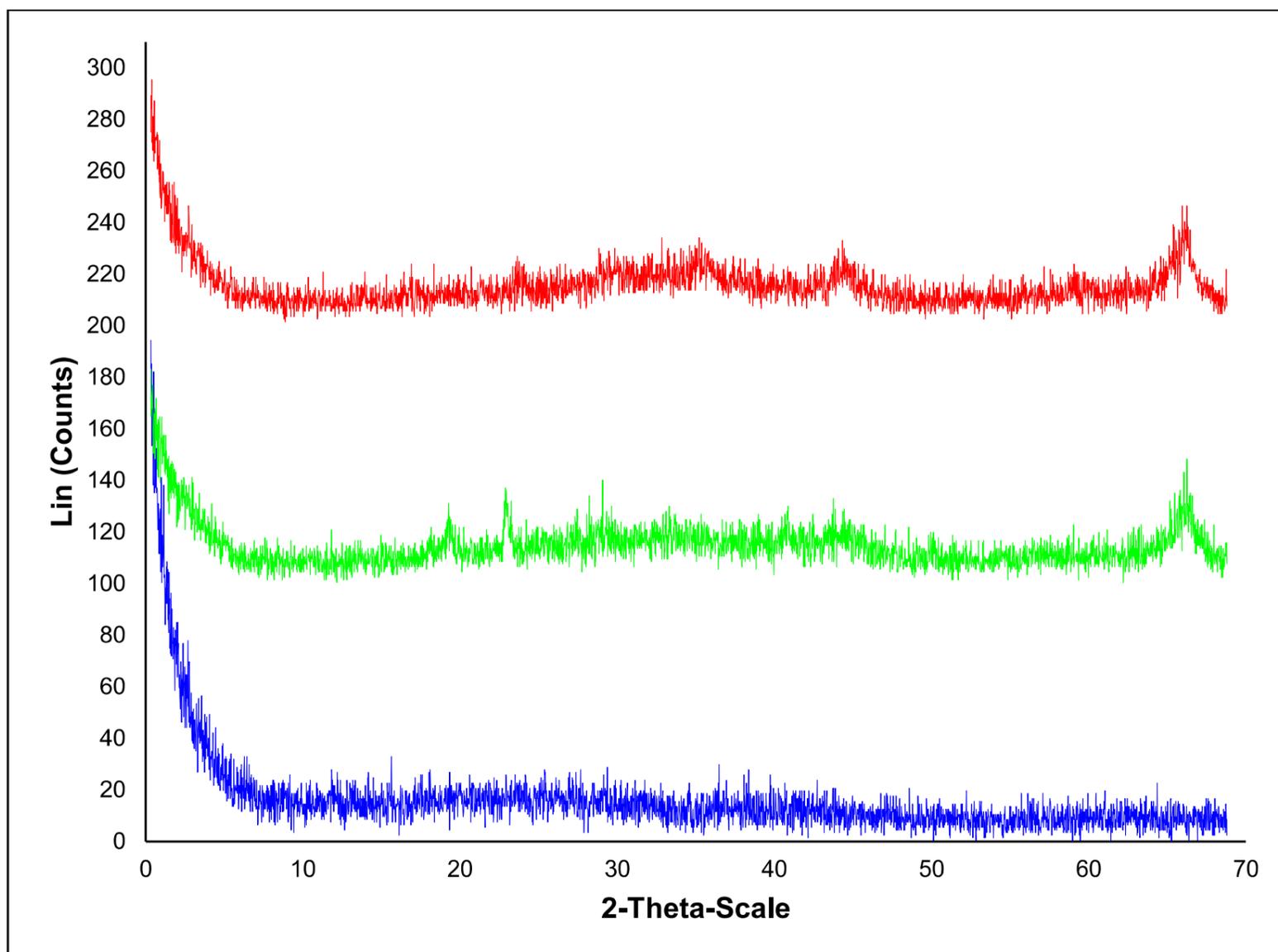


Figura 3.6. Espectro de DRX de los lodos anódicos calcinados a las temperaturas de 200, 600, 800 °C por 2 horas

El espectro DRX (color azul) a 200 °C no muestra ningún pico definido, por lo que a esta temperatura el lodo sigue siendo totalmente amorfo. Por otro lado, los espectros DRX de 600 °C y 800 °C muestran una pequeña elevación de picos no definidos, razón por la cual, no se observa la aparición de alguna fase cristalina. Esto puede ser el resultado de la contaminación y de los químicos empleados en el proceso de anodizado.

Vieira et al. (2005) al mezclar residuos de silicio y lodos anódicos (mullitacion) calcinados a 900 °C, obtuvo picos de γ -alúmina que coinciden con los picos del

espectro de esta investigación (lodos anódicos calcinados a 800 °C), como se muestra en la Figura 3.7 (p. 232).

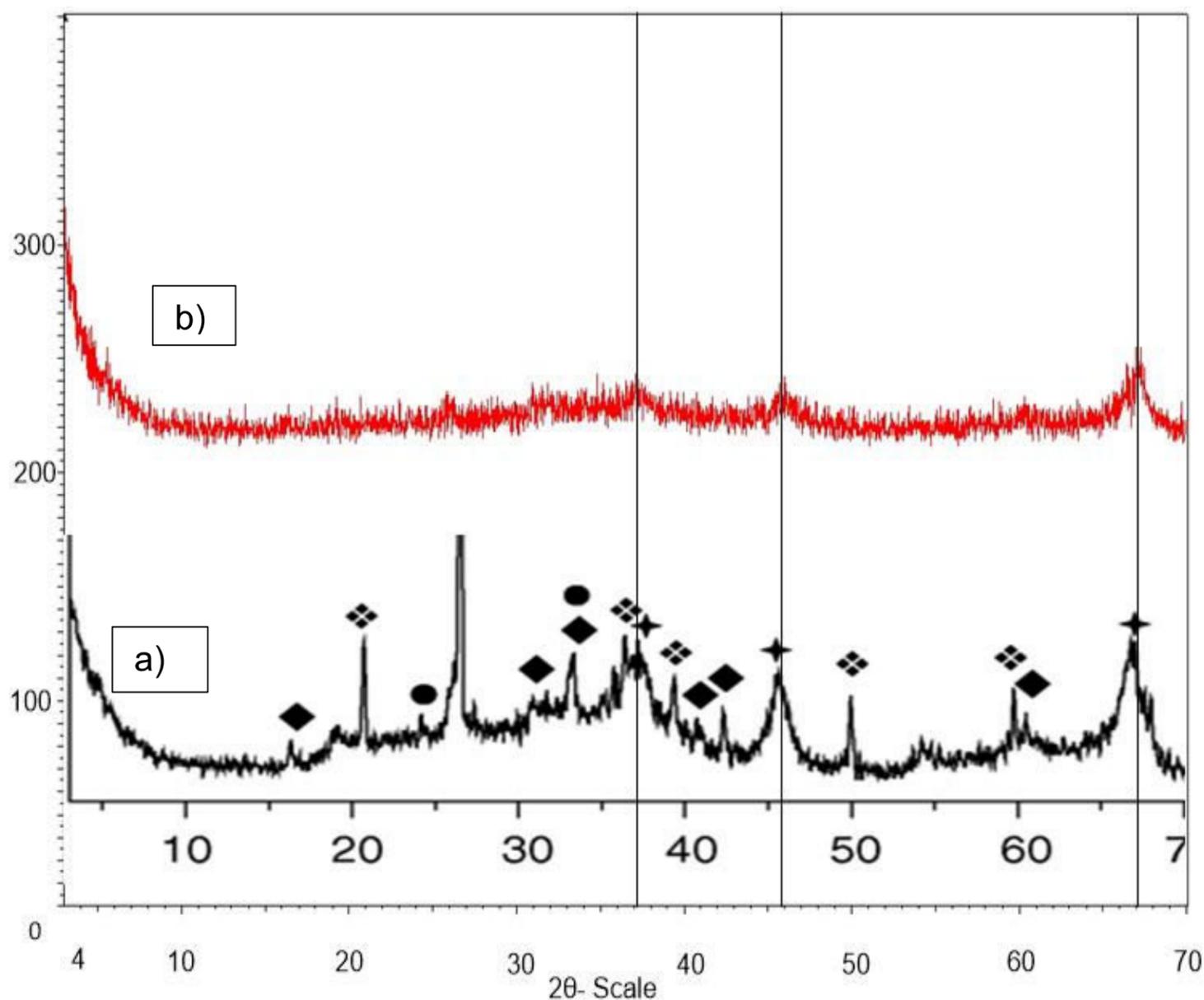


Figura 3.7. Espectro de lodos anódicos calcinados a 800 °C (a), espectro obtenido por Vieira et al. (2005), los picos señalados corresponde a γ -alúmina (900 °C) (b).

La comparación de estos difractogramas se realizó trazando líneas verticales que cruzan los dos espectros. Los picos que se muestran en la Figura 3.8 (b) no están bien definidos, pues los químicos utilizados en los baños tanto electroquímicos, como en los tratamientos superficiales, interfieren en la cristalización de lodos anódicos.

La presencia de γ -alúmina en los lodos anódicos calcinados a 800 °C, revela que los lodos originales están constituidos de algún tipo de hidróxido de aluminio, como la boehmita que se transforma a γ -alúmina a temperaturas comprendidas entre 500 °C a 600 °C, como se indica en la Figura 1.12, sección 1.3.1.

Entonces, se confirma la presencia de γ -alúmina en los lodos anódicos calcinados a 800 °C, debido a la descomposición térmica del hidróxido de aluminio en forma de bohemita presente en los lodos anódicos. Esto también se afirma con el análisis TGA y DTG.

3.3.1.2 Ensayo de calcinación de los lodos anódicos a 1 000 °C

El ensayo de calcinación a 1 000 °C se realizó a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y por dos horas se mantuvo a 1 000 °C en un horno Nabertherm HT 16/16.

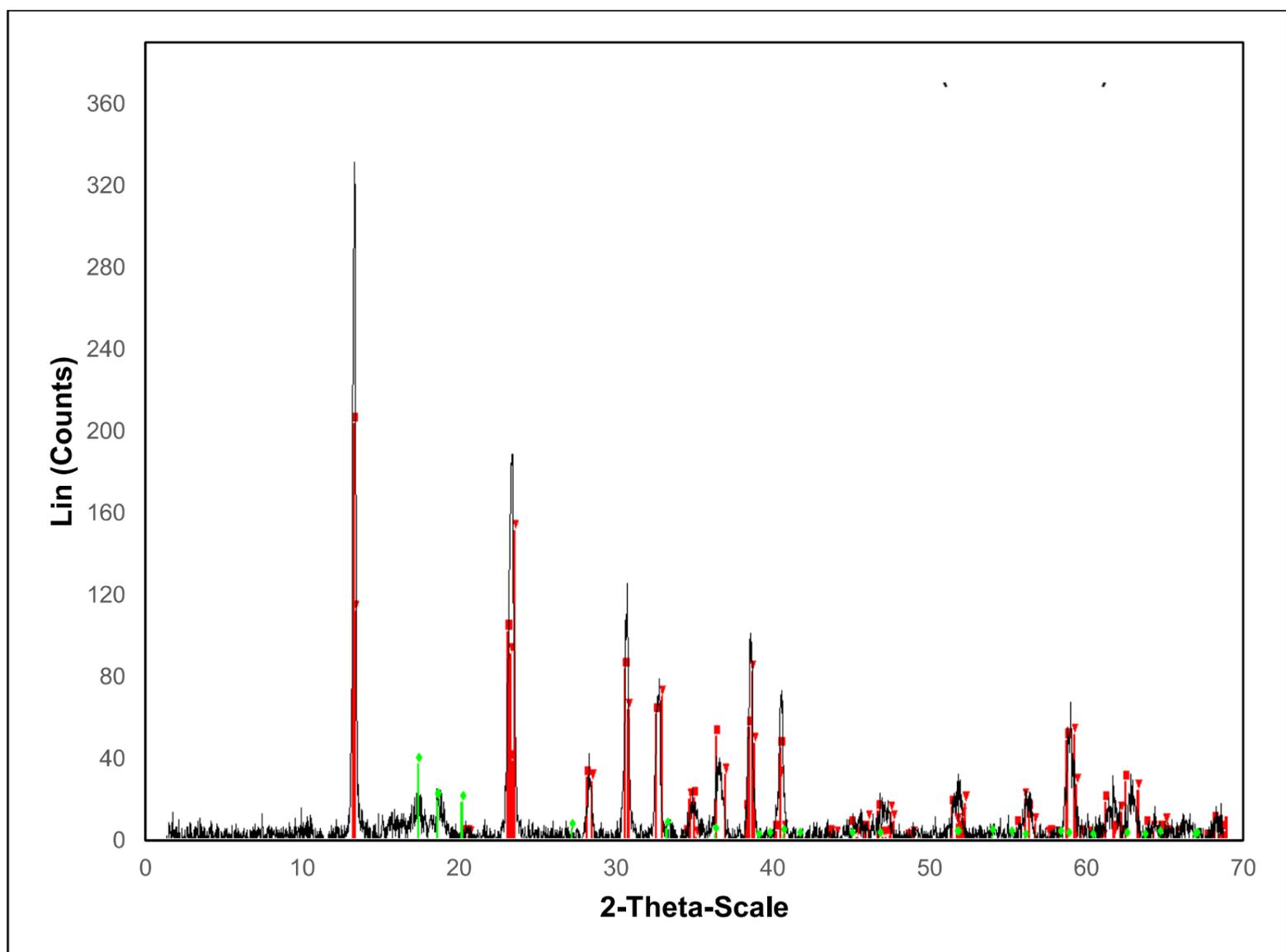


Figura 3.8. Diffractograma (DRX) de lodos anódicos calcinados a 1 000 °C

Los picos rojos corresponden a mullita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), mientras que los picos verdes pertenecen a restos de óxido de silicio en forma de tridimita (SiO_2). La

formación de estas fases se debe a la presencia de silicio y aluminio, en la composición de los lodos anódicos como se muestra en la sección 3.1.2.

La formación de mullita, se da entre la γ -alúmina que se produce por la descomposición térmica del hidróxido de aluminio, presente en lodos anódicos, por lo que, a 1 000 °C la γ -alúmina reacciona con el sílice presente en lodos anódicos, para formar la fase cristalina mullita como muestra la Figura 3.8.

En Ribeiro et al. (2006) en la curva DTA/TGA de los lodos anódicos, evidencia una reacción exotérmica a 980 °C, que se atribuye a la formación de mullita primaria ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$), este resultado también se confirma en esta investigación (p. 301) pero fase al igual que tridimita no son estables ya que solo permanece hasta los 1 100 °C, como se observa en el espectro La desaparición de estas fase se observa al subir la temperatura de calcinación de los lodos anódicos a 1 137 °C en la cual se observa otras fases cristalinas interesantes, como lo muestra el espectro en el Anexo III, Ficha Técnica No. 12

3.3.1.3 Ensayo de calcinación de lodos anódicos a 1 200 °C

Los lodos anódicos se calcinarán con un ciclo de calentamiento de 10 °C/min hasta llegar a la temperatura de 1 200 °C luego se mantuvo la temperatura durante dos horas, como se indica en la sección 2.3.1. A esta temperatura de calcinación (1 200 °C) aparece una fase cristalina más estable, como se muestra en el espectro DRX, Figura 3.9.

En el difractograma que se muestra en la Figura 3.9 se puede ver claramente la transformación de la fase mullita que se ve en la Figura 3.8 en corindón (α -Alúmina) y cristobalita (SiO_2). Por otro lado, en el difractograma también se muestra una coexistencia de gibbsita con corindón, ya que ésta no se ha transformado totalmente en alúmina (picos color morado). Por otro lado, tenemos fosfato de aluminio (AlPO_4) y gehlenita ($\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSiO}_7)$) debido a restos de componentes que son parte de la composición inicial.

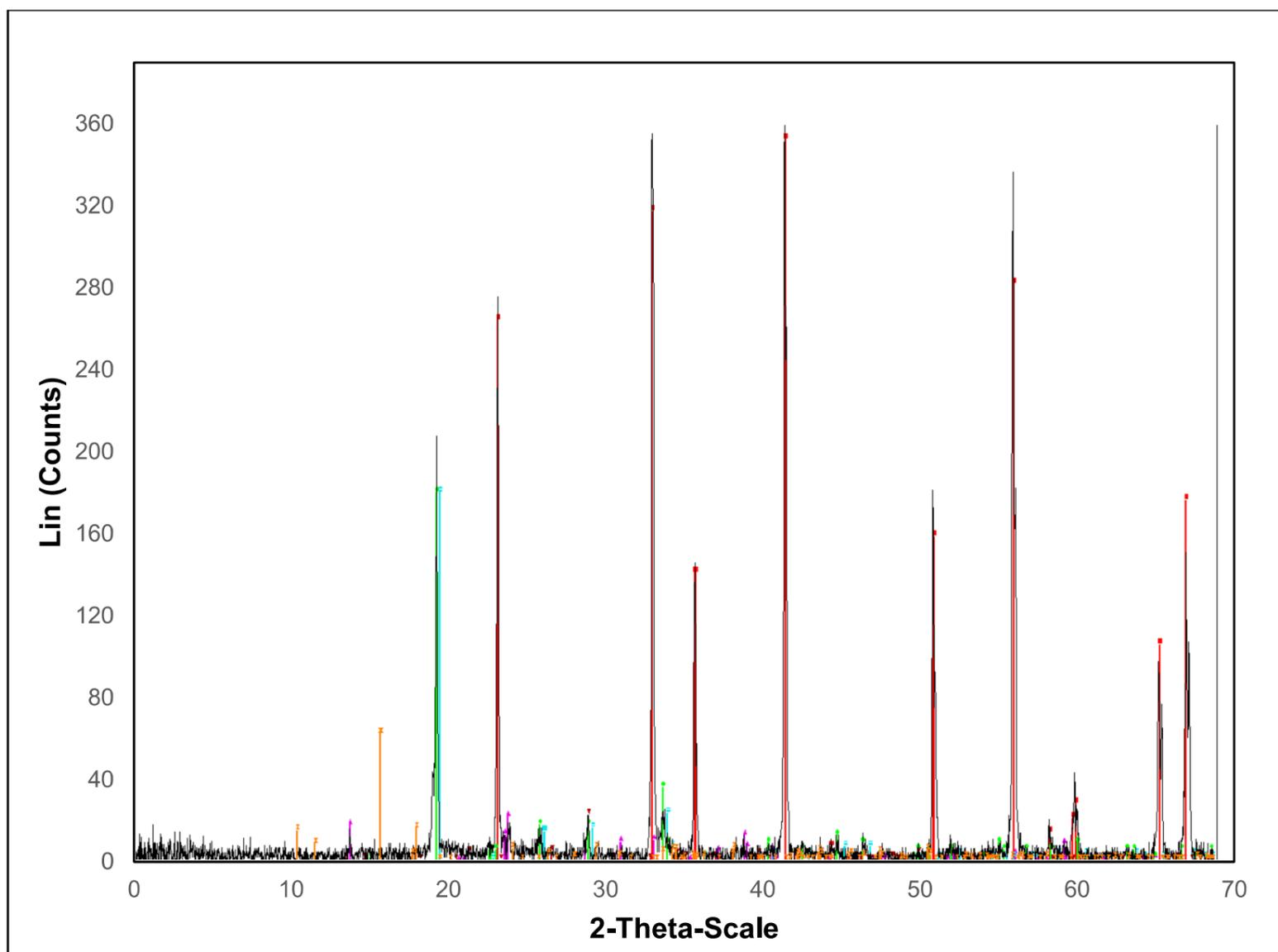


Figura 3.9. Difractograma (DRX) de lodos anódicos calcinados a 1 200 °C

La formación de corindón a 1 200 °C, esto se debe a la presencia de aluminio en los lodos anódicos como hidróxido de aluminio que posiblemente puede estar como gibbsita (Farinha et al., 2008, p. 8).

La transformación que sufren los lodos anódicos a 1 200 °C, se corrobora mediante las técnicas de microscopía electrónica (MEB) y energía de dispersión de rayos X (EDX), que se indica en el Anexo III, Ficha Técnica 13.

En la Tabla 3.7 se observa el análisis cuantitativo de la muestra de lodo calcinado a 1 200 °C, donde se muestra claramente que la fase cristalina corindón (óxido de aluminio) está en mayor porcentaje (88 %).

La otra fase cristalina que se formó durante el tratamiento térmico expuesto lodos anódicos es la cristobalita, que se encuentra en un 8 %. La presencia de este elemento se debe a que el silicio es parte de la aleación del perfil de aluminio, al

ser expuesto a los procesos de lavado, anodizado es disuelto, y llevado por los efluentes. Por otro lado, el fosfato de aluminio se encuentra en un 2 %. Y por última, el 2 % faltante está formado de óxidos de calcio, sodio y magnesio, que son parte de la concentración inicial de lodos anódicos.

Tabla 3.7. Composición mineralógica de los lodos calcinados a 1 200 °C

Minerales	Porcentaje (%)
Corindón	88
Cristobalita	8
Fosfato de aluminio	2
Otros(compuestos de sodio, magnesio y calcio)	2

3.3.2 CARACTERIZACIÓN DE LOS LODOS ANÓDICOS CALCINADOS A 1 200 °C POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

Con la técnica de difracción de rayos X se logró determinar la fase cristalina más estable que corresponde al corindón. La formación de esta fase cristalina se logró a una temperatura de calcinación de 1 200 °C y con la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) se buscará determinar la forma, tamaño y composición elemental de los cristales formados.

Las fotografías de los lodos anódicos y los espectros químicos con EDX (energía dispersa de rayos X), se obtuvieron de la muestra global y de los cristales puntuales que se formaron al ser sometido a este proceso térmico en un horno eléctrico, donde se utilizó un gramo de muestra.

La Figura 3.10 muestra una fotografía global tomada por el equipo de microscopia electrónica de lodos calcinados a 1 200 °C junto con su espectro químico (EDX), donde se identifica microestructuras bien definidas tales como: hexágonos, esferas y barras planas, como se muestran en las Figura 3.11 y Figura 3.12, que representan fotografías puntuales de estos cristales.

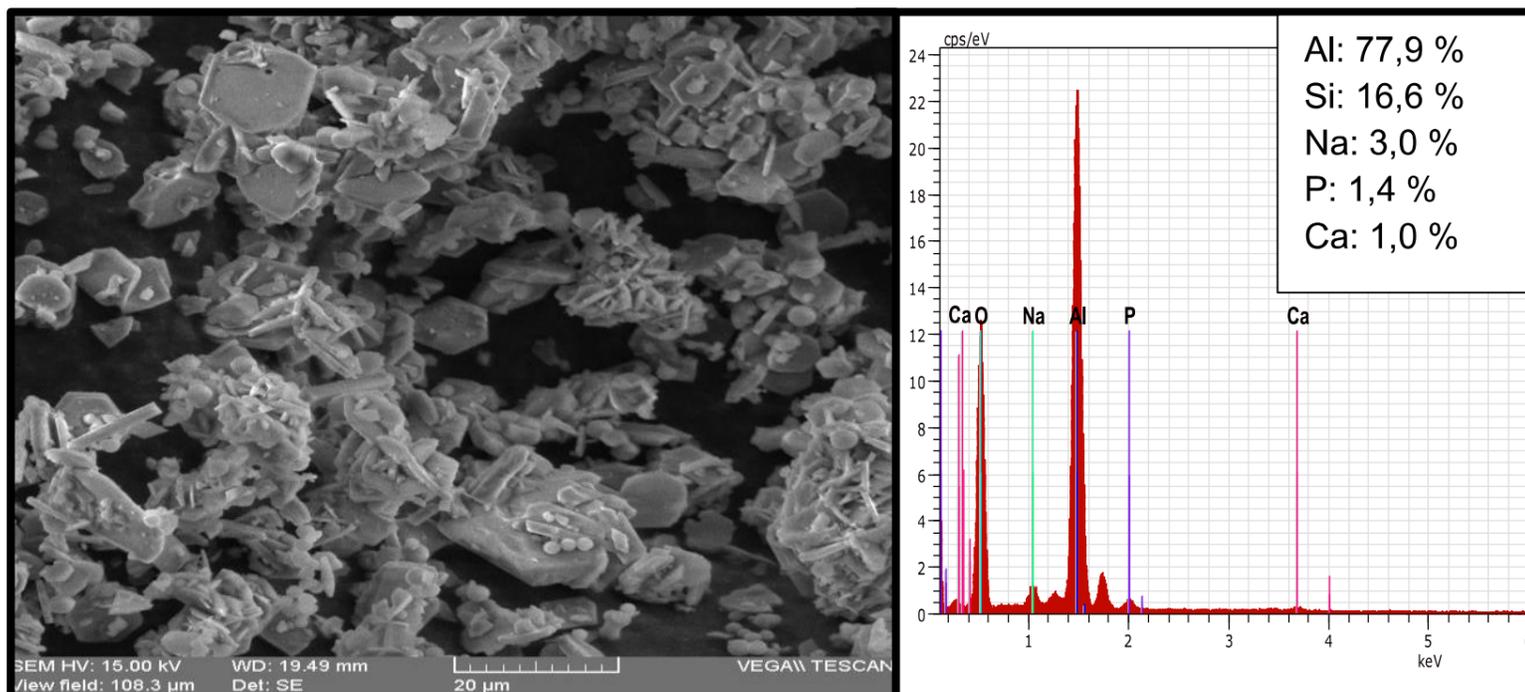


Figura 3.10. MEB de los lodos anódicos calcinados a 200 °C, con su respectivo espectro químico EDX (energía dispersa de rayos X)

En el espectro químico que se muestra en la Figura 3.10, se observa una mayor concentración de aluminio 77,9 %, y el silicio con 16,6 % mientras que sodio, fósforo y calcio en menor cantidad 3,0 % y 1,4 % y 1,0 respectivamente. También se evidencia una microestructura no definida, que corresponde a impurezas de lodo anódico. En la Figura 3.11 muestra el resultado del EDX de un cristal puntal en forma de barra.

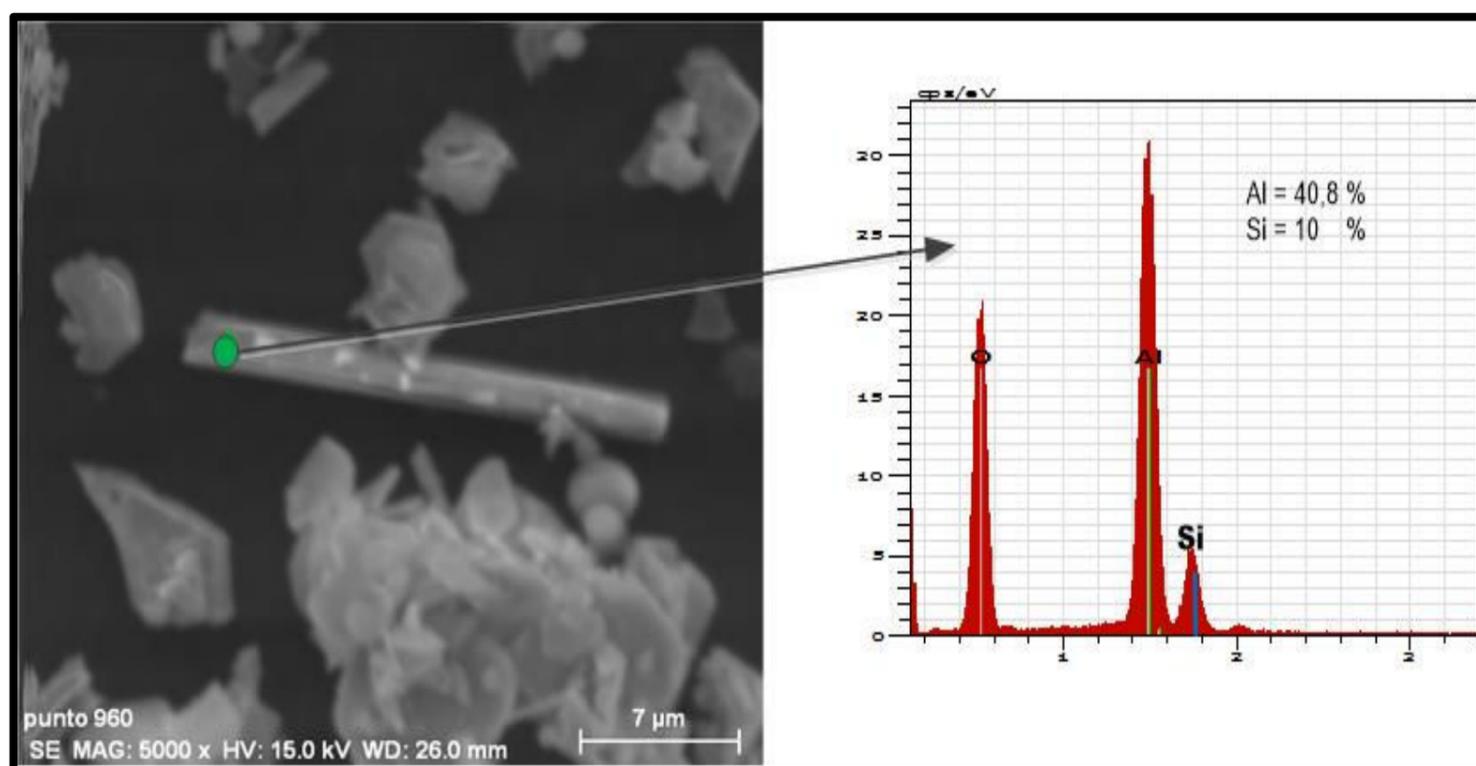


Figura 3.11. Micrografía puntal realizada a los lodos anódicos calcinados a 200 °C, con su respectivo espectro químico EDX

Los resultados EDX determinaron la presencia aluminio en un 40,8 % y silicio en 10,0 %. La presencia de estos dos elementos (Si, Al) en las barras planas, corresponde a restos de mullita que cristalizaron en los lodos anódicos calcinados a 1 000 °C. Lo que se confirma en el espectro de difracción de rayos X de lodos anódicos calcinados a 1 200 °C, donde existen picos muy pequeños que corresponden a este compuesto. La forma plana de las barras, es semejante a los cristales obtenidos por métodos de mullitización de residuos con alto contenido de aluminio y silicio (Vieira, et. al. 2005, p. 62).

Mientras que en la Figura 3.12 el análisis EDX muestra un cristal puntal en forma de espina, donde se observa que la mayor cantidad corresponde al silicio con un 40,8 %, en menor cantidad se encuentra el aluminio con un 8,2 %; y como impurezas se tiene el potasio con 3,7 % y sodio con 1,0 %. Lo que podría ser la cristobalita.

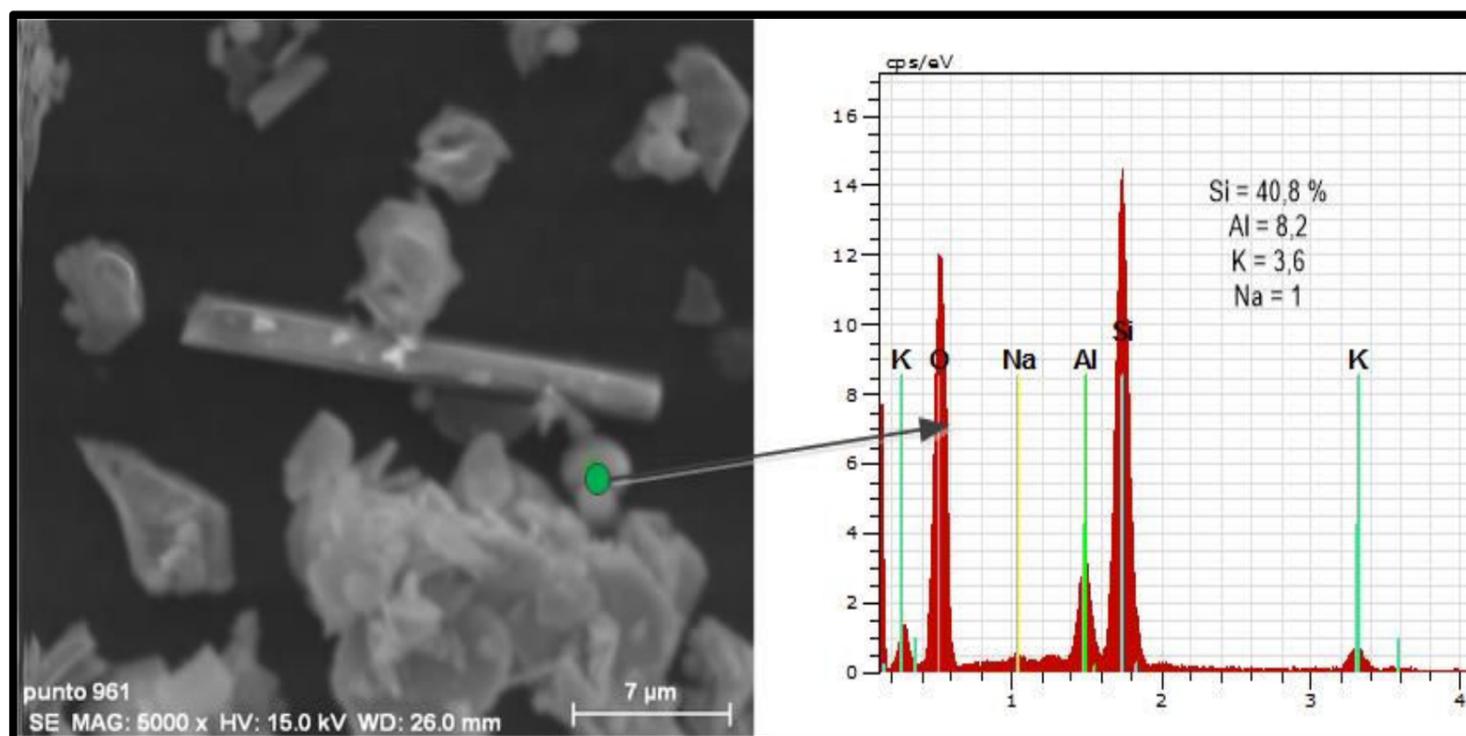


Figura 3.12. Micrografía puntal realizada a los lodos anódicos calcinados a 1 200 °C, con su respectivo espectro químico EDX

Kleebe et al. (2001), realizaron estudios para sintetizar mullita a partir de la mezcla de sílice amorfa (pureza del 98 %) con α -alúmina (pureza del 89 %), y obtuvieron la fotografía de la Figura 3.13 (a). En dicha microestructura, se observan esferas que corresponden a la sílice amorfa y hexágonos que son α -alúmina, similares a los obtenidos en esta investigación (p. 2 522).

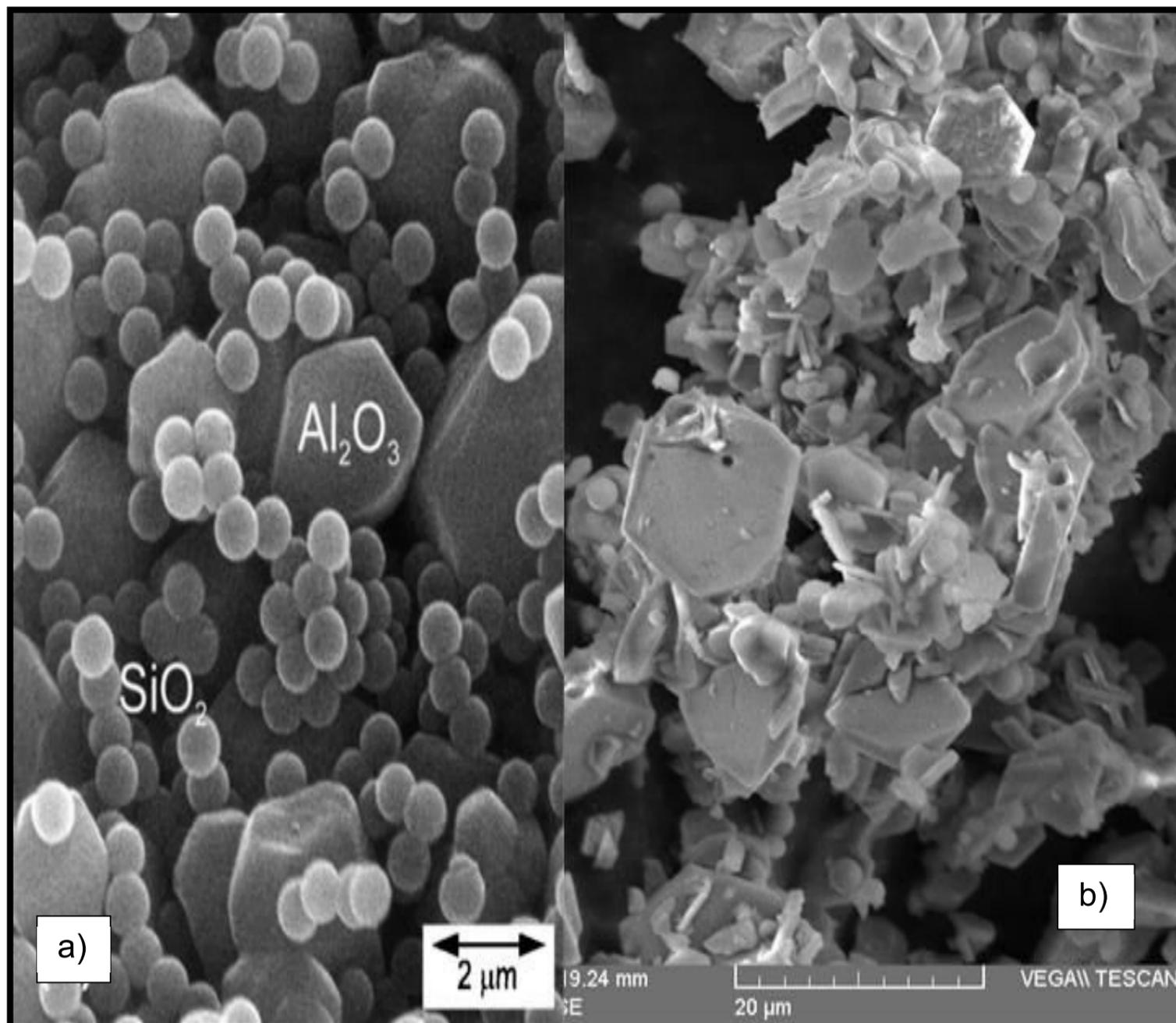


Figura 3.13. (a) Micrografía de la investigación llevada a cabo por Kleebe et al. (2001), (b) micrografía de lodos anódicos calcinados a 1 200 °C en esta investigación

Con la Figura 3.13, se confirma que la fase cristalina en forma de hexágono corresponde a α -alúmina (corindón), mientras que la forma esférica es la presencia de la cristobalita (óxido de silicio).

Lo que más se evidencia en la microestructura de los lodos calcinados son los hexágonos en forma de placas, y una baja cantidad de esferas. Esto se confirma en el espectro DRX mostrado en la sección 3.3.1.3, donde se observan picos que corresponden a la presencia de α -alúmina, así como la cristobalita.

La Tabla 3.8 muestra los resultados de las dimensiones de los cristales que se formaron. Las barras tienen un mayor tamaño (21,6 μm) que los cristales en forma de hexágono (6,9 μm), y las esferas son las más pequeñas con 2,3 μm .

Tabla 3.8. Tamaño de los cristales formados al calcinar a 1 200 °C

Formas de cristales	Tamaño promedio (µm)
Esferas	2,3
Hexagonales	6,9
Barras	21,6

3.3.3 DETERMINACIÓN DEL ÁREA SUPERFICIAL DE LOS LODOS ANÓDICOS CALCINADOS A 1 200 °C Y 600 °C

Los valores de área superficial de los lodos anódicos se encontraron a través del método BET, con ayuda del equipo Quantachrome NOVA® 4200e Surface Area Analyzer. Este ensayo se muestra en el Anexo III, Ficha Técnica 14.

Los resultados obtenidos de los ensayos hechos a los lodos anódicos calcinados a diferentes temperaturas se presentan en la Tabla 3.9. Los lodos secos a 110 °C por 24 horas mostraron tener un área superficial de 17,3 m²/g, valor que se discutió en la sección 2.1.1.5. Mientras que los lodos anódicos calcinados a 600 °C y 1 200 °C, tienen un valor de 41,4 y < 0,3 m²/g, respectivamente.

Tabla 3.9. Área superficial a las diferentes temperaturas de calcinación de los lodos

Temperatura (°C)	Área superficial (m²/g)
110	17,3
600	41,4
1200	<0,3

La Figura 3.14 muestra la variación del área superficial de los lodos calcinados en función de la temperatura, donde se observa un máximo a 600 °C. Antes de alcanzar esta temperatura hay un aumento del área superficial, en tanto que después de la misma disminuye, hasta conseguir un valor de < 0,3 (m²/g) a 1 200 °C.

El aumento del área superficial de los lodos anódicos, se debe a la pérdida paulatina de agua ligada en el hidróxido de aluminio como lo muestra la curva TGA, que se muestra en la sección 3.1.3.2, lo que provoca huecos y forma una gran porosidad interna.

La formación de estos huecos en la superficie del lodo anódico está muy ligado al cambio de la estructura. Mientras que la disminución del área superficial de los anódicos provoca la consolidación del sólido, que se refleja a los 1 200 °C (corindón), donde se tiene el bajo más bajo, ($< 0,3 \text{ m}^2/\text{g}$) pero con una elevada densidad ($3,2 \text{ g}/\text{cm}^3$). (Misra, 2003, p. 6).

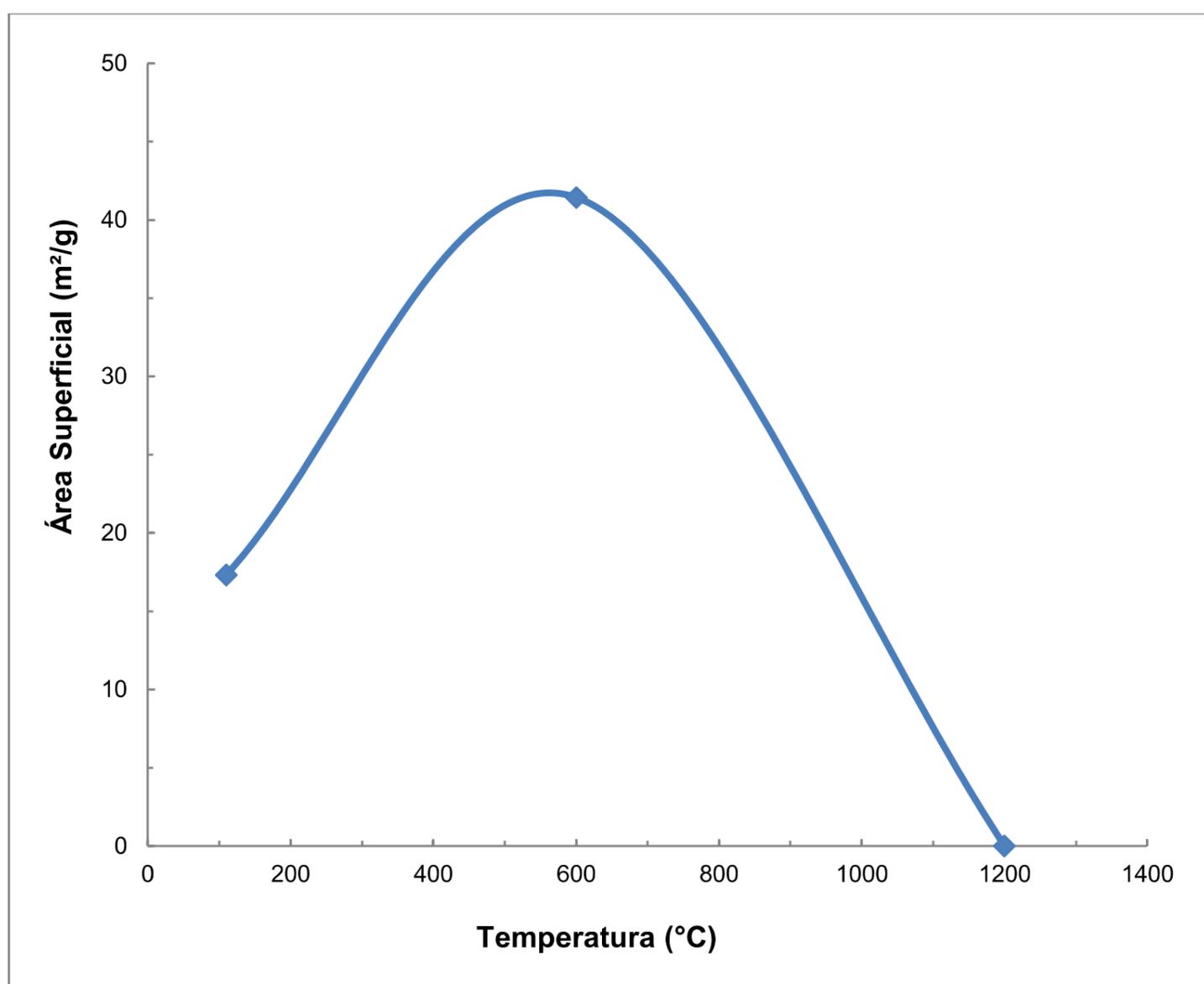


Figura 3.14. Variación del área superficial de los lodos anódicos con la temperatura de calcinación

La variación del área superficial está muy relacionado por los proceso deshidroxilación ocurrido por las transiciones que sufre del hidróxido de aluminio con la temperatura (Tansens et al., 2011, p. 464)

3.3.4 CARACTERIZACION FISICA DE LOS LODOS CALCINADOS A 1 200 °C

La densidad real, tamaño de partícula y área superficial de los lodos calcinados a 1 200 °C se realizó como con la metodología descrita en la sección 2.3.2. El cálculo del d_{80} se muestra en el Anexo III, Ficha Técnica 15.

La densidad real de los lodos calcinados fue de $3,2 \text{ g/cm}^3$, mientras que el de una alúmina comercial A21 es de $3,9 \text{ g/cm}^3$. Por otro lado el área superficial de los lodos anódicos fue menor a $0,3 \text{ m}^2/\text{g}$ y de la alúmina comercial A21 es de $0,6 \text{ m}^2/\text{g}$. Y por último el tamaño de partícula (d_{80}) fue de $60 \text{ }\mu\text{m}$ y $55 \text{ }\mu\text{m}$ para los lodos calcinados y la alúmina comercial A21 que se muestra Anexo III, Ficha Técnica 16 respectivamente. Como lo demuestran los valores obtenidos en esta investigación son muy cercanos a la alúmina comercial A21.

Tabla 3.10. Propiedades físicas de los lodos calcinados a 1 200 °C

Propiedades Físicas	Lodos calcinados a 1200 °C	Alúmina comercial A21
Densidad real (g/cm^3)	3,2	3,9
Área superficial (m^2/g)	< 0,3	0,6
Tamaño de partícula (d_{80}) (μm)	60	55

3.4 DEFINICIÓN DEL DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO, DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS Y EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR

3.4.1 SELECCIÓN DE LA MEJOR ALTERNATIVA DE LA VALORACION DE LOS LODOS ANODICOS

Este estudio tiene como finalidad ofrecer una alternativa de tratamiento adaptable técnica, económicamente y ambientalmente para la industria, donde los lodos anódicos no sean vistos como un problema ambiental, si no que sean una alternativa de materia prima. Por consiguiente, con los análisis hechos a los lodos

anódicos determinaron que este es un material muy valioso, debido a que este desecho es rico en aluminio (32 %). Con este dato se aplicó dos alternativas de valoración, que son las siguientes:

- La recuperación de aluminio en solución por procesos hidrometalúrgicos.
- La calcinación de lodos anódicos a altas temperaturas (pirometalurgia)

Los resultados tanto de los procesos hidrometalúrgicos como pirometalúrgicos fueron presentados en las secciones 3.2 y 3.3 respectivamente. Por la vía hidrometalurgia se presentó una recuperación de aluminio de los lodos anódicos del 97,48 % con hidróxido de sodio como agente lixivante, mientras que la recuperación con el resto de soluciones (orgánicas, inorgánicas) estuvo entre el 10 % y 12 %. Por lo tanto, la lixiviación de los lodos anódicos con hidróxido de sodio permitió la recuperación de una materia prima llamada aluminato de sodio como lo muestra la ecuación 1.10.

Al trabajar con la segunda alternativa (pirometalurgia) se logró obtener algunos materiales de interés. Este proceso consistió en calcinar el lodo anódico seco a temperaturas de entre 200 °C a 1 200 °C. Mediante las técnicas de difracción de rayos X y espectroscopia de adsorción se logró notar el efecto de la temperatura en la estructura de lodos anódicos. Por lo que se obtuvo dos estructuras cristalinas interesantes. La primera estructura cristalina se produjo al calcinar a 1 000 °C y la segunda a 1 200 °C. La estructura formada a los 1 000 °C fue la mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) y a los 1 200 °C corresponde a la alúmina más conocida como corindón que es un óxido de aluminio (Al_2O_3). Estas dos materias primas son altamente comercializadas en la industria cerámica, ya que presenta propiedades muy interesantes como son alto punto de fusión (2 072 °C), aislante térmico y eléctrico, estabilidad a altas temperaturas, no reactivos, alta densidad, buena dureza, entre las más importante.

Por otro lado, en la Tabla 3.11 se muestra los resultados de recuperación de aluminio presente en los lodos anódicos tanto por el proceso pirometalúrgico como hidrometalúrgico.

Tabla 3.11. Recuperación de aluminio por los procesos hidrometalúrgico y pirometalúrgicos aplicados a los lodos anódico

RESULTADO OBTENIDO	MÉTODO DE TRATAMIENTO	
	Proceso hidrometalúrgico (Solución de hidróxido de sodio: 100 g/L; 1 % de sólidos, agitación = 600 prmin ⁻¹ , 24 h)	Proceso pirometalúrgico (T= 1200 °C, t = 2 h, 10 °C/min)
Porcentaje de aluminio recuperado	97,48 %	99,06%

La concentración de aluminio por la hidrometalurgia fue del 97,48 %, como aluminato de sodio, mientras que por la pirometalúrgia fue de 99,06 % como óxido de aluminio, como lo muestra la Tabla 3.11. Por consiguiente, la mejor alternativa de valoración de lodos anódicos sería los dos métodos. Por el lado hidrometalugico se obtuvo aluminato de sodio que se utiliza en la industria de producción de papel, como agente de encolado y González et al., 2000, realizó el estudio del procedimiento del lodo para la producción de este material. Por otro lado, la cantidad de hidróxido de sodio para tratar los 5 000 kg/día es de 10 000 toneladas de este químico, además este proceso generaría aguas de lavado (75 m³) y desechos sólidos (223 kg) como se muestra en los ensayos de lixiviación. Por estas razones esta técnica queda descartada para el diseño de la una planta de valoración de los lodos anódicos.

En el proceso pirometalúrgico se recuperó el 99,06 % del aluminio presente en los lodos anódicos. Por un lado se descartó la recuperación de mullita, ya que demostró no ser un material estable a temperaturas superiores de los 1 100 °C. Por otro lado, el corindón formado a los 1 200 °C fue más estable y además presento una alta cristalinidad del corindón en forma de hexágonos, por esta razón este material sería un producto para ser comercializado. Además, el corindón recuperado tiene las propiedades físico-químico similares a la alúmina comercial llamada A21, como se muestra en la Tabla 3.10, que se utiliza para la elaboración de cerámicos refractarios. Además, Ferreira y Ohlera (2002), demostraron que los lodos calcinados pueden ser utilizados para la elaboración de productos cerámicos ricos en alúmina (p. 2 248)

Para la aplicación de la alternativa pirometalúrgica las operaciones unitarias principales serían: secado del lodo anódico hasta alcanzar un 12 % de humedad. El fundamento para un previo secado se debe al análisis termogravimétrico que demuestra que los lodos anódicos con un 80 % solo presenta una gran pérdida de peso hasta los 200 °C, a diferencia de lo que ocurre con los lodos previamente secado, donde se muestra una secuencia de pérdida de peso con la temperatura debido a la transición de hidróxido a corindón. El material secado pasa a la calcinación a 1 200 °C para obtener el material cristalino. Por último se realiza una molienda para homogenizar el material. En la industria ecuatoriana se puede adoptar sin ninguna dificultad este procedimiento para alcanzar el objetivo de esta investigación que fue la valoración de los lodos anódicos.

3.4.2 ESTUDIO DE LA CINÉTICA LLEVADO A CABO DURANTE LA CALCINACION DE LOS ANODICOS

Con las técnicas de difracción de rayos X (DRX), microscopía electrónica de barrido (MEB), energía dispersa de rayos X (EDX), análisis termo gravimétrico y el método BET permitieron determinar las temperaturas de transformación del lodo anódico y continuación se detalla la posible cinética que siguen los lodos anódicos.

Entre 19 °C y 184 °C lo que ocurre es una pérdida de agua libre del lodo anódico, que corresponde al 6,2 %, lo que evidencia una pequeña pérdida de peso. Esto se presume al hecho de que no toda el agua se evapora, es decir que mucho de esta agua aún está atrapado en el supuesto hidróxido de aluminio presente en los lodos anódicos que podría estar como gibbsita. Este fenómeno se muestra en la curva TGA que se obtuvo en el ensayo termo gravimétrico de los lodos anódicos (Ribeiro et al., 2001, p. 332)

En cambio entre los 184 °C y 400 °C existe una rápida pérdida de peso como lo demuestra la curva TGA que corresponde al 18,6 %, lo que se asocia con la pérdida de agua ligada que tiene el hidróxido de aluminio presente en los lodos. La pérdida de agua podría favorecer a la transición de gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) a bohemita

(AlO (OH)) y el aumento del área superficial como se muestra en la Figura 3.14. (Misra, 2003, p. 6; Rivas, Pena y Aza, 2006, p.3 730)

Otra de las transformaciones que se presume, ocurre al incrementar la temperatura de 400 °C a 650 °C. La pérdida de peso de 5,8 % sería a la transición de bohemita (AlO (OH)) a γ -alúmina. La formación de la fase γ -alúmina se debe a la deshidratación de la bohemita. La pérdida de peso del lodo anódico, al igual que el aumento de área superficial clarifica esta transición ocurrida (Misra, 2003, p. 6; Rivas et al., 2006, p.3 730).

La ecuación 3.1 muestra la formación que da origen al aumento de área superficial y a la creación de la γ -alúmina.



La presencia de la γ -alúmina se muestra en la Figura 3.7, ya que los picos del espectro de la γ -alúmina realizada por Vieira et al. (2005) coinciden con el espectro realizado en esta investigación a la temperatura de 800 °C. La γ -alúmina muestra una gran estabilidad termodinámica hasta aproximadamente los 900 °C. Por otro lado, adquiere el valor más alto de área superficial del lodo anódico, que es de 41,4 m²/g a los 600 °C. Esta particularidad ocurre al calcinar la gibbsita dentro de estas temperaturas (Misra, 2003, p. 6; Vieira, et. al. 2005, p. 65)

Ahora la pérdida de peso que ocurre entre las temperatura de 770 °C y 900 °C que se observa en la Figura 3.3, además que es muy poco que esta alrededor del 4,3 %, puede corresponder a la descomposición térmica de los sulfatos de aluminio y sodio, como lo muestran las siguientes reacciones de descomposición en las ecuaciones 3.2 y 3.3 (Vieira, et. al. 2005, p. 65).



Otra transformación interesante se dio a los 1 000 °C es la formación de la mullita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$). La aparición de este compuesto es debe gracias al proceso llamado mullitización, que ocurre por la presencia de la γ -alúmina y óxido de silicio, pero la mullita forma un sistema metaestable que no es estable a más altas temperaturas como lo muestra el diagrama de fases de estos dos compuestos (Vieira et al., 2005, p 62; Ribeiro et al., 2006, p.301)

Además, la transición de mullita a corindón se ve claramente en el diagrama de fases del sistema Al_2O_3 - SiO_2 , a temperaturas que se están comprendidas entre 1 000 y 1 100 °C y también en las ecuaciones 1.13 y 1.14 se muestra las reacciones de formación.

Finalmente, la deshidratación del hidróxido de aluminio presente en lodos anódicos formaría el óxido de aluminio cristalino (α -alúmina) más conocido como corindón, como lo muestra en la ecuación 3.4, además se ve favorecida por la formación de la cristobalita ya que esta es insoluble en el cristal de corindón La producción de estos cristales afirma la presencia de hidróxido de aluminio en los lodos anódicos ya que fue a partir de este compuesto que se formó el corindón. Esto es debido al hecho de que ocurrió la transición del hidróxido de aluminio a bohemita de este a γ -alúmina de este con óxido de silicio a mullita y por último la formación del óxido de aluminio cristalino (corindón), esto se debe a la inmiscibilidad de la fase cristobalita en la fase de óxido de aluminio, tal como se describe en los párrafos anteriores y además el diagrama de fases de estos dos compuestos (Farinha et al. 2008, p. 5; Shackelford y Doremus, 2008, p. 36)



La cinética llevada a cabo de los lodos anódicos desde la temperatura ambiente hasta los 1 200 °C esta relaciona con el cambio de dos propiedades físicas por una lado, con un aumento de la densidad 1,98 g/mL a 3,2 g/mL que se conoce como el proceso de densificación, mientras que, por el otro, una disminución del área superficial (41,4 m^2/g) hasta máximo y luego una disminución hasta menor a 0,3 m^2/g debido a al proceso de deshidratación del lodos anódicos.

3.4.3 DIAGRAMA DE FLUJO DE LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL ANODIZADO DE PIEZAS DE ALUMINIO

3.4.3.1 Consideraciones para el flujo de alimentación y la instalación de la planta de valoración de lodos anódicos

El diagrama de flujo se estableció a partir de índice de empacado versus los lodos generados en base seca en la planta de tratamiento de efluentes de una planta de producción aluminio que es de 12,31 toneladas de perfiles producidas por toneladas de lodo generado en base seca, la producción 10 000 toneladas de perfiles durante el 2012 y 45 % del lodo a tratar que da aproximadamente 5 000 kg por día. Solo se trata el 45 %, ya que el resto es vendido a las cementeras. A partir de la técnica seleccionada (pirometalúrgico) se propone el diagrama de flujo para el tratamiento de 1 000 kg/día (5 000 kg, con 80 % humedad) de lodos anódicos. En base a la capacidad mencionada se realizaron los balances de masa y energía y se seleccionaron los equipos necesarios, además se realizó la distribución en planta de los equipos y el análisis de económico. Los equipos principales como el secador y el horno de calcinación fueron diseñados en función de los ensayos realizados a escala de laboratorio y piloto (Granda y Plaza, 2012, p. 199).

Por otro lado, la ubicación de la planta debería ser en Latacunga ya que la Corporación Ecuatoriana de Aluminio (CEDAL) está instalada en esta ciudad tiene una participación en el mercado del 65 % de perfiles de aluminio y que el 2012 esta corporación produjo una cantidad de 10 000 toneladas de perfiles de aluminio.

En la Figura 3.15 se muestra el balance masa para 5 000 kg/día del lodo anódico con 80 % de humedad. Para la determinación del este balance se utilizó el análisis absorción atómica, la caracterización mineralogía a 1 200 °C y cinética de calcinación descrita en la sección 3.4.2. A partir de estos datos se obtuvo los componentes que está constituido el lodo anódico en base seca, donde se determinó dos componentes en mayor concentración, por un lado el hidróxido de

aluminio hidratado que esta con un 89,21 % y por el otro el sulfato de aluminio con 3,43 % y el resto se encuentra como aluminato de sodio, sulfato de calcio, oxido de silicio y oxido de magnesio. La determinación de estos componentes se detalla en el Anexo IV, Ficha Técnica 17. En el proceso de secado se disminuye la humedad del 80 % a 12 %, por lo que, los 5 000 kg que ingresan se reducen a 1 136,36 kg y el resto es 3 863,64 kg agua evaporada. Luego los 1 136,36 kg pasan al proceso de calcinación donde se recupera 737,21 kg de lodo calcinado con un 88 % de corindón. El rendimiento que se encontró del corindón fue 73,72 %, lo que hace factible este proceso. El resto que es 387,18 kg está constituido de 61,77 % de agua ligada y 34,16 % libre y 4,11 % de trióxido de azufre. Finalmente los lodos con enfriados a temperatura ambientes.

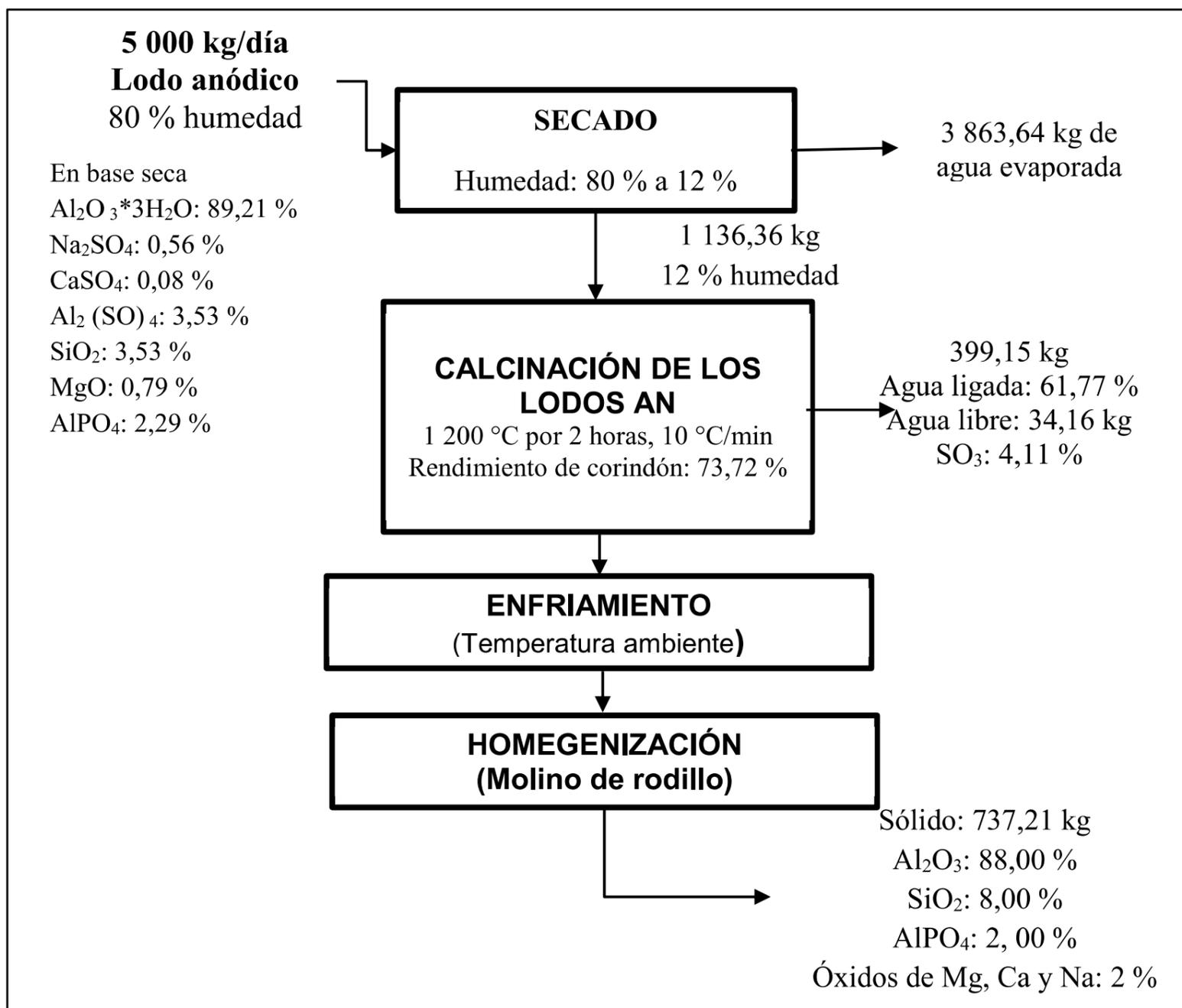


Figura 3.15. Balance de masa de la planta de valoración de los lodos anódicos para 5 000 kg/día

3.4.3.2 Descripción del proceso de producción de corindón (α -alúmina)

La planta de producción de corindón a partir de lodos anódicos tendrá una capacidad de procesamiento de 5 000 kg/día y trabajara las 24 horas. El proceso de producción de corindón comienza con un secado en un innovador equipo llamado secador invernadero. El secador invernadero consta de cuatro cuartos donde ingresan 35 000 kg por semana de lodos anódicos (80 % humedad) con ayuda de una retroexcavadora. El tiempo de secado será de 27 días y durante estos días el material será continuamente removido con la retroexcavadora para homogenizar el secado y alcanzar un 12 % de humedad.

De cada cuarto o invernadero se descarga 8 000 kg, es decir del total de los cuatro invernaderos se tendría alrededor de 32 000 kg cada 27 días (12 % de humedad). Luego que el lodo ha alcanzado el 12 % de humedad durante los 27 días es transportado a través de una banda transportadora a un silo de almacenamiento.

Los 32 000 kg de lodo anódico seco recolectado de los cuatro invernaderos durante los 27 días y almacenado en la tolva pasan al siguiente proceso que es la calcinación a 1 200 °C. En el proceso de calcinación se utiliza dos hornos eléctricos. El motivo de utilizar dos hornos es para acelerar el procesamiento de los 32 000 kg del lodo.

Los lodos calcinados se descargan a una bandeja de enfriamiento para luego pasar a la homogenización del corindón, que se realiza con un molino de rodillo. La razón de esta etapa se debe a que después de la calcinación se forman grumos. Por último el corindón es comercializado en sacos de 25 kg, ya que es la forma más común encontrar en el mercado.

En la Figura 3.16 se muestra el diagrama de flujo para el procesamiento de los lodos anódicos que se describió en los párrafos anteriores. Los tiempos de secado y de calcinación así como también la necesidad de cuatro invernaderos, dos hornos de calcinación se justifica en los diseños, que se muestra en la Sección 3.3.3.

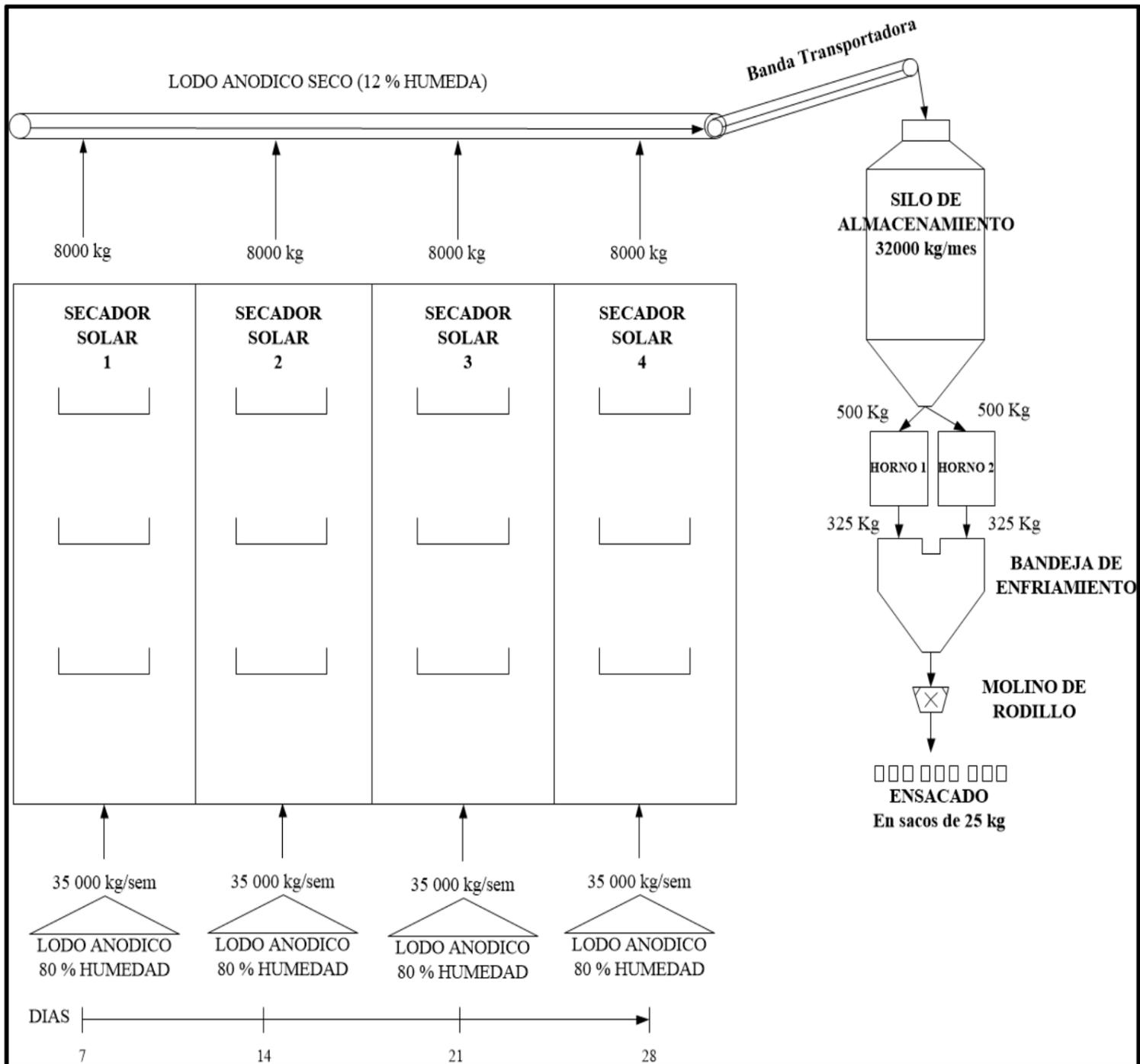


Figura 3.16. Diagrama de flujo y equipos requeridos en la planta

3.4.4 DIMENSIONAMIENTO DE LOS EQUIPOS REQUERIDOS EN LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS

3.4.4.1 Dimensionamiento del secador invernadero

Para el dimensionamiento del secador se busca un sistema que permita la reducción de humedad del 80 % al 12 %, pero que utilice energía renovable para evitar la generación de gases invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O ,) que son los causantes del calentamiento global en nuestro planeta. Por tal razón, se seleccionó el secador tipo invernadero que consiste en utilizar la energía que viene del sol (radiación

solar). Para lo cual se necesitó parámetros adicionales como son las condiciones meteorológicas de la Latacunga y la radiación solar.

La radiación solar se toma de la ciudad de Quito ya que en la Latacunga no se cuenta con el sistema de medición de este parámetro, esto se asumió ya que las dos ciudades se encuentran muy cercanas a 107 km de distancia y además son dos ciudades de la región Sierra que se encuentra en el Anexo IV, Ficha Técnica 18 se muestra. En la Tabla 3.12 se muestra los parámetros asumidos como también los parámetros determinados y utilizados para el diseño del secador invernadero.

Tabla 3.12. Parámetros empleados para el dimensionamiento del secador invernadero

PARAMETROS	VALOR	UNIDADES
Densidad del lodo aparente humedad del 80 %	413,8	kg/m ³
Densidad del lodo aparente humedad del 12 %	0,7	kg/m ³
Producción diaria	5 000	kg/día
Días de recolección	7	días
Volumen de agua evaporada	0,77	m ³ /t
Energía solar en el mes mínima radiación (Febrero 2013)	435 235,73	kJ/m ²
Calor latente de evaporación del agua	2 257	kJ/kg
Eficiencia esperada	40	%
Energía requerida para evaporar agua del lodo	126 000	kJ/t
Dirección del viento	Sur	-
Velocidad del viento	9	nudos

Los principales factores de diseño del secador invernadero son la radiación solar, temperatura y humedad como también las fluctuaciones de estos factores. La radiación solar para la ciudad de la Latacunga se tomó la más baja que fue de 435 235,73 kJ/m², y una temperatura promedio de 13,3 °C, que fueron datos meteorológicos del mes de febrero del 2013, debido a que este mes presentan mayor nubosidad, precipitaciones y menor radiación solar.

La humedad relativa en la ciudad Latacunga está entre 71 % y 83 %. Los datos meteorológicos se muestran en el Anexo IV, Tablas AIV.2 mientras que los datos

de radiación solar de Escuela Politécnica Nacional (Quito) se encuentran en la Tablas AIV.3.

Para el cálculo del dimensionamiento se utiliza la cantidad de lodo recolectado a partir de la Ecuación 2.4 y el volumen que ocupa se determinó con la ecuación 2.5. Con estos datos y tomando en cuenta la altura de la cama se realiza una iteración para calcular el ancho y largo del invernadero, en el Anexo III, Ficha Técnica 19 se muestran estos cálculos. Por otro lado, la altura del invernadero se realiza en función de la altura de la retroexcavadora. La entrada de aire al invernadero estará ubicada en dirección sur ya que el viento se encuentra en ese sentido durante todo el año.

En la Tabla 3.13, se muestran las dimensiones del secador invernadero así como también la ubicación de la entrada de aire y el área. Todos los cálculos se realiza para un invernadero, ya que los tres más son de las mismas características

Tabla 3.13. Condiciones de operación y dimensiones del secador invernadero

Parámetro	Valor	Unidad
Altura de cama del lodo anódico	0,19	m
Ancho del invernadero	11	m
Largo del invernadero	40	m
Altura del invernadero	6	m
Humedad requerida	12	%
Área del invernadero	440	m ²
Ubicación de entra de aire al invernadero	Sur	-----
Cantidad de agua evaporada (m_w)	26 950	kg

Con el objetivo de determinar si el área del invernadero y la energía solar proporcionan la cantidad de energía necesaria para secar los lodos, se calcula el calor de evaporación de los 26 950 kg de agua y se compara con la energía solar disponibles. Los parámetros se muestran tanto en la Tabla 3.11 y Tabla 3.12 son los que se utiliza para conseguir este objetivo, además se tomó en cuenta la eficiencia de 40 % debido al envejecimiento del material (policarbonato), efectividad

de los materiales y pérdidas convectivas. Tabla 3.14 muestra la energía calculada a partir del calor latente, que fue de 60 826150 kJ, mientras que la energía de la radiación solar fue de 76 601488 kJ. Entonces, el área del invernadero y la energía solar proporcionan suficiente calor para disminuir la humedad del 80 % a 12 % de humedad.

Tabla 3.14. Requisitos energéticos para secar los lodos anódicos del 80 % a un 12 % humedad

Parámetro	valor	Unidad
Energía necesaria (calculada con el calor latente de evaporación)	60 826 150	kJ
Energía solar	76 601 488	kJ

Además, las condiciones de operación en el secador invernadero se verán favorecidas al cubrirlo con un material transparente (policarbonato) para que permita ingresar la radiación proveniente del sol. Por otro lado, se contará con un sistema ventilación que consta de 10 ventiladores de circulación forzada colocados en el techo, tres extractores de vapor al lado norte del invernadero y una retroexcavadora que ayudara a mover los lodos para homogenizar el secado. Con este sistema se asegura el secado de los lodos anódicos. (Parkson Thermo System, 2012, p. 4)

Por otro lado, el tiempo de residencia de los lodos anódicos en el secador invernadero se calculó con la ecuación 2.7 donde se determinó a condiciones ambientales de la Latacunga los milímetros de evaporación de agua por día. Con este valor como también con las dimensiones del invernadero se obtuvo el volumen agua evaporada, que fue de 22,45 m³, mientras que la cantidad de agua a evaporar de los lodos anódicos es de 26,95 m³. En otras palabras, si a condiciones ambientales se logra evaporar tal cantidad, las condiciones del secador invernadero se logra sin ningún problema pasar de 80 % de humedad a 12 % de humedad durante 27 días de residencia. La Tabla 3.15 resume los valores de la cantidad de agua evaporada por el secador, además los cálculos se muestran en el Anexo IV, Ficha Técnica 19.

Tabla 3.15. Cantidad de agua a evaporar de los lodos anódicos y cantidad de agua que se evapora a condiciones ambientales

Parámetro	Valor	Unidad
Agua evaporada a condiciones ambientales en 27 días	22,45	m ³
Agua contenida en los lodos anódicos para evaporar en los 35 000 kg	26,95	m ³
Tiempo de residencia del lodo anódico	27	días

3.4.4.2 Dimensionamiento de la banda transportadora

La banda transportadora se buscó por catálogos, que permita transporta el lodo anódico seco en menos de una hora los 32 000 kg/mes. El transporte se realizará desde los invernaderos hasta la tolva de almacenamiento. En la Tabla 3.16 se muestran las condiciones de funcionamiento y las dimensiones del equipo.

Tabla 3.16. Condiciones de operación y características de la banda transportadora

Parámetros	Valor	Unidad
Capacidad	1	t/h
Densidad suelta de material	0,7	t/m ³
Ancho de la banda	60	cm
Velocidad de transporte	0,5 a 0,7	m/s
Longitud de la banda	57,6	m

3.4.4.3 Dimensionamiento de la tolva de almacenamiento

El tamaño de tolva se diseñó de acuerdo a la capacidad del lodo seco que es de 32 000 kg/mes. Además, la densidad aparente (700 kg/m³) al igual que el factor de seguridad de 1.5 determinó las dimensiones y volumen de la tolva se muestra en la Tabla 3.17. En el Anexo III, Ficha Técnica 20, se muestra los cálculos realizado para este equipo.

Tabla 3.17. Parámetros y dimensiones de la tolva de almacenamiento

Parámetros empleados para el dimensionamiento		
Parámetro	Valor	unidad
Cantidad lodo seco	32 0000	kg/mes
Factor de seguridad	1,5	-----
Densidad aparente	700	kg/m ³
Dimensiones de la tolva de almacenamiento		
Volumen de la tolva	68,57	m ³
Diámetro	3,25	m
Altura total	6,5	m

3.4.4.4 Dimensionamiento de horno de calcinación para obtener corindón

El horno de calcinación de lodos anódicos se selecciona en función de energías limpias y amigables con el ambiente, por tal razón, el horno eléctrico trabajara con energía de las hidroeléctricas que el gobierno del Ecuador promueve, así reduciendo las emisiones de CO₂, causante del calentamiento global del planeta tierra.

Para el dimensionamiento de la cámara de calcinación se toma en cuenta la densidad aparente, la cantidad de material a procesar de los lodos anódicos como se muestra en la Tabla 3.18, así se obtiene el tamaño de cámara que se muestra en la Tabla 3.20. Además, en el Anexo IV, Ficha Técnica 21 se muestra los cálculos de estos parámetros.

Tabla 3.18. Parámetros para los cálculos de las dimensiones de la cámara del horno y resultado

Parámetros	Valor	Unidad
Densidad del lodo aparente humedad del 12 %	700	kg/m ³
Carga por Bach	500	kg
Volumen de la cámara		
0,71 m ³		

El volumen de la cámara fue 0,71 m³ y a partir de este valor se buscó un horno eléctrico en catálogos. Por consiguiente, las características del horno seleccionado se muestran en la Tabla 3.19. Por otro lado, en la Tabla 3.20 se muestran los parámetros para determinar el tiempo que se necesita en la calcinación de los lodos anódicos (tiempo del batch).

Tabla 3.19. Características y dimensiones del horno de calcinación seleccionado por catálogos

Parámetros	Valor	unidad
Modelo	Tz-cbf-120	-----
Potencia del horno	120	KW
Volumen de la cámara del horno	1,13	m ³
Tamaño de la cámara	900*700*1800 (ancho*altura*profundidad)	mm*mm*mm
Temperatura de trabajo	0-1 200	°C
Velocidad de calentamiento	0-10	°C/min
Voltaje-trifasico	AC380	V
Frecuencia	50	Hz

Tabla 3.20. Parámetros para el cálculo del tiempo de calcinación del lodo anódicos

Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura de ingreso del lodo al 12 % humedad	13,3	°C
Tiempo de calcinación a 1 200 °C	120,00	min
Tiempo entre descarga y carga	55,00	min
Calor específico promedio de los compuestos formados en el proceso	0,72	kJ / kg °C
Energía de calentamiento del lodo	4,55E+05	kJ

En la Tabla 3.21 se encuentra los resultados del tiempo de calentamiento de lodo anódico hasta los 1 200 °C y también el tiempo total que se requiere para la calcinación que fueron 68,40 min y 243,40 min respectivamente. En el Anexo IV se resumen los cálculos para determinar estos parámetros de funcionamiento de los hornos de calcinación.

Tabla 3.21. Tiempo de calentamiento y de calcinación de los lodos anódicos

Parámetros	Valor	Unidad
Tiempo de calentamiento	68,40	min
Tiempo total de calcinación	243,40	min

Para el procesamiento de los 32 000 kg/mes de lodo anódico seco, se propone dos hornos eléctricos para tratar esta demanda. Además, con el tiempo total de calcinación se concibe el sistema para la calcinación, a partir de dos hornos eléctricos que necesitan 6 días en un régimen de 24 horas, como se muestra en el Anexo V para una producción de 20 357,12 kg/mes de lodo calcinado, valor que se obtuvo con el balance de masa. Por último, la energía total requerida para la calcinación de los lodos anódicos para un mes es de 11 619,31 kWh, en la Tabla AIV.8 se muestra este valor.

3.4.4.5 Dimensionamiento de la bandeja de enfriamiento

La bandeja de enfriamiento fue diseñada para que todo el material calcinado se recoja en la misma sin que se produzca ningún derrame. La masa que se descarga de los hornos de calcinación al igual que la densidad del corindón se utilizaron para este dimensionamiento en la Tabla 3.22 se muestra el resto de parámetros los parámetros.

Tabla 3.22. Parámetros para el dimensionamiento de la bandeja de enfriamiento

Parámetros	Valor	Unidad
Cantidad de corindón después de la calcinación	636,16	kg
Densidad del corindón	3,2	kg/m ³
Calor específico del corindón	131,08	J/(mol °C)
Volumen ocupado por el corindón	0,2	m ³
Coefficiente de convección natural del aire	25,00	W/(m ² °C)
Temperatura media de Latacunga	13,3	°C

Las dimensiones de la bandeja de enfriamiento y el tiempo necesario para que se enfríen el material a temperatura de 13,3 °C se muestran en la Tabla 3.23.

Tabla 3.23. Dimensiones de la bandeja de enfriamiento y condiciones de funcionamiento

Parámetros	Valor	Unidad
Volumen	0,69	m ³
Área	4,6	m ²
Tiempo de enfriamiento (1 200 °C a 13,3 °C)	1	h

3.4.4.1 Dimensionamiento del molino de rodillo

El molino de rodillo permitirá homogenizar el material calcinado, debido a la formación de grumos después de proceso de calcinación. El tamaño de partícula requerido al igual que la cantidad de material a procesar se utilizan para el dimensionamiento, en la Tabla 3.24 se muestra las dimensiones y condiciones de funcionamiento del molino de rodillo.

Tabla 3.24. Dimensiones del molino de rodillo

Parámetro	Valor	Unidad
Capacidad del rodillo	10	kg/min
Velocidad del rodillo	100	r/min ⁻¹
Diámetro de rodillo	250	mm
Potencia del Motor WW2 IEEE-841	1	ph

3.4.4.2 Ensacado

El corindón que sale del molino de rodillo será distribuido a la venta en sacos de 25 kg, debido a que esta es la presentación más común en el mercado. En la Tabla 3.25, se muestra la cantidad de sacos que se producirán al mes, de acuerdo a la

cantidad de corindón que genera la planta. Este proceso se realiza en forma manual.

Tabla 3.25. Condiciones de operación de los horno eléctricos y producción de sacos de 25 kg de corindón

Parámetro	Valor	UNIDAD
Corindón producido	20 357,12	kg/mes
Numero de sacos de corindón	814,28	sacos/mes

3.4.4.3 Diagramas de los equipo dimensionados para la producción de corindón

Los diagramas de los equipos se muestran a continuación al igual que la distribución en planta de cada uno de estos. Además, las Figura 3.17, Figura 3.18, Figura 3.19, Figura 3.20, Figura 3.21 y Figura 3.22 muestran las dimensiones de los equipos principales diseñado en la Sección 3.4.4 utilizados en el procesamiento del lodo anódico En Tabla 3.26 se resumen los resultados del dimensionamiento de equipos y las condiciones de operación de la planta de valoración de los lodos anódicos. La retroexcavadora seleccionada fue de marca Caterpillar y se sus especificaciones se muestran en el Anexo VI, Ficha Técnica 23.

Tabla 3.26. Resultados del dimensionamiento de los equipos requeridos en la planta

NOMBRE DEL EQUIPO	CAPACIDAD REQUERIDA	CONDICIONES DE OPERACIÓN
Secador invernadero	35 000 kg/semana	80 % a 12 % de humedad
Banda Transportadora	1 000 kg/h	Velocidad = 0.6 m/s
Silo de almacenamiento	68 m ³	-----
Horno de calcinación	500 kg/h	Temperatura = 1 200 °C Tiempo de residencia = 4 h
Bandeja de enfriamiento	0,69 m ³	Temperatura ambiente
Molino de rodillo	10 kg/min	Tamaño de partícula < 70 µm
Retroexcavadora	3 501 kg	Altura 3 866 mm

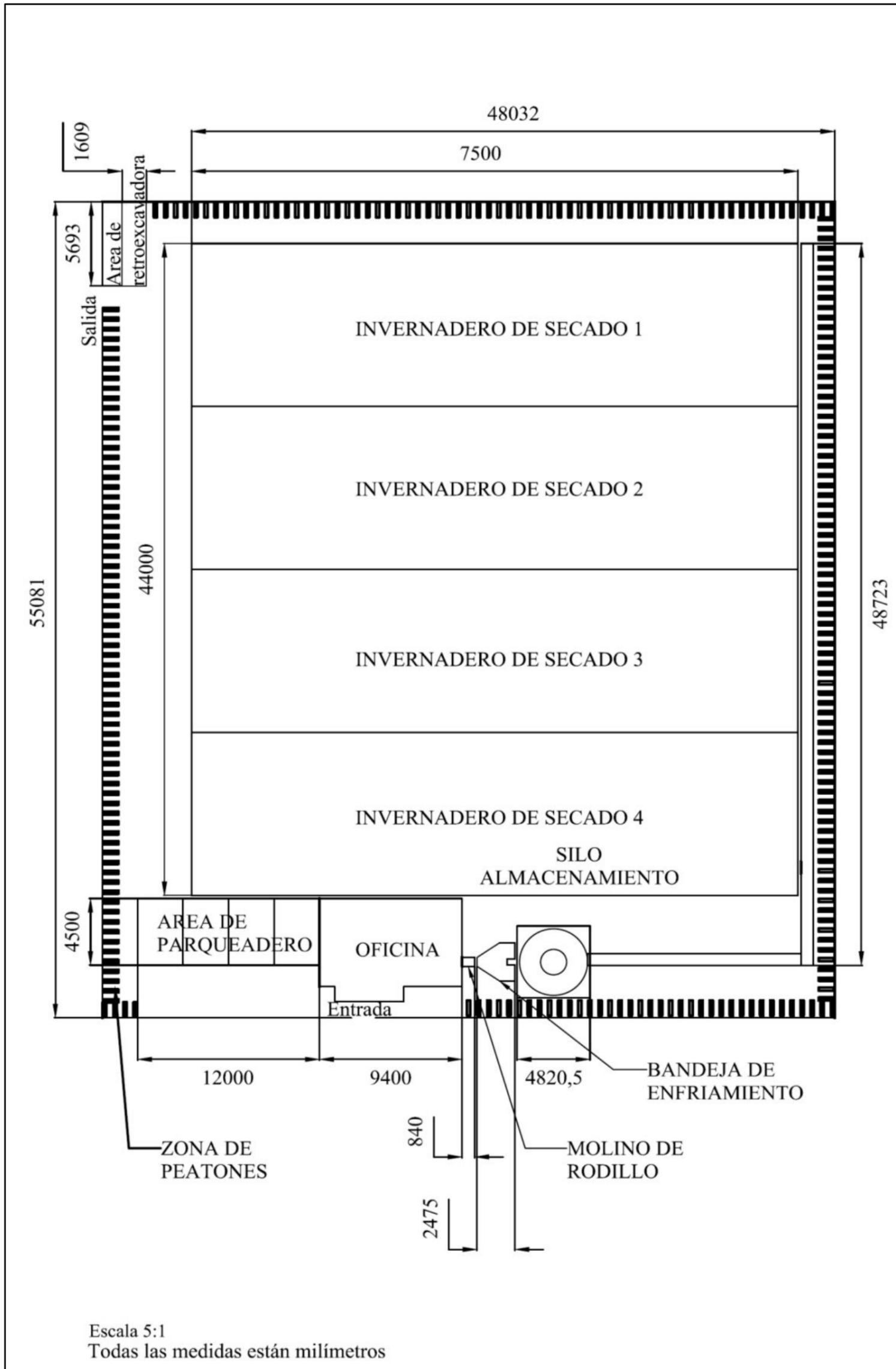
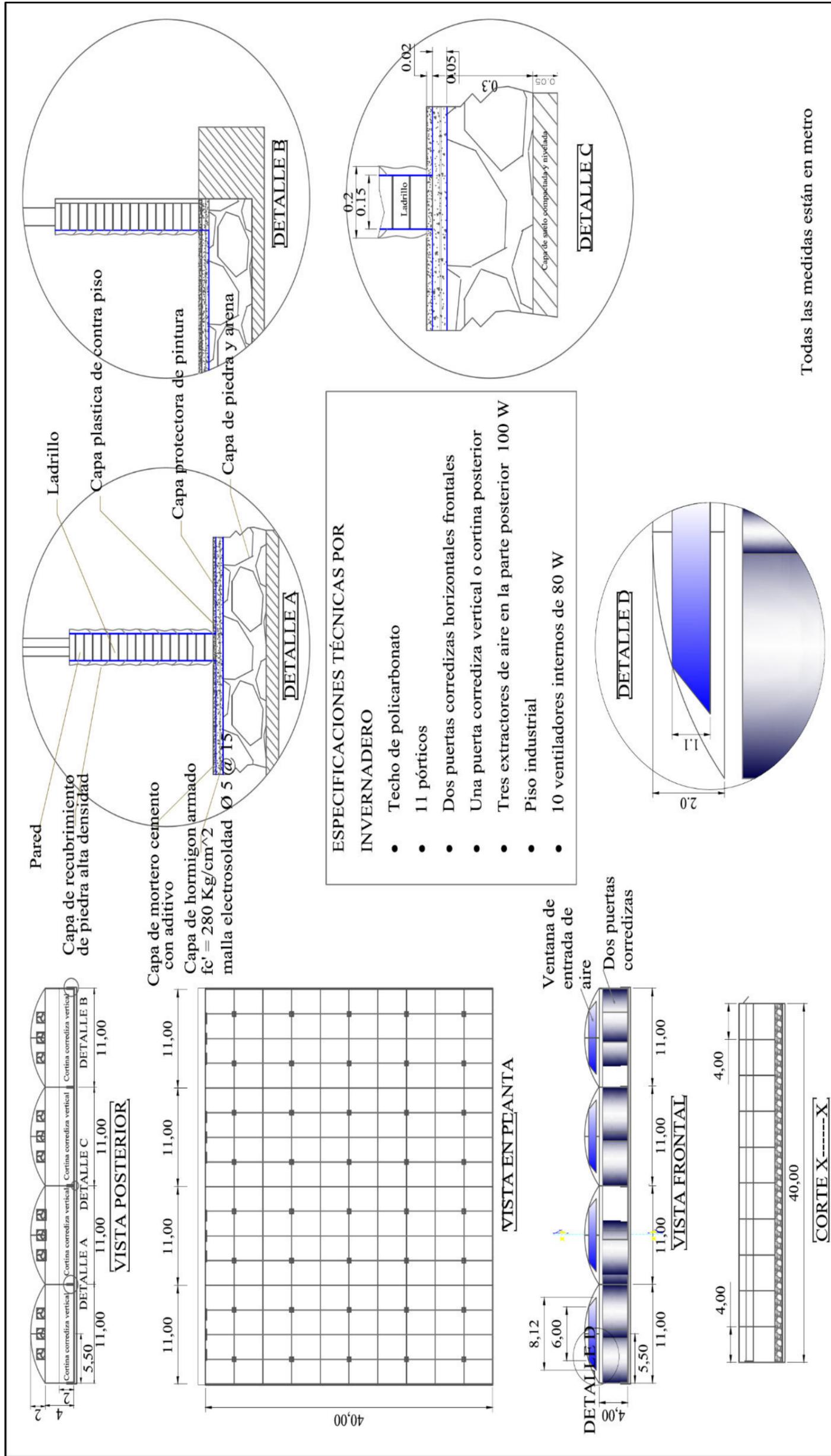


Figura 3.17. Distribución de equipos en la planta de tratamiento de los anódicos



Todas las medidas están en metro

Figura 3.18. Dimensiones del secador invernadero

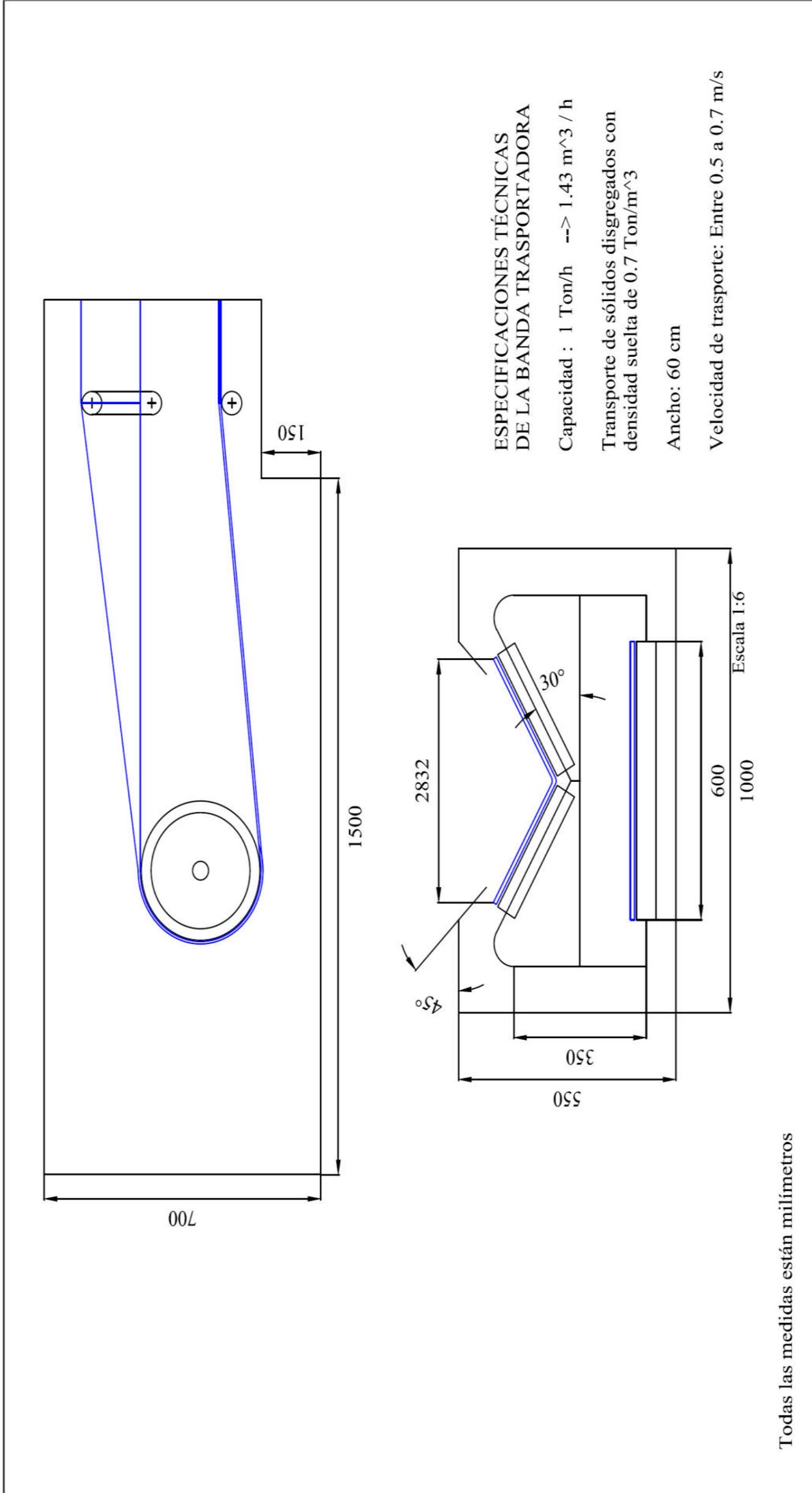


Figura 3.19. Dimensiones de la banda transportadora de lodos secos

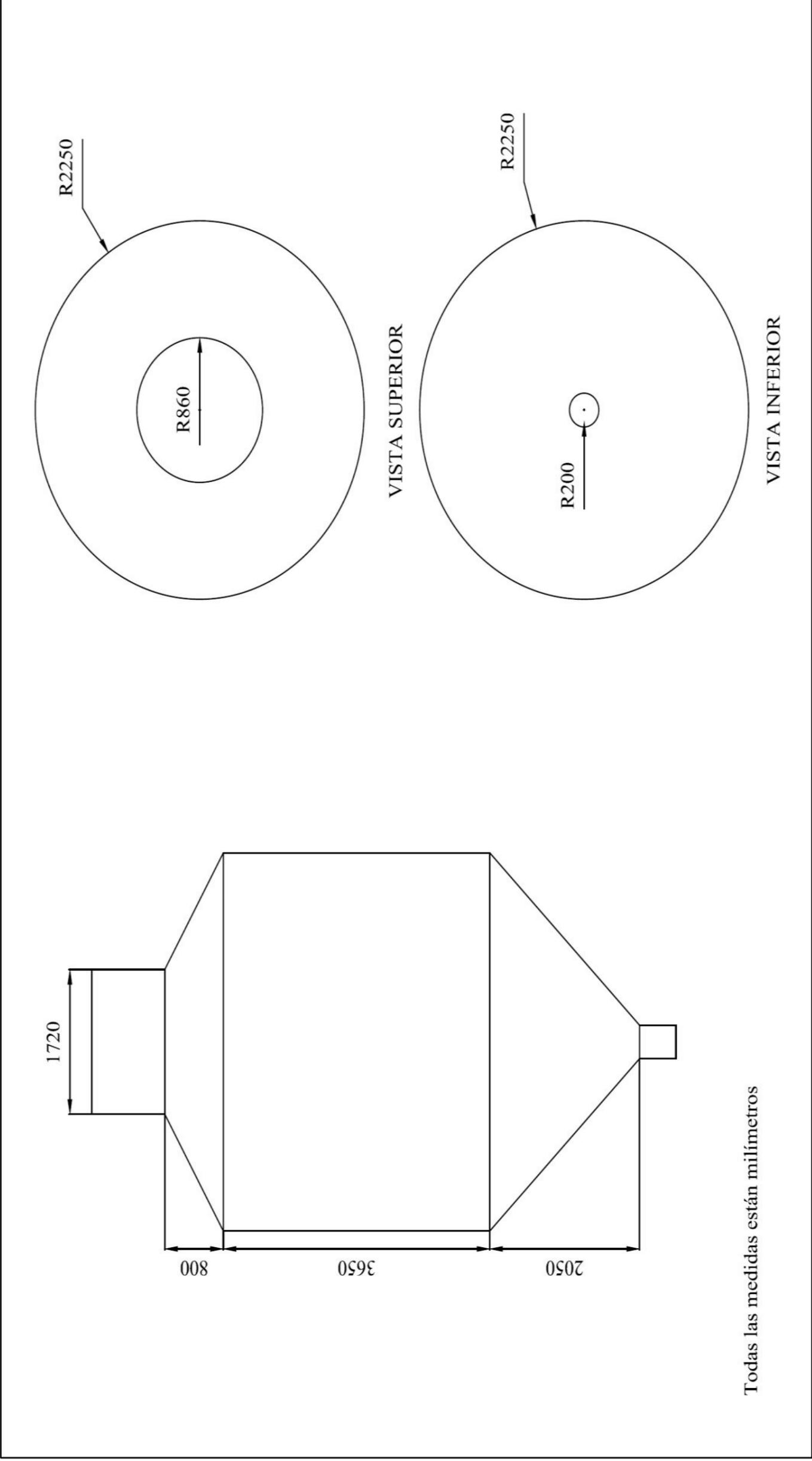


Figura 3.20. Dimensiones del silo de almacenamiento de los lodos seco

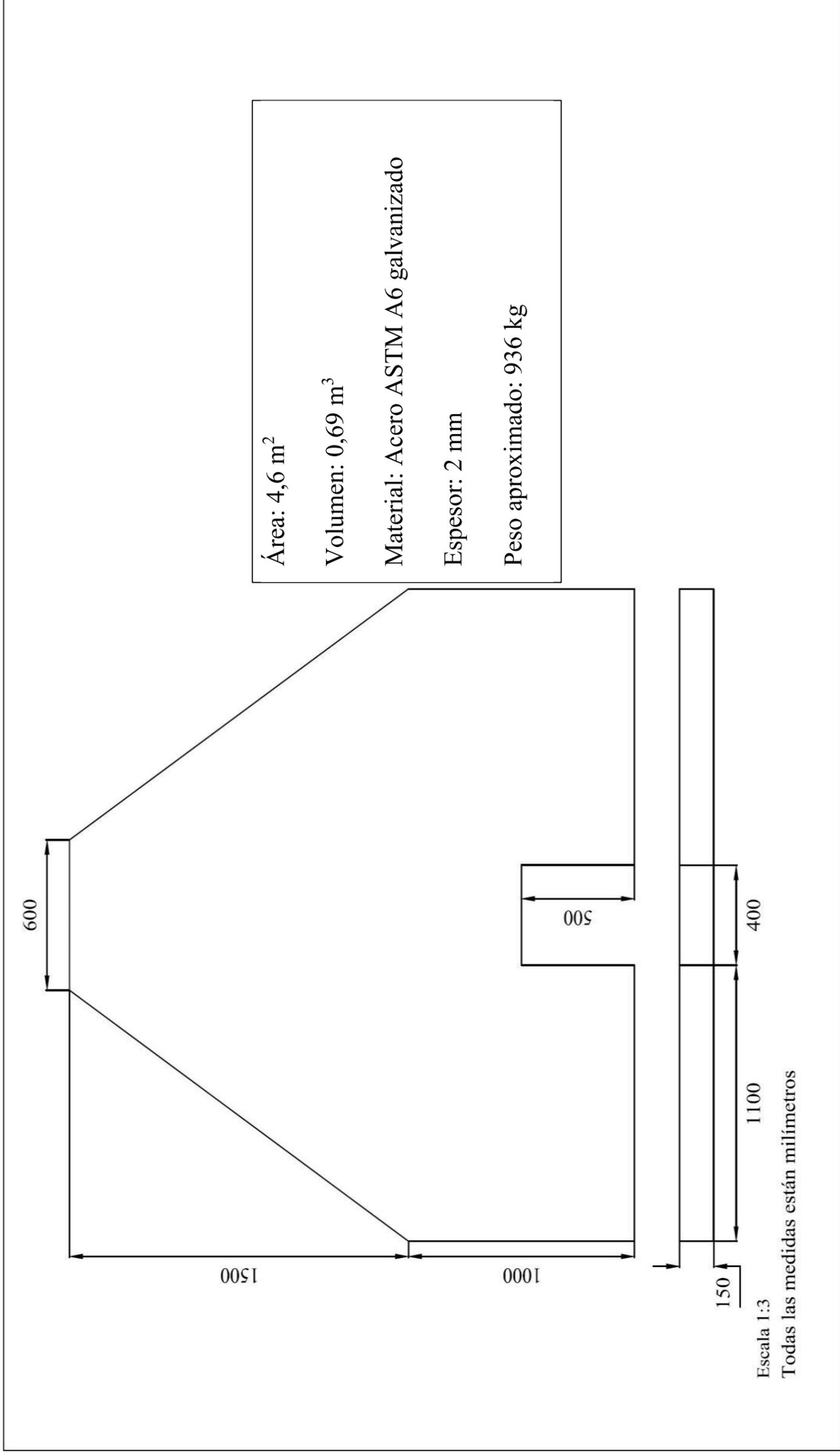


Figura 3.21. Dimensiones de la bandeja de enfriamiento de los lodos calcinados

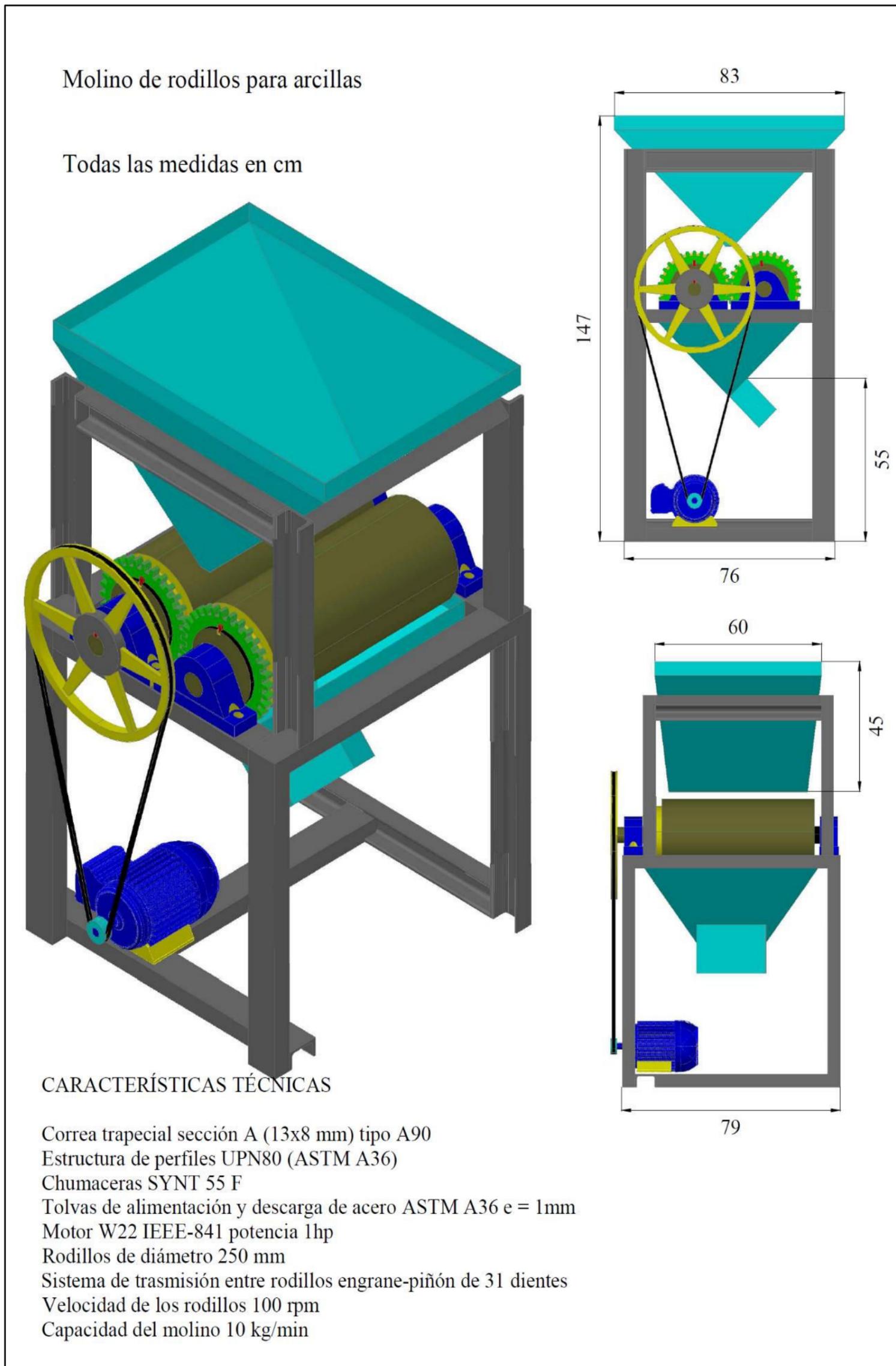


Figura 3.22. Dimensiones del molino de rodillo para los lodos calcinados

3.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DE LA PLANTA DE VALORACION DE LOS LODOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL ANODIZADO DE PIEZAS DE ALUMINIO

En esta sección se presenta un los resultados obtenidos del análisis económico del proceso de producción de corindón, el mismo que se desarrolla construyendo un flujo de caja para un periodo de 10 año. Además, se ha tomado en cuenta varios aspectos respecto a los ingresos y egresos de la operación de la planta

Para los ingresos:

- El único ingreso que tendrá la planta es la venta de corindón que se produce 20 357,12 kg/mes.
- Se consideró un precio de venta del corindón de \$ 1,00 el kg de acuerdo a precios comerciales del producto, como se muestra en la Ficha Técnica 22.

Para los egresos:

- Para el cálculo de los costos de ventas se han tomado en cuenta los costos de electricidad, materias primas, sueldos, insumos, embalaje

Por último, en el Anexo VI, Tabla AVI.1 se muestran los parámetros utilizados para el análisis económico como: Aporte patronal al IESS, amortizaciones de equipo, maquinaria y muebles, interés bancario, costos de construcción de oficinas e iinterés bancario por anualidad.

3.5.1 ÁREA DEL TERRENO Y GASTOS DE CONSTRUCCIÓN DE LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LOS LODOS ANÓDICOS

A partir del plano de la planta que se muestra la Figura 3.17, es posible determinar el área necesaria para la implantación de los equipos que conformarán el proceso productivo. Para lo cual se ha averiguado los costos del metro cuadrado en

Latacunga, así como también los costos de las construcciones civiles y a partir de estos datos se elabora la Tabla 3.27, donde se presenta el costo del terreno y los gastos de construcción.

Tabla 3.27. Área del terreno y gastos de construcción necesarios para la planta de valoración de lodos anódicos

Designación	Área (m²)	Valor (\$)/m²	Valor total (\$)	Dividendo de amortización (\$)
Terreno	2 700,00	6,00	16 200,00	-----
Construcciones				
Galpón fabril	18,00	80,00	1 440,00	144,00
Oficinas	61,00	240,00	14 640,00	1 464,00
Total construcciones			16 080,00	1 608,00
TOTAL TERRENO Y CONSTRUCCIONES			32 280,00	

En la Tabla 3.27 se señala que los costos del terreno (6 \$/m²), galpón fabril (80 \$/m²) y oficina (240 \$/m²), los precios corresponden a valores referencias que se proformo en la ciudad de Latacunga.

3.5.2 COSTOS DE SUMINISTROS PARA LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

A partir del balance energético en todos los equipos se determinó el consumo de la energía eléctrica de la planta. En la Tabla 3.28 se especifica el costo mensual y costo anual.

Tabla 3.28. Requerimientos de suministros para la planta de valoración de lodos anódicos

Suministro	Costo unitario (\$)	Cantidad mensual	Costo anual (\$)
Agua (m ³)	0,64	30	230,40
Energía eléctrica (kw-h)	0,08	14 165	12 748,34
TOTAL			12 978,74

El consumo de agua para la planta es de solo 30 m³/mes, debido a que en el procesamiento de los lodos anódicos no se utiliza agua. El agua solo se utiliza para el consumo del personal. Por otro lado la cantidad de energía eléctrica en la planta se muestra en el Anexo VI, Tabla VI.2 donde se resume el consumo de los equipos, focos y oficinas.

3.5.3 COSTOS DE LOS EQUIPOS REQUERIDOS PARA LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

A partir del dimensionamiento de los equipos requeridos en la planta de valoración de los lodos anódicos se consultaron cotizaciones, con las cuales se determinaron los costos unitarios y el costo total de cada uno de estos. En la Tabla 3.29 se puntualiza estos valores.

Los costos de cada uno de los equipos se detallan en el Anexo VIII, donde se indica las proformas de los proveedores con el precio de cada uno de los equipos requeridos para la producción de corindón. El costo total de los equipo para la planta fue de 201 626,00 USD. Además, el equipo más costo fue el secador invernadero con un valor de 91 520,00 USD. Además en el Anexo VII, Fichas Técnicas del 24 a 29 se indica las proformas de cada uno de los equipos.

Tabla 3.29. Requerimiento de equipos para la planta de valoración de lodos anódicos

Designación del Equipo	Número de unidades	Valor unitario (\$)	Valor total (\$)	Dividendo de Amortización (\$)
Invernadero	1	91 520,00	91 520,00	9 152,00
Banda transportadora	1	25 000,00	25 000,00	2 500,00
Silo	1	7 000,00	7 000,00	700,00
Hornos	2	18 908,00	37 816,00	3 781,60
Bandeja de enfriamiento	1	1 840,00	1 840,00	184,00
Molino	1	3 450,00	3 450,00	345,00
Retroexcavadora	1	35 000,00	35 000,00	3 500,00
TOTAL			201 626,00	16 662,60

3.5.4 MANO DE OBRA DIRECTA Y PERSONAL ADMINISTRATIVO REQUERIDO PARA LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

En la Tabla 3.30 se especifica el personal requerido para el proceso de producción así como también los sueldos con todos los beneficios sociales, como lo indica el Código del Trabajador, mientras que en Tabla 3.31 se indica la nómina del personal administrativo. El salario tanto para la nómina de fuerza laboral como la fuerza administrativa se obtuvieron del Banco Central del Ecuador 2014 y se detallan en el Anexo VI, Tabla AVI.3 donde se indica todos los estos beneficios y con sus respectivos cálculos.

Tabla 3.30. Nómina de fuerza laboral requerida para la planta de valoración de lodos anódicos

Unidad operativa	Número operario	Salario mensual (\$)	Aporte al IESS (\$)	Total mensual (\$)	Total anual (\$)
Operador de retroexcavadora	1	340,00	41,31	480,48	5.765,72
Calcinación	3	340,00	123,93	1 781,43	21 377,16
Operador de planta	1	450,00	54,68	626,76	7 521,10
TOTAL				2 888,67	34 663,98

Tabla 3.31. Nómina de fuerza administrativa para la planta de valoración de lodos anódicos

Puesto de trabajo	Número empleados	Sueldo mensual (\$)	Total de beneficios sociales (\$)	Total mensual (\$)	Total anual (\$)
Contadora	1	340,00	99,17	480,48	5 765,72
Administrador	1	1 000,00	236,67	1 358,17	16 298,00
Secretaria	1	340,00	99,17	480,48	5 765,72
Guardia	1	340,00	99,17	480,48	5 765,72
TOTAL				2 799,60	33 595,16

3.5.5 COSTOS DE PRODUCCIÓN Y CAPITAL DE OPERACIÓN MENSUAL DE LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

Una vez determinados los costos de terreno y construcción, materia prima, suministros, equipos requeridos y mano de obra, se encontraron anuales de producción, que se muestran en la Tabla 3.32.

Tabla 3.32. Costos anuales de producción y capital de operación mensual de la planta de valoración de lodos anódicos

Designación del rubro	Valor (\$)	Capital de operación mensual (\$)
Mano de obra directa	34 663,98	2 888,67
<u>Carga fabril</u>		
Mano de obra indirecta	33 595,16	2 799,60
Materiales indirectos	0,00	0,00
<u>Depreciaciones</u>		
Construcciones	1 608,00	134,00
Maquinaria y equipo	16 662,60	1 388,55
Muebles y equipos de oficina	1 062,00	88,50
Otros activos	6 200,00	516,67
<u>Mantenimiento</u>		
Maquinaria y equipo	4 032,52	336,04
Repuestos para maquinaria y Equipo	0,00	0,00
Edificios	0,00	0,00
Reparación de maquinaria	0,00	0,00
<u>Suministros</u>	12 978,74	1 081,56
<u>Seguros</u>		
Transporte de materiales directos	0,00	0,00
Transporte de materiales indirectos	0,00	0,00
Edificios	0,00	0,00
Maquinaria y equipo	0,00	0,00
SUB-TOTAL COSTOS DE PRODUCCIÓN	110 803,00	9 233,58
Imprevistos	22,16	1,85
TOTAL COSTOS ANUALES DE PRODUCCIÓN	110 825,16	9 235,43

Los costos anuales de producción de corindón son 110 825,16 USD y permitirá ya armar la inversión total del proyecto. En la sección 3.5.6 se encontrará la cantidad de dinero para poner en marcha la planta de valoración de lodos anódicos.

3.5.6 INVERSIÓN TOTAL DEL PROYECTO DE VALORACIÓN DE LOS LODOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DEL ANODIZADO DE PIEZAS DE ALUMINIO

A continuación se detalla la cantidad requerida para instaurar la planta de procesamiento de lodos anódicos, en la Tabla 3.33 se resumen estas cantidades

Tabla 3.33. Inversión total del proyecto de valoración de lodos anódicos

Denominación	Valor (\$)	Contribución porcentual (%)
<u>Inversión fija</u>		
Terreno y construcciones	32 280,00	11,55
Maquinaria y equipo	201 626,00	72,15
Equipo y muebles de oficina	5 310,00	1,90
Otros activos	31 000,00	11,09
<u>Capital de operación</u>	9 235,43	3,30
TOTAL INVERSIONES	279 451,43	100,00

En la Tabla 3.33 se muestra los costos de terreno, construcción, maquinaria, equipos y muebles de oficina y otros activos, entonces la suma de estos dio el costo total para la instauración de la planta de valoración de los lodos anódicos es de 279 451,43 USD.

Por otro lado, también se indica la contribución porcentual de cada uno de las denominaciones, donde se puede apreciar que el 72,15, % de la inversión corresponde a los equipos requeridos y el 22 % se reparte entre el terreno (11,55 %), y otros activos (11,09 %).

3.5.7 ESTADO DE PÉRDIDAS Y GANANCIAS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DEL PROYECTO DE LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

El precio de venta de los lodos calcinados (alúmina) es de 1,00 \$/kg. A partir de los ingresos por ventas anuales y costos anuales de producción, se determinaron las utilidades netas por operaciones, lo que incluye el impuesto a la renta.

Se observa en la Tabla 3.34 que para un año de producción se obtiene una utilidad anual de USD 108 244,38. Además, se aprecia que las ventas anuales por concepto de la alúmina son de USD 249 600,00

Tabla 3.34. Estado de pérdidas y ganancias del proyecto de valoración de lodos anódicos por proceso pirometalúrgico

Designación	Valor (\$)
Ventas	249 600,00
(-) Costos de producción	110 825,16
Utilidad bruta por ventas	138 774,84
(-) Gastos por ventas	0,00
Utilidad neta por ventas	138 774,84
(-) Gastos de administración	0,00
Utilidad bruta en operaciones	138 774,84
(-) Impuesto a la renta	30 530,47
Utilidad Neta en Operaciones	108 244,38

3.5.8 ÍNDICES FINANCIEROS DE LA EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR DE LA PLANTA DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

A partir del flujo de caja que se encuentra en el Anexo VI, Tabla AVI.1, se determinaron la tasa interna de retorno (TIR), el valor actual neto (VAN) y la relación beneficio/costo (B/C) para determinar si el proyecto de valoración de los lodos anódicos es viable económicamente.

Con estos índices financieros es posible analizar la factibilidad económica del negocio. A continuación, en la Tabla 3.35 se especifican los valores obtenidos.

Tabla 3.35. Índices financieros de evaluación económica preliminar de la planta de valoración de lodos anódicos

ÍNDICE FINANCIERO	SÍMBOLO	VALOR
Tasa interna de retorno	TIR	24,38 %
Valor actual neto (USD)	VAN	57 461,00
Relación beneficio – costo	B/C	1,56

La Tabla 3.35 se muestra que la tasa interna de retorno (TIR) con un porcentaje de 24,38 % lo cual comparada con la tasa pasiva que rige en el Ecuador desde el 2012 se ha mantenido bajo a 5,19 %, indica que la inversión en el proyecto genera mayor rentabilidad que invertir en el Sistema Financiero Nacional. Se alcanza un valor actual neto (VAN) superior a 157 000,00 USD y una relación costo beneficio de 1,56, por lo tanto por cada dólar de inversión se generara 0,56 USD de beneficio.

3.5.9 PUNTO DE EQUILIBRIO DEL PROYECTO DE VALORACIÓN DE LODOS ANÓDICOS

En la Figura 3.23 muestra que el punto de equilibrio considerando un precio de venta de 1,00 USD se encuentra en 78 060 kg de alúmina, esta producción es posible alcanzarla en alrededor de tres meses y medio de operación de la planta.

Considerando que en el año se produce 249 toneladas de alúmina se obtienen ingresos superiores a los costos totales con lo cual se logra obtener utilidades, tal es así que en el Anexo IV se muestra una recuperación de la inversión inicial en un tiempo de alrededor de tres años y medio.

Con los datos obtenidos en este análisis financiero se evidencia que el proyecto presenta una atractiva rentabilidad y está en capacidad de generar un flujo de caja positivo durante un periodo de 6 años posterior al año de recuperación inversión.

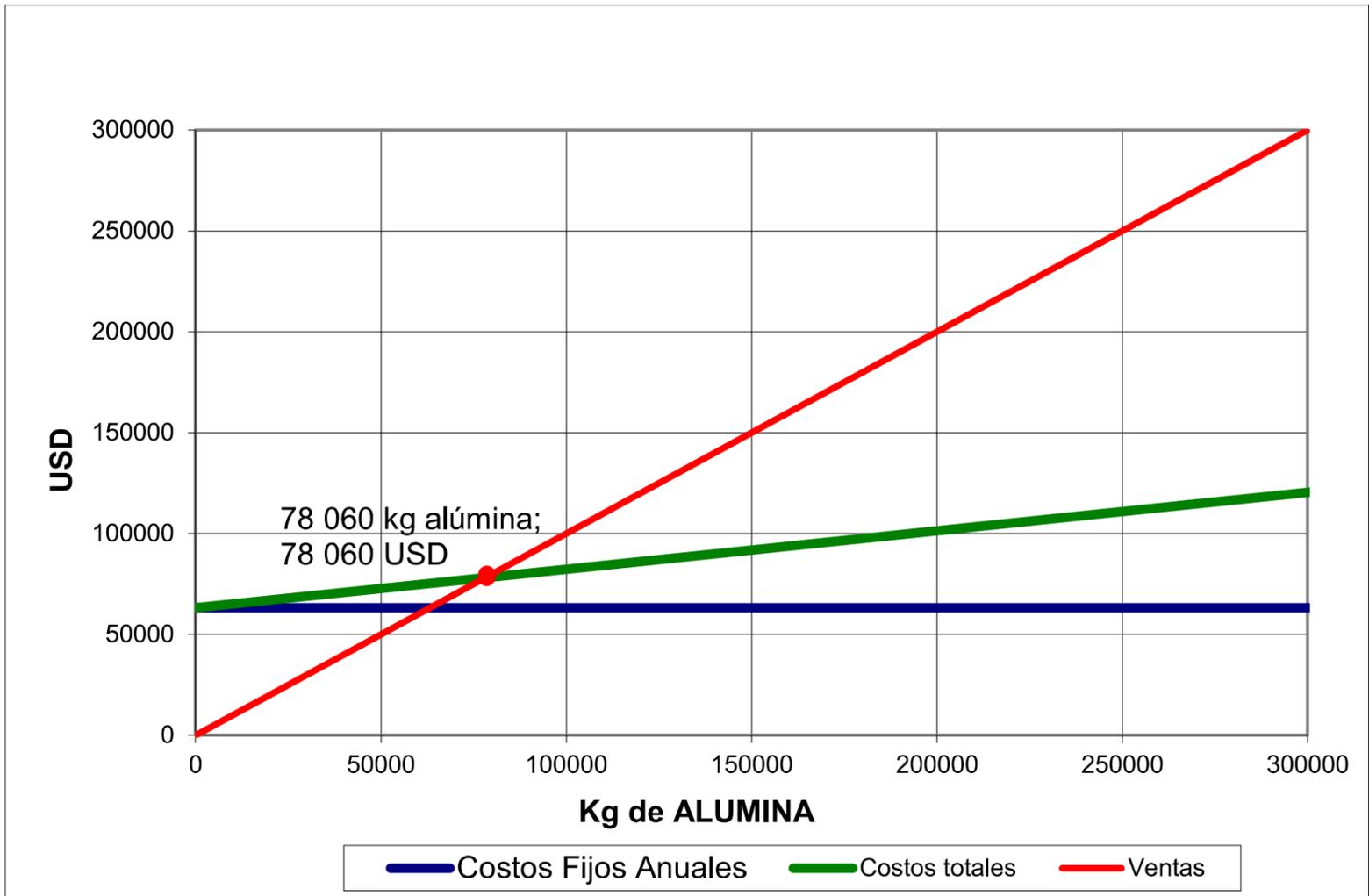


Figura 3.23. Punto de equilibrio del proyecto de recuperación de los lodos anódicos

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Se determinó que los lodos generados en los tratamientos de efluentes del anodizado de piezas de aluminio tienen un alto contenido de humedad (80%). Además, los lodos anódicos está constituido de aluminio (32 %), sodio (0,3 %), magnesio (0,8 %), silicio (2,75 %) y calcio (0,04 %). Por lado, los lodos anódicos presenta ninguna fase mineralógica. Por otro lado, las propiedades físicas fueron densidad real 1,98 g/mL, área superficial 11 m²/g y tamaño de partícula (d₈₀) 88 μm
- El resultado del ensayo TGA para la muestra de lodo seco (24 h, 110 °C) revelo tres zonas de pérdida de peso. La primera zona se presenta entre 19 °C y 184 °C con 6,2 % que sería a la eliminación de agua libre. La segunda zona ocurre entre 184 °C y 400 °C con 18,6 % que puede ser la transición del hidroxilo de aluminio (gibbsita) a bohemita. La tercera zona se encuentra entre 400 °C y 650 °C con 5,8 % que se asocia con la transición de la bohemita a γ-alúmina y la cuarta ocurre a partir de los 800 °C se debe a las descomposición de los sulfatos. Mientras que los lodos con 80 % de humedad tiene solo una sola zona que esta entre 19 °C y 200 °C con una gran pérdida del 75 % que corresponde a la evaporación de agua.
- Mediante el proceso hidrometalúrgico realizados a los lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio se obtuvo algunas consecuencias con los diferentes agentes lixiviantes. Por un lado, la lixiviación con ácidos inorgánicos presenta una recuperación alrededor del 10 % aluminio, mientras la lixiviación con ácidos orgánicos alcanzaron entre 11 % y 12 %. Por el contrario, la lixiviación con hidróxido de sodio se recuperó el 97,48 % de aluminio, por lo que el aluminato de sodio formado se podría utilizar como agente de encolado en la industrias de papel, pero el

estudio para esta producción ya existe, por tal razón se descartó para la valoración de los lodos anódicos.

- Los lodos anódicos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio previamente secados (110 °C por 24 h), sometido a procesos pirometalurgicos presentan dos fases cristalinas importantes, la una a 1 000 °C que corresponde a mullita ($\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$) y la otra a 1 200 °C que fue corindón (Al_2O_3). Pero, la fase mullita no fue estable a temperaturas mayores de 1 100 °C, por tal razón se descartó como opción para la valoración de los lodos anódicos. La cantidad de aluminio recuperado en los lodos calcinados a 1 200 °C fue del 99,06 % como alúmina (88 %),
- A partir de los resultados obtenidos por los ensayos a laboratorio, se observó que al calcinar los lodos anódicos a 1 200 °C (corindón) la densidad aumenta de 1,98 g/mL a 3,2 g/ml. Por otro lado, el área superficial del lodo seco (110 °C, 24 h) paso de 17,3 m²/g a un máximo de 41,4 m²/g a 600 °C y finalmente a 1200 °C se obtuvo un valor menor a 0,3 m²/g, y por último el tamaño de partícula de 88 µm (lodos secos a 110 °C) paso a 60 µm.
- Los lodos anódicos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio calcinados a 1 200 °C tienen corindón (88 %), cristobalita (8%) y fosfato de aluminio (2%). Por otro lado la densidad real fue de 3,2 g/cm³, el área superficial fue menor 0,3 m²/g y d₈₀ igual a 60 µm. Además, se encontró que estas propiedades son similares a una alúmina comercial (A21) que se utiliza en la industria cerámica como material refractario.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se determinó que la técnica de valoración de los lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado con posibilidades de aplicación industrial es la producción de corindón a partir de un secado para reducir la humedad del 80 % al 12 % en un invernadero con convección forzada, luego una calcinación a 1 200 °C

por 2 horas y una molienda con un molino de rodillo para homogenizar el material, el diseño conceptual de la planta de recuperación se realizó bajo estas consideraciones.

- En el proceso de calcinación de los lodos anódicos se obtuvo un rendimiento 73,72 % de corindón, con respecto al lodo seco (12 % humedad). Mientras que como gas residual se obtuvo el 4,18 % de trióxido de azufre y el 95,93 % fue vapor de agua (agua libre y ligada).
- Para una planta de valoración de los lodos anódicos de 5 toneladas diarias se determinó que se requieren los procesos de secado, calcinado y molienda, con equipos de capacidad: secado en invernadero 35 000 kg/sem, banda transportadora 1 000 kg/h, silo de almacenamiento 68 m³, dos hornos eléctricos tipo bach de 0,7 toneladas de capacidad, bandeja de enfriamiento 0,69 m³, y molino de rodillo de 10 kg/min.
- El sistema de procesamiento de los lodos anódicos es una alternativa ambiental y sustentable ya que para el proceso de secado para reducir la humedad del 80 % al 12 % se utiliza energía renovable (radiación solar). Esto evitara el uso de combustibles fósiles y por ende la generación de CO₂ a la atmosfera. Mientras que por el otro sustentable se recupera una materia prima (corindón) de un desecho.
- Para la implementación de la planta de valoración de lodos anódicos, se calculó que se necesita de una inversión inicial del proyecto de 279 451,43 USD, se obtuvo una utilidad anual de 108 244,38 USD al producir mensualmente 20 357,12 kg de alúmina (corindón) y el producto se comercializa a 1,00 USD/kg. Los índices financieros obtenidos: VAN =157 461,00 USD, TIR = 24,38 % y B/C = 1,56 permitieron analizar la factibilidad del negocio y concluir que se podría realizarlo.

4.2 RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas de termo gravimétricas desde temperaturas ambientes hasta 1 400 °C, para observar que ocurre con la pérdida de peso a más altas temperaturas.
- Analizar la calcinación de lodo anódico con otros tipos de hornos (continuos) con fin de determinar qué efecto tiene en la cristalización de estos.
- Se recomienda en traslado de las instalaciones de la Planta de anodizado de aluminio a la zona industrial, esto evita el costo de transporte de los lodos anódicos a la planta de recuperación de alúmina y además contribuye a las disposiciones de ordenamiento territorial permitiendo el crecimiento de infraestructura y competitividad. Es conveniente la instalación tomando en cuenta la ubicación de la planta de tratamiento de aguas frente a los secadores tipo invernadero.
- Se recomienda la instalación de la planta en un terreno que posea una zona con un desnivel con alrededor de 7 a 10 metros lo cual beneficiara para evitar la utilización de bandas de transporte en la elevación del material hacia los almacenamientos, esto permitirá reducir costos de energía.
- Establecer un lavador de gases y una torre de absorción con el objetivo de cumplir con las normas ambientales ya que al calcinar los lodos se genera trióxido de azufre

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Anderson, T. (2008). Preguntas y respuestas aluminio. *Welding Journal en Español*, 2(3), 23-34. Recuperado de: <http://www.aws.org/wj/esp/2009/10/wjesp1009-10.pdf> (Enero, 2013)
2. Álvarez-Ayuso, E. (2009). Approaches for the treatment of waste streams of the aluminium anodizing industry. *Journal of Hazardous Materials*. 164(2-3), 409-414
3. Askeland, D., Fulay, P. y Wright, W. (2002). *The Science and Engineering of Materials*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=qzqFEWcoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. (Febrero, 2013)
4. Asthana, R., Kumar, A. y Dahotre, B. (2006). *Materials Processing and Manufacturing Science*. Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?id=oWRXvrgFhqUC&printsec=frontcover&dq=Asthana,+R.,+Kumar,+A.+y+Dahotre,+B.+\(2006\).+Materials+Processing+and+Manufacturing+Science&hl=es&sa=X&ved=0CB4Q6AEwAGoVChMIuuLrlqbFyAIVAR4eCh2kvAQI#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=oWRXvrgFhqUC&printsec=frontcover&dq=Asthana,+R.,+Kumar,+A.+y+Dahotre,+B.+(2006).+Materials+Processing+and+Manufacturing+Science&hl=es&sa=X&ved=0CB4Q6AEwAGoVChMIuuLrlqbFyAIVAR4eCh2kvAQI#v=onepage&q&f=false). (Mayo, 2013)
5. Boaventura, R., Duarte, A., Almeida, M. (2000). Aluminum Recovery from water treatment Sludges. (1-4). *IV International Conference Water Supply and Water Quality*. Krakow, Poland
6. Boch, P., Niepce, J. (2007). *Processes, Properties and Applications*. (1ra. ed.). United States: ISTE Ltd.
7. Cámara de Industrias de Guayaquil. (2010). Perfiles de Mercado de Barras y Perfiles de Aleaciones de Aluminio, Excepto Huecos. Recuperado de http://industrias.ec/archivos/file/Barras_Y_Perfiles_De_Aleacion_De_Aluminio.pdf (Enero, 2013)

8. Castaño, G. y Echeverría, F. (2010). Estudio de la Degradación de la Capa de Sellado en Perfiles de Aluminio Anodizado. *Ingeniería y Desarrollo*, 1(28), 1-14
9. Cembrero, J., Ferrer, C., Pascual, M. y Pérez, M. (2005). Ciencia y Tecnología de Materiales. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=Cg05ZNvbr1cC&pg=PR1&dq=Cembrero,+J.,+Ferrer,+C.,+Pascual,+M.+y+P%C3%A9rez,+M.+%282005%29.+Ciencia+y+Tecnolog%C3%ADa+de+Materiales:&hl=es&sa=X&ved=0CBwQ6AEwAGoVChMIzZGwWk7FyAIVy5MNCh3TfwLh#v=onepage&q=Cembrero%2C%20J.%2C%20Ferrer%2C%20C.%2C%20Pascual%2C%20M.%20y%20P%C3%A9rez%2C%20M.%20%282005%29.%20Ciencia%20y%20Tecnolog%C3%ADa%20de%20Materiales%3A&f=false> (Enero, 2013)
10. Chavez, H., Machuca, F. (2007). *Reciclaje de Lodos de Plantas de Anodizado como Materia Prima en la Elaboración de Cerámicas Refractaria*. XXIV Congreso Nacional de Ingeniería Química, Cali, Colombia. Recuperado de <http://usuarios.multimania.es/henrycht/RECICLAJE%20DE%20LODOS%20DE%20PLANTAS%20DE%20ANODIZADO%20COMO.pdf> (Enero, 2013)
11. Cornelis, K., Cornelius, S. y Hurlbut, JR. (2003). *Manual de la Mineralogía*. (4ta. Ed.). Barcelona: Reverté.
12. Correia, A., Chambino, T., Gonçalves, A., Ribeiro, C., Bartolomeu, F. (2001). Use of Solid Waste from Surface Treatment of Aluminium as Coagulant. *Seventh International Conference on Environmental Science and Technology* (pp.129-138). Ermoupolis, Greece: T.D. Lekkas.
13. Correia, A., Chambino, T., Gonçalves, L., Franco, A., Goncalves, R., Goncalves, A., Limpo, V., Delmas, L., Nogueira, C., Bortolomeu, F.

- (2005). Municipal Wastewater Treatment with Anodizing Solid Waste. *Journal Elsevier*, 1(3), 22-26
14. Davis, K. (2010). Material Review: Alumina (Al₂O₃). School of Doctoral Studies European Union Journal, 2(3), 109-114. Recuperado de: http://www.iiuedu.eu/press/journals/sds/SDS_2010/DET_Article2.pdf (Febrero, 2013)
15. Farinha, A., Ribeiro J., Mendes., M., Vieira, M. (2008). Shock activation of α alumina from calcinated Al-rich sludge. *Ceramic International*, 35(5), 1-8
16. Ferlini, S., Costa, E. y Ferri, E. (2006) *Effects of Silicium in aluminum alloy anodizing*. Primera ronda o solicitud de memorias Jornadas Nacionales sobre la edición de Corrosión y Protección VII, Messina, Italia. Recuperado de: http://www.aimnet.it/allpdf/pdf_publici/9_06/Ferlini.pdf
17. Ferreira, J., Olhero, S. (2001). Al-rich Sludge Treatments towards Recycling. *Journal of the European Ceramic Society*, 22(13), 2 243-2 249
18. García, C y Echeverría, I. (2004). El aluminio se Fortalece en el Mercado Europeo. *Revista de los Equipos y Tecnologías del Envase y Embalaje*, 20(103), 1-90. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=i2AEAAAAMBAJ&pg=PT46&dq=aluminio+8%25&hl=e&sa=X&ved=0CBoQ6AEwAGoVChMIWm8uPCyAIVAYsNCh02IQ5n#v=onepage&q=aluminio%208%25&f=false>. (Octubre, 2015)
19. Gomes, V., Labrincha, J., y Novaes de Oliveira, A. (2005). Synthesis of Pigments Using Aluminum Rich- Sludge. *American Ceramic Society Bulletin*. 84(5), 9501-9503

20. González, E., Barbadillo, P., Díaz, L., García, F., Hernández, A., Ayala, N. (2000). *Utilización de los Lodos de Hidróxidos de Aluminio Procedentes de las Plantas de anodizado para su Utilización en la Fabricación de Aluminato y Procedimiento para Realizarlo*. Recuperado de: http://www.google.com.ec/#hl=es-419&tbo=d&output=search&sclient=psyab&q=Utilizaci%13on+de+los+lodos+de+hidr%13oxido+de+aluminio+procedente+de+las+plantas+de+anodizado&oq=Utilizaci%13on+de+los+lodos+de+hidr%13oxido+de+aluminio+procedente+de+las+plantas+de+anodizado&gs_l=hp.12...22256.22256.0.23815.1.1.0.0.0.0.266.266.21.1.0...0.0...1c.MFnaeMa5HSs&pbx=1&bav=on.2,or.r_gc.r_pw.r_qf.&bvm=bv.41248874,d.dmg&fp=1be32dc7c33a5139&biw=1440&bih=900 (Enero, 2013)
21. González, F., Sánchez, M. y Solís, R. (2011). *Ciencias de la Naturaleza*. Recuperado de <https://books.google.com.ec/books?id=FX-cAwAAQB AJ&pg=PA101&dq=el+aluminio+en+la+naturaleza&hl=es&sa=X&ve0CBoQ6AEwAGoVChMlicP9hubCyAIVA5MNCh0IBgqe#v=onepag&q=el%20aluminio%20en%20la%20naturale&f=false>. (Octubre, 2015)
22. Granda, I., Plaza, G. (2012). *Elaboración e implementación de una planta de manejo de residuos y vertidos líquidos industriales generados por la Corporación Ecuatoriana de Aluminio S.A. CEDAL*. Proyecto de titulación previo a la obtención del título Master en Sistemas en Gestión Ambiental. Escuela Politécnica del Ejército, Quito, Ecuador.
23. Hydro aluminium, (2005). Manual para el diseño de perfiles de extrusión de aluminio. Recuperado de www.hydro.com/upload/.../Perfiles%20 Industriales/Manual_extrusion.pd. (Junio, 2013).
24. Hou, P., Basu, S. y Sarin, V. (2001). Structure and High-Temperature Stability of Compositionally Graded CVD Mullite Coating. *Refractory Metals & Hard Materials*, 19(3), 467-477

25. Hudson K., Misra, C., Perrotta, A., Wefers, K., Williams F. (2005). *Encyclopedia of Industry Chemistry: Aluminum Oxide*. (5ta edición). New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
26. Hufnagel, W., (2004). *Manual del aluminio: Tratamiento Superficial del Aluminio*. (2da. Ed.). Barcelona, España: Reverté.
27. Indalum, (2010). *Libro Técnico*. Recuperado de: <http://www.indalum.com.mx/> (Junio, 2013)
28. Iranzo, C. (2002). *Procedimiento de Fabricación de Sulfato de Aluminio y sus Derivados a partir de Lodos de Hidróxidos de Aluminio Procedentes de las Plantas de Anodizado*. Recuperado de http://www.oepm.es/pdf/ES/0000/000/02/17/60/ES-2176064_B1.pdf (Enero, 2013)
29. Jai, G., Ali, N. y Fawcett, D. (2011). Progress in Nano-Engineered Anodic Aluminum Oxide Membrane Development. *Journal Materials*. 4(3) 487-526
30. Jaramillo, L. (2006). NaOH and H₂SO₄ Recovery in Anodizing Processes: An Environmental and Economic Opportunity. *Universidad Pontificia Bolivariana*, 1(1), 39-53
31. Karamalidis, A., Dzombak, D. (2010). *Surface Complexation Modeling*. Recuperado de <http://books.google.com.ec/books?id=XULsOFSipsgC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>. (Enero, 2013)
32. Khezri, S., Poshtegal, M., Khoramipour, S., Ghafari, P. (2010). Use of aluminium anodizing sludge cake in manufacture of bricks. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 8(3-4), 1158-1161.

33. Kleebe, H., Siegelin, F., Straubinger, T. y Ziegler, G. (2001). Conversion of $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$ Powder Mixtures to 3:2 Mullite Following the stable or Metastable Phase Diagram. *Journal of the European Ceramic Society*, 21(14), 2521–2533
34. Kogel, J., Trivedi, N., Barker, J., Kruskowski, S. (2006). *Industrial Minerals and Rocks*. (7ta. Edición). United State of American: SME.
35. Le Blanc, R. (2009). The effect of Anodizing to Minimize Friction and Wear of Aluminum Surfaces. Recuperado de: www.ewp.rpi.edu/.../FWM%Final%20Project.pdf. (Septiembre, 2013)
36. Mantell, C. (2003). *Ingeniería Electro-Química*. (4ta. Ed.). Barcelona, España: Reverté
37. Misra, C. 2003. *Encyclopedia of Chemical Technology Hydrated*. (5ta edición). New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc.
38. Mitrakas, M., Bakaloulis, K., Gkinis, K. (2010). *Aluminum Anodizing Sludge as a Potential As (V). Adsorbent*. Recuperado de <http://www.srcosmos.gr/srcosmos/showpub.aspx?aa=14260>. (Mayo, 2013)
39. Mohanty, J., Biswal, S., Reddy, S., Misra, V. (2003). *Role of Chemical Engineering in Processing of Minerals and Materials*. (1ra. ed.). New Delhi: Allied Publishers Pvt Ltd.
40. Moraes, G., Oliveira, B., Siligardi, C., Innocentini, M., Oliveira, Jr., Rodríguez, J., Hotza, D., Novaes de Oliveira, A. (2010). Production of foundry filters using Al_2O_3 from the Al-anodizing process. *Advances in Science and Technology*, 234(62), pp 119-124.

41. Ordoñez, J. (2012). Anodizado para extender la vida útil del aluminio. Recuperado de http://www.metalactual.com/revista/37_procesos_anodizado.pdf (Enero, 2016)
42. Ortega, J. (1990). *Corrosión Industrial*. Recuperado de: <http://books.google.com.ec/books?id=x8HntTZQ3RwC&pg=PA75&dq=Informaci%C3%B3n+de+los+cinco+tipos+de+anodizado&hl=es419&sa=X&ei=1BKZUYepEYm09gSm1oDYAQ&ved=0CDMQ6AEwAQ#v=onepage&q=Informaci%C3%B3n%20de%20los%20cinco%20tipos%20de%20anodizado&f=false> (Mayo, 2013)
43. Pajunen, P. (1999). *Chemical Recovery Systems for Aluminium Finishers*. Workshops Cleaner Production in the Metal Finishing Industry, Taipei, Taiwan. Recuperado de <http://www.eco-tec.com/pdf/TP-129%20Anodizers%20Recovery.pdf> (Enero, 2013)
44. Parkson Thermo System (2012). *Thermo System Specialist in Solar Drying*. Parkson. Recuperado de <http://www.virginiabiosolids.com/wpcontent/uploads/2012/09/Kraemer-Thermo-System.pdf> (Junio, 2014)
45. Perry, R., Green, D. (2007). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8va. ed.). New York: McGraw Hill
46. Ribero, D., Restrepo, R., Paucar, C. y García, C. (2006). Disminución de la Temperatura en la Síntesis de un Material Cerámico Altamente Refractario (Mullita), a Partir de Hidroxihidrogeles. 74(153), 95-100. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49615311> (Mayo, 2013)
47. Ribeiro, M., Tulyaganoc, D., Ferreira, J. y Labrincha J. (2002). Recycling of Al-rich industrial sludge in refractory ceramic pressed bodies. *Ceramic International*, 28 (3), 319-326.

48. Ribeiro, M., Abrantes, J., Labrincha, J. (2006). Impedance Spectroscopy Evolution upon Sintering of Al-rich Anodising sludge-based Extruded Bodies. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 45 (4), 300-303
49. Rivas, J., Pena, P., Aza, A. (2006). On the Decomposition of Synthetic Gibbsite Studied by Neutron Thermodiffractometry. *Journal American Ceramic Society*, 89 (12), 3 728- 3 733
50. Rodríguez, J., Villaquirán, C. y Cobo, J. (2001). Estudios de Formación de Complejos Intermedios Durante la Síntesis de Alúmina. *Materials Research Journal*, 4(4), 255-264
51. Schneider, H., Schreuer, J. y Hildmann, B. (2008). Structure and properties of mullite-A review. *Journal of the European Ceramic Society*, 28(2), 329-344
52. Shackelford, F. J. y Doremus, H. R. (2008). Ceramic and Glass Materials. Recuperado de http://www.mo-sci.com/uploads/PDF_documents/publications/ceramic-and-glass-materials.pdf (Febrero, 2013)
53. Sifco Process. (2010). *Anodizing Instruction Manual*. Recuperado de <http://www.sifcoasc.com/pdf/SIFCO%20Process%20Anodize%20Manual%20Rev.%204-19-2010.pdf> (Diciembre, 2012).
54. Solís, A. (2008). *Determinación de los niveles de contaminantes por procesos productivos en la industria de aluminio CEDAL S.A.* (Proyecto titulación previo a la obtención del título de Master en las ciencias de la Ingeniería y Gestión Ambiental). Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador.
55. Tansens, PA., Rodal, A., Machado C., Soares, H. (2011). Recycling of Aluminum and Caustic Soda Solution from Waste Effluence

Generated During the Cleaning of the Extruder Matrixes of the Aluminum Industry. *Journal of Hazardous Material*, 187 (2), 459-465.

56. Totten, G. y Mackenzie, S. (2003). Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes. (1ra. Ed.). New York, United States of America: Marcel Dekker, Inc.
57. Vieira, A., De Souza, H., Kuniiko, P., Pinto, K., De Souza, P. (2007). Surface Area, Crystal Morphology and Characterization of Transition Alumina Powders from a New Gibbsite Precursor. *Materials Research Journal*, 10(2), 183-189
58. Vieira, S., Ramos, A., Vieira, M. (2005). Mullitizaion kinetics from silica - and alumina-rich waste. *Ceramic International*. 33(1), 59-66
59. Wagh, A. (2004). Chemically Bonded phosphate ceramics. Recuperado de http://www.petronet.ir/documents/10180/2324293/chemically_bonded_phosphate_ceramics (Febrero, 2013).

ANEXOS

ANEXO I
FICHAS TÉCNICAS DE LA CARACTERIZACION FISICA,
QUIMICA, TERMICA DE LODOS ANODICOS

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA NO 1

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Determinar el porcentaje de humedad de lodos anódicos.

Número de Muestra: dos

Condiciones de operación:

Peso del lodo seco: 5 g

Donde:

H = Humedad de la muestra

W₁ = Peso inicial de la muestra

W₂ = Peso del crisol vacío y tarado

W₃ = Peso del crisol más muestra a 110 °C después de 2 horas

$$\%H = \frac{W_1 - (W_3 - W_2)}{W_1} \times 100$$

[A. 1]

Tabla AI. 1. Humedad de los lodos anódicos

	ENSAYO 1 (g)	ENSAYO 2 (g)
w1	5,01	5,08
w2	41,46	42,34
w3	42,55	43,3
%H	78,24	81,10
Promedio %H	79,67	

El ensayo se realizó para dos muestras de lodos anódicos con el objetivo para de comparar la efectividad del análisis de esta técnica, también para promediar los resultados.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA NO 2

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Determinar la densidad real del lodo anódico

Condiciones de operación:

Peso del lodo seco: 5 g

$$D_r = \frac{d_w(W_s - W_a)}{(W_s - W_a) - (W_{sw} - W_w)} \left[\frac{g}{ml} \right] \quad [A1.1]$$

Donde:

D_r = Densidad real (g/ml)

d_w = Densidad del agua a 4 °C (1,00 g/ml)

W_s = Masa del picnómetro con la muestra (g)

W_a = Masa del picnómetro vacío (g)

W_{sw} = Masa del picnómetro con muestra y agua (g)

W_w = Masa del picnómetro con agua (g)

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 3

Muestra: Lodos anódicos secos a 110 °C por 24 h

Objetivo: Determinar del tamaño de partícula (d_{80})

Peso de la muestra: 250 g

Tabla AI. 2. Resultado del análisis granulométrico de los lodos anódicos secos

Malla #	Abertura (um)	Peso (g)	% Retenidos	% Retenidos acumulado	% Pasado acumulado
40	400	0,2	0,080	0,080	99,920
70	210	3	1,204	1,285	98,715
80	177	0,3	0,120	1,405	98,595
100	150	3,2	1,285	2,689	97,311
150	106	11	4,416	7,105	92,895
200	75	77,4	31,069	38,174	61,826
270	53	144,12	57,852	96,026	3,974
325	45	8	3,211	99,237	0,763
400	38	1,23	0,494	99,731	0,269
<400	0	0,67	0,269	100,000	0,000

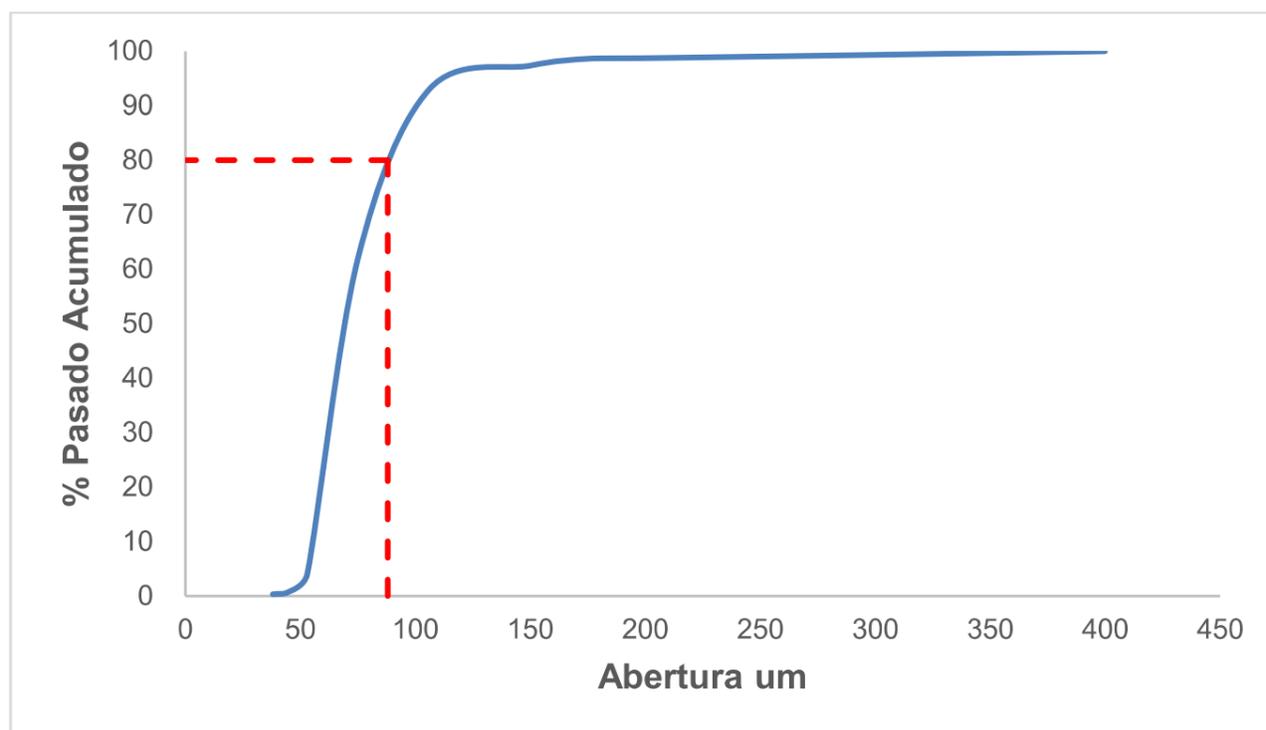


Figura AI. 1. Porcentaje pasado acumulado vs tamaño de partícula de los lodos anódicos secos

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 4

Muestra: Lodos anódicos secos a 110 °C por 24 h

Objetivo: Determinar del área superficial por método BET

Se procedió a realizar el análisis BET de los lodos secos como se detalla en la Sección 2.1.1.5. Los gráficos siguientes son el resultado de este análisis y corresponden a las curvas de absorción y desorción. Además se presenta datos como el volumen de poro, tamaño de poro y área superficial de los lodos anódicos secos.

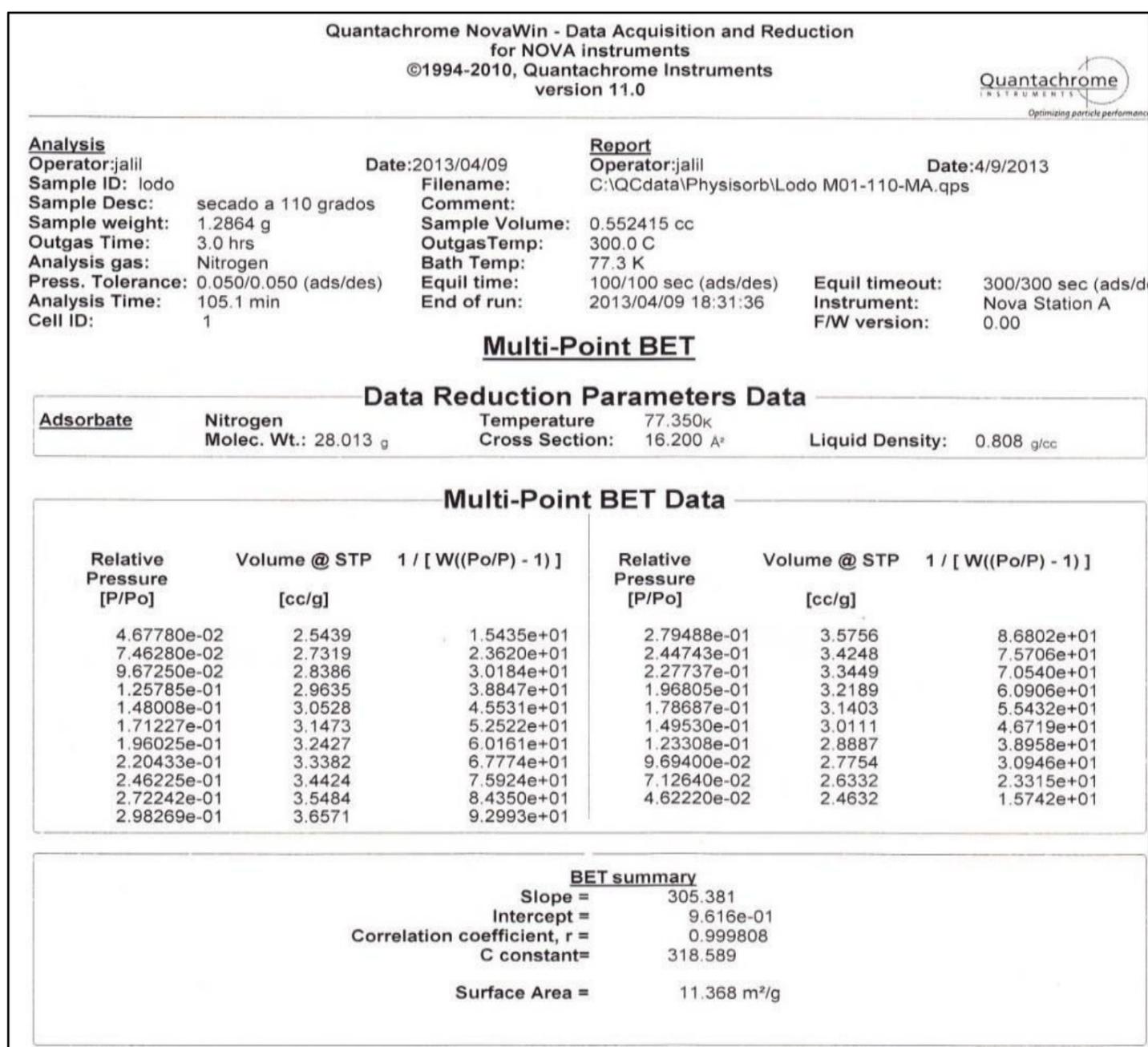


Figura AI. 2. Análisis del área superficial (110 °C) por el método BET (proceso de adsorción)

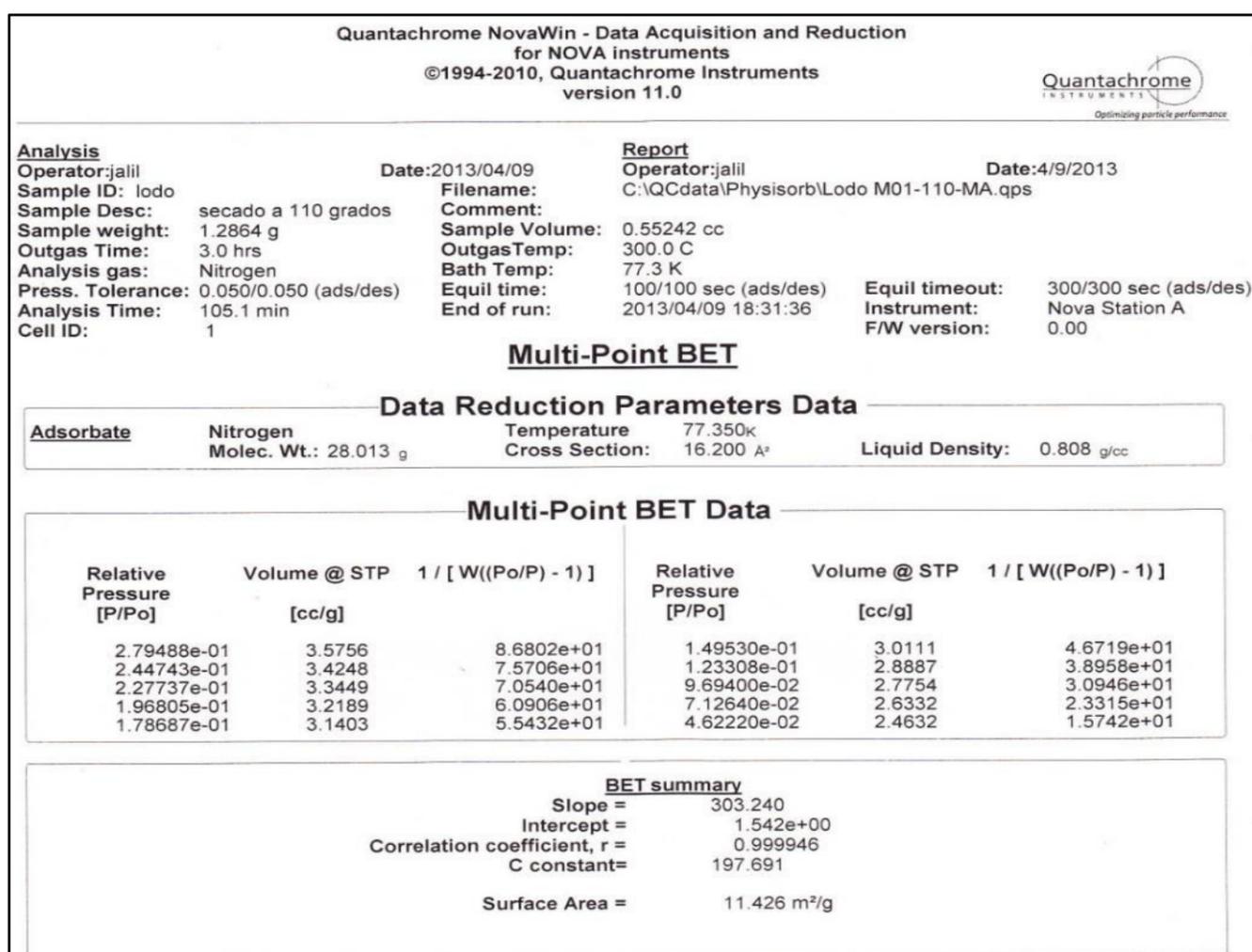


Figura AI. 3. Análisis del área superficial (110 °C) por el método BET (proceso de desorción)

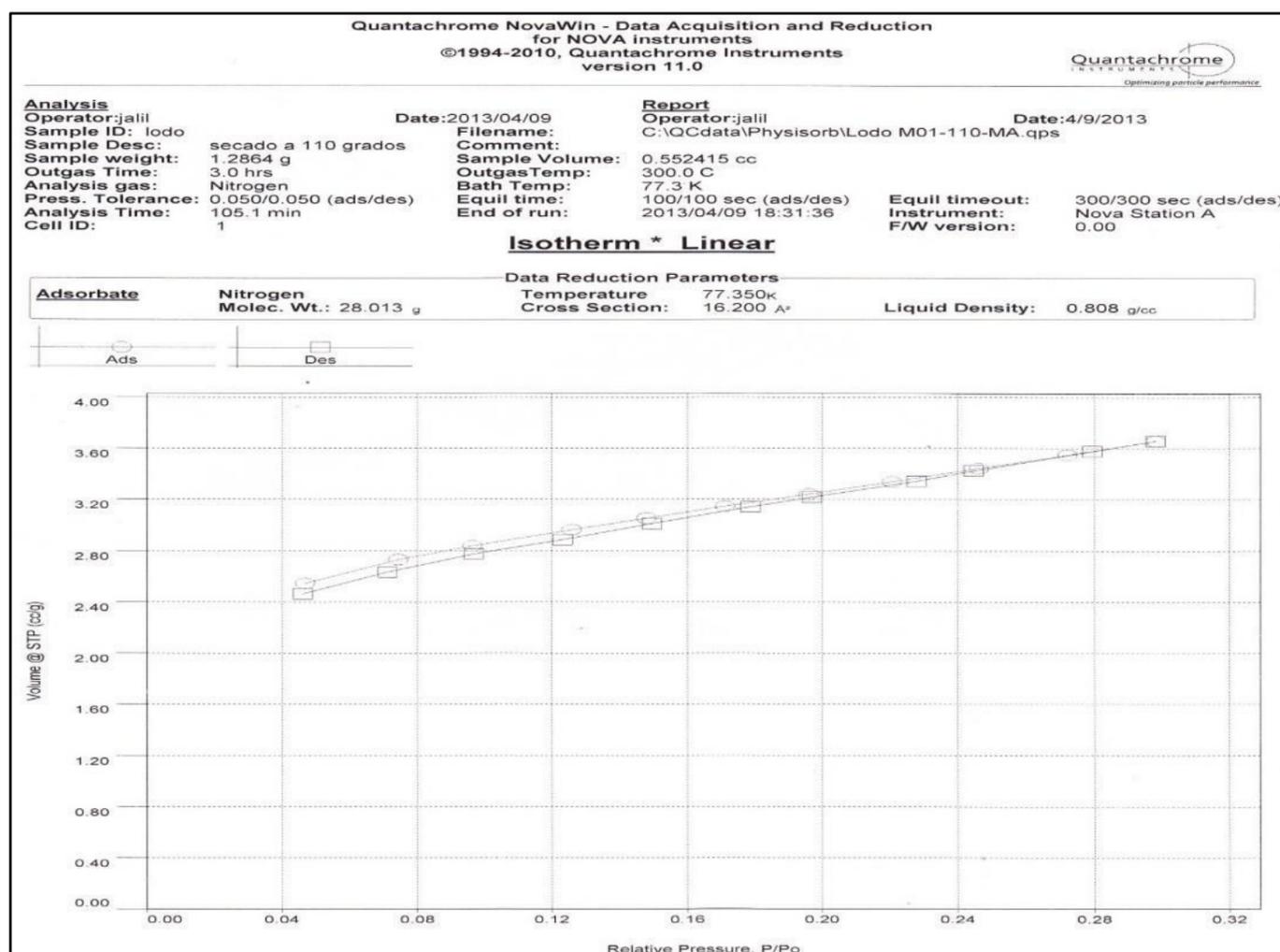


Figura AI. 4. Isotherma de adsorción y desorción de los lodos anódicos secos a 110 °C

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 5

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Caracterizar químicamente los lodos anódicos mediante espectrofotometría de absorción atómica (AA)

Número de Muestra: dos

Condiciones de operación:

Peso del lodo seco: 100 mg

Volumen de ácidos: 3 ml de ácido nítrico, 3 ml ácido fluorhídrico y 5 ml de ácido clorhídrico.

Tabla AI. 3. Composición química por absorción atómica de dos muestras de lodos anódicos secos

Elemento	Muestra 1 (%)	Muestra 2 (%)	Promedio (%)
Al	31,99	32,01	32,0
Mg	0,80	0,79	0,80
Si	2,75	2,,77	2,75
Na	0,3	0,32	2,3
Ca	0,04	0,04	0,04

El ensayo se realizó para dos muestras de lodos anódicos con el objetivo para de comparar la efectividad del análisis de esta técnica, también para promediar los resultados.

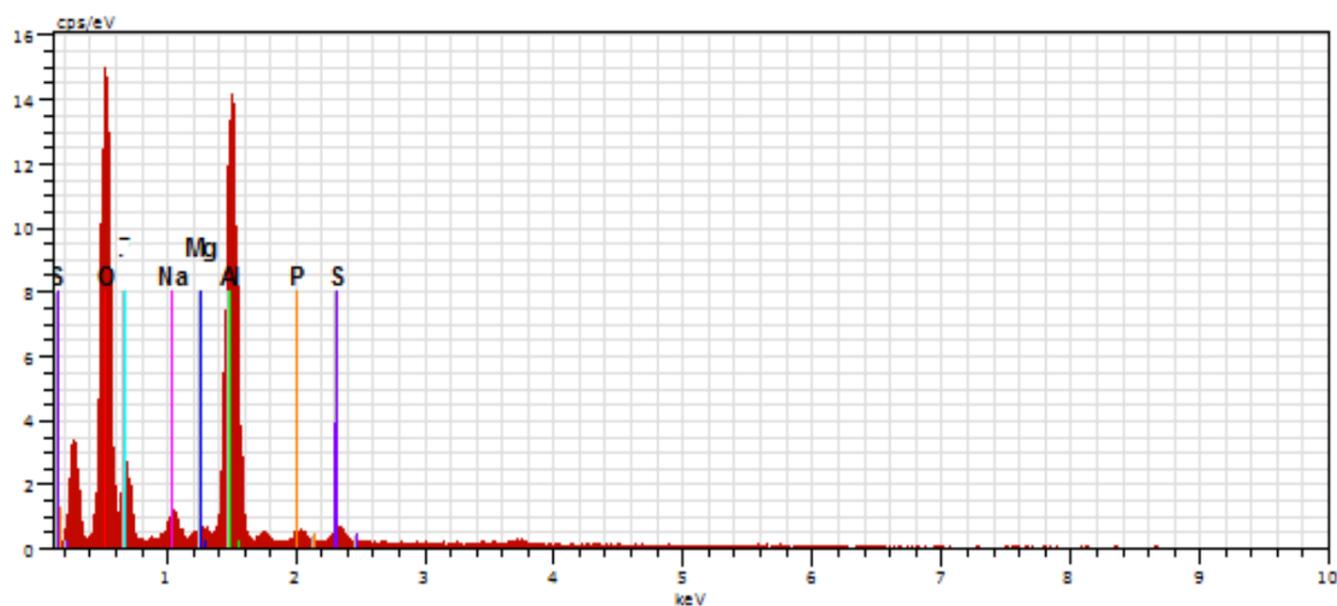
**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

**FICHA TECNICA No 6
Norma INEN 2250 (ALUMINIO. PERFILES, BARRAS, VARILLAS Y TUBO
EXTRUIDOS. REQUISITOS E INSPECCION)**

ALEACIÓN ISO ANSI/ASTM	Límites	Si %	Fe %	Cu %	Mn %	Mg %	Cr %	Zn %	Ti %	Otros c/u total	Aluminio %
Al99,5 1050A	máx. mín.	0,25	0,4	0,05	0,05	0,05 .....	..... ....	0,07	0,05	0,03	Resto 99,5
Al99,0 1200	máx. mín.	1,0(Si	+Fe)	0,05 0,05	0,05 ....	... ....	... ....	0,1	0,05	0,05/0,15	Resto 99,0
Al99,0Cu 1100	máx. mín.	0,95(Si	+Fe)	0,2 0,05	0,05 ....	... ....	... ....	0,1 ....	... ....	0,05/0,15	Resto 99,0
AlMn1 3103	máx. mín.	0,5	0,7	0,1	1,5 09	0,3	0,1	0,2 ....	... ....	0,05/0,15	Resto Resto
AlMn1Cu 3003	máx. mín.	0,6	0,7	0,2 0,05	15 1,0	... ....	... ....	0,1 ....	... ....	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg2 5251	máx. mín.	0,4	0,5	0,15	0,5 0,1	2,4 0,7	0,15	0,15	0,15	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg3 5754	máx. mín.	0,4	0,4	0,1	0,5	3,6 2,6	0,3	0,20	0,15	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg3Mn 5454	máx. mín.	0,25	0,4	0,1	1,0 0,5	3,0 2,4	0,2 0,05	0,25	0,20	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg4 5086 AlMg4,5	máx. mín.	0,4	0,5	0,1	0,7 0,2	4,5 3,5	0,25 0,05	0,25	0,15	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg4,5Mn0,7 5083	máx. mín.	0,4	0,4	0,1	1,0 0,4	4,9 4,0	0,25 0,05	0,25	0,15	0,05/0,15	Resto Resto
AlMgSi 6060	máx. mín.	0,6 0,3	0,3 0,1	0,1	0,1	0,6 0,35	0,05	0,15	0,1	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg0,7Si 6063	máx. mín.	0,6 0,2	0,35	0,1	0,1	0,9 0,45	0,1	0,1	0,1	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg0,7SiA 6063A	máx. mín.	0,6 0,3	0,35 0,15	0,1	0,15	0,9 0,6	0,05	0,15	0,1	0,05/0,15	Resto Resto
AlMg1SiCu 6061	máx. mín.	0,8 0,4	0,7	0,4 0,15	0,15	1,2 0,8	0,35 0,04	0,25	0,15	0,05/0,15	Resto Resto
AlSiMg 6005	máx. mín.	0,9 0,6	0,35	0,1	0,1	0,6 0,4	0,1	0,1	0,1	0,05/0,15	Resto Resto
AlSiMg(A) 6005A	máx. mín.	0,9 0,5	0,35	0,3	0,5	0,7 0,4	0,3	0,2	0,1	0,05/0,15	Resto Resto
AlSiMgMn 6062	máx. mín.	1,3 0,7	0,5	0,1	1,0 0,4	1,2 0,6	0,25	0,2	0,1	0,05/0,15	Resto Resto
AlSiMg0,5Mn 6351	máx. mín.	1,3 0,7	0,5	0,1	0,8 0,4	0,8 0,4	... ....	0,2	0,2	0,05/0,15	Resto Resto
ALEACION	Límites	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Otros	Aluminio

FICHA TECNICA No 7

Muestra: Lodos anódicos secos a 110 °C por 24 h



Lodo MO2-110 1 Fecha:4/12/2013 2:41:03 PM HV:15.0kV D. imp.:5.28kcps

El	AN	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Error
			[wt.%]	[wt.%]	[at.%]	[wt.%]
O	8	K-series	46.63	58.36	59.90	4.3
Al	13	K-series	20.43	36.68	35.81	1.0
Na	11	K-series	1.70	2.34	1.94	0.1
S	16	K-series	0.79	1.08	0.64	0.1
Mg	12	K-series	0.56	0.77	0.61	0.1
P	15	K-series	0.54	0.75	0.46	0.1
Total:			72.74	100.00	100.00	

Figura AI. 5. Análisis químico obtenido de la microscopía electrónica de barrido para una muestra de lodo anódico



Figura AI. 6. Observaciones al microscopio electrónico de barrido de una muestra de lodo anódico

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA No 8

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Caracterización la cristalinidad por difracción de rayos x

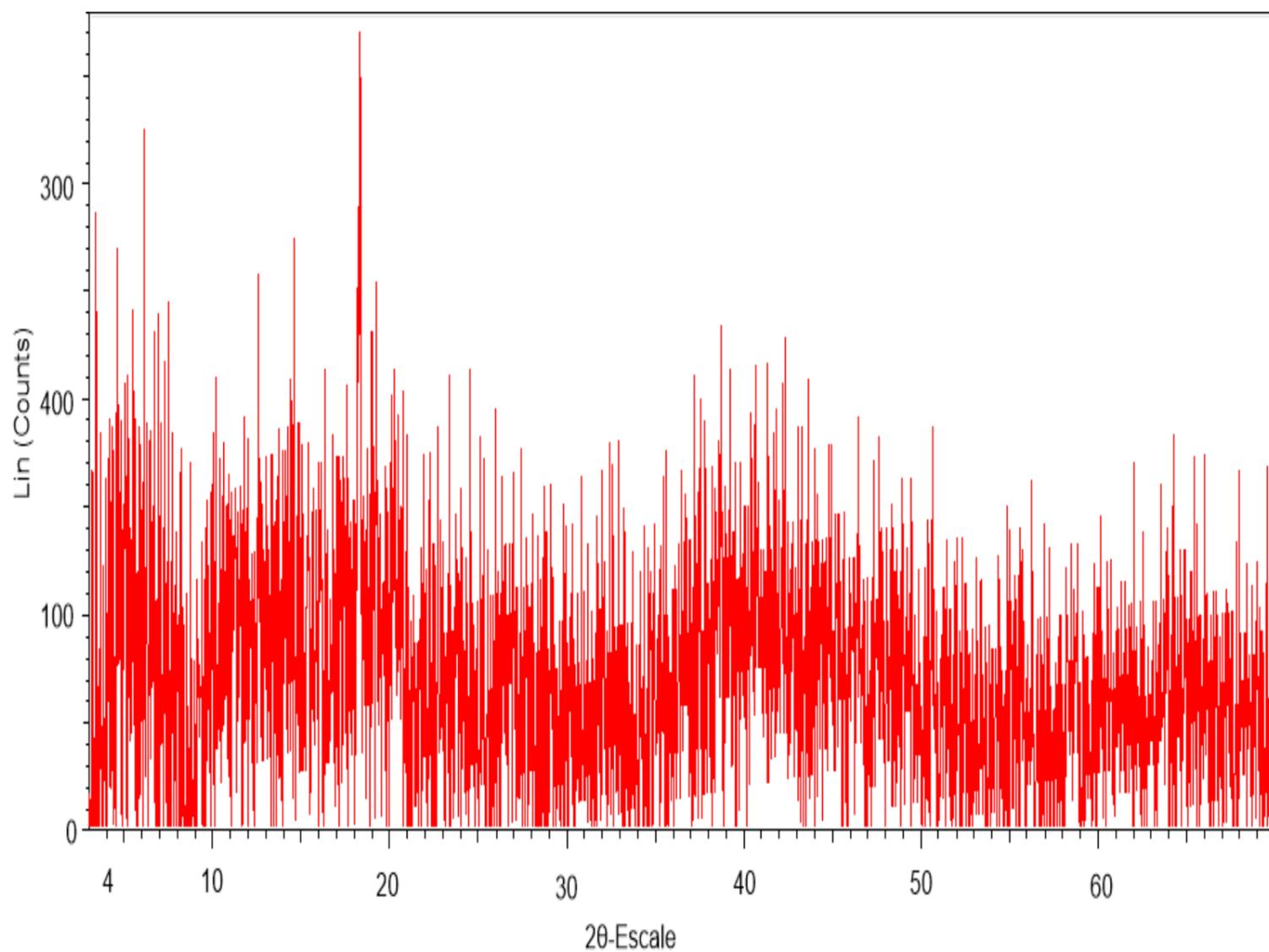


Figura AI. 7. Espectro DRX de los secos a 110 °C por 24 horas

ANEXO II
FICHAS TECNICAS DE LOS ENSAYOS TECNICOS DE
LIXIVIACION DE LOS LODOS ANODICOS

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA No 9

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Recuperación de aluminio por lixiviación con ácidos inorgánicos.

En la Tabla AII.1, se muestra los datos para el cálculo de la cantidad de aluminio presente en los lodos anódicos.

Tabla AII. 1. Datos para el cálculo del aluminio presente en los lodos anódicos

Datos	Valor
Peso lodo anódico (g)	5
Humedad (%)	79
Lodo seco (g)	1.05
Al (%)	32
Lodo seco (mg)	1050

Para el cálculo de la cantidad de aluminio presente en los lodos anódicos se Utilizo las ecuaciones [AII.1] y [AII.2].

$$WLS = WLH * H \quad [AII.1]$$

$$WLS = 5 [g] * 79 \% = 1.050 [g] = 1050[mg]$$

$$WAl = WLS * Al \% \text{ (en los lodos anódicos)} \quad [AII.2]$$

$$WAl = 1050[mg] * 32 \% = 336 [mg] Al$$

Donde:

WLH = Peso del lodo anódico húmedo

H = Humedad

WLS = Peso del lodo anódico seco

Wal = cantidad de aluminio en los lodos anódicos

Al (%) = concentración de aluminio en los lodos anódicos (obtenido en la Sección 3.1.2)

Los datos de la Tabla II.2, muestran datos de recuperación de aluminio en la solución fuerte, solución de lavado y relave para el agente lixiviante ácido clorhídrico.

Tabla AII. 2. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido clorhídrico

Ácido Clorhídrico (HCL)	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	498,2	1	70	34,87	10,38
Solución lavado	147,2	1	32	4,71	1,40
Relave	42,3	100	70	296,42	88,22

Los datos de recuperación de aluminio que se muestran en Tabla A.II.2, se calcularon como las ecuaciones [AII.3] y [AII.4], para las solución fuerte, solución lavado y relave

- Recuperación de aluminio en la solución fuerte

$$WSF = X * VSF * D \quad [AII.3]$$

$$WSF = 498,2 \frac{mg Al}{L} * 70 ml * \frac{1 L}{1000 ml} = 34,87 mg Al$$

$$\%RESF = \frac{WSF}{WAl} * 100 \quad [AII.4]$$

$$\%RESF = \frac{WSF}{WAl} * 100 = \frac{34,87 \text{ mg Al}}{336 \text{ mg Al}} * 100 = 10,38 \% Al$$

- Recuperación de aluminio en la solución lavado

$$WSL = X * VSL = 147,2 \frac{\text{mg Al}}{\text{L}} * 32 \text{ ml} * \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 4,71 \text{ mg Al}$$

$$\%RESF = \frac{WSF}{WAl} * 100 = \frac{36,18 \text{ mg Al}}{336 \text{ mg Al}} * 100 = 1,40 \% Al$$

- Recuperación de aluminio en el relave

$$WR = X * VR * DR = 42,3 \frac{\text{mg Al}}{\text{L}} * \text{ml} * 100 \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ ml}} = 296,42 \text{ mg Al}$$

$$\%RESF = \frac{WSF}{WAl} * 100 = \frac{296,42 \text{ mg Al}}{336 \text{ mg Al}} * 100 = 88,22 \% Al$$

Donde:

X = Concentración de aluminio en ppm [mg/L]

VSF = volumen recuperado de la solución fuerte

VSL = volumen recuperado de la solución de lavado

VR = volumen de aforamiento

DR = dilución del relave

WSF = cantidad de aluminio en la solución fuerte

WSL = cantidad del aluminio en la solución de lavado

WR = cantidad de aluminio en el relave

% RESF = porcentaje de recuperación de aluminio en la solución fuerte

% RESL = porcentaje de recuperación de aluminio en la solución de lavado

% RER = porcentaje de recuperación de aluminio en el relave

Los cálculos realizados para la lixiviación de los lodos anódicos con ácido clorhídrico se utilizó para todos los demás agentes lixiviantes

En las Tablas A.II.3 hasta la Tabla A.II.8 se muestra el balance metalúrgico para el resto agentes lixiviantes tanto inorgánico como orgánicos.

Tabla AII. 3. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido fluorhídrico

Ácido Fluorhídrico (HF)	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	528,4	1	66	34,87	10,38
Solución lavado	334,2	1	31	10,36	3,08
Relave	41,5	100	70	290,77	86,54

Tabla AII. 4. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con Ácido nítrico

Ácido Nítrico (HNO3)	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	502,5	1	72	36,18	10,77
Solución lavado	156,9	1	33	5,18	1,54
Relave	84,2	50	70	294,64	87,69

Tabla AII. 5. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido sulfúrico

Ácido Sulfúrico (H2SO4)	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	409,2	1	84	34,37	10,23
Solución lavado	117,5	1	30	3,53	1,05
Relave	85,2	50	70	298,10	88,72

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 10

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Recuperación de aluminio por lixiviación con ácidos orgánicos.

Tabla AII. 6. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido acético

Ácido Acético	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	543	1	75	40,73	12,12
Solución lavado	164,8	1	28	4,61	1,37
Relave	41,5	100	70	290,66	86,51

Tabla AII. 7. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido cítrico

Ácido Cítrico	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	531	1	77	40,89	12,17
Solución lavado	140,9	1	29	4,09	1,22
Relave	41,6	100	70	291,03	86,62

Tabla AII. 8. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con ácido tartárico

Acido Tartárico	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	496,7	1	76	37,75	11,23
Solución lavado	144,3	1	28	4,04	1,20
Relave	42,0	100	70	294,21	87,56

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No. 11

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Recuperación de aluminio por lixiviación alcalina

Peso relave: 223 mg

Tabla AII. 9. Balance metalúrgico del aluminio para la lixiviación con hidróxido de sodio

Hidróxido de Sodio (NaOH)	Al (ppm)	Dilución	Volumen Recuperado (mL)	Al (mg)	Al (%)
Solución fuerte	46,79	100	70	327,53	97,48
Solución lavado	4,75	100	28	13,30	2,06
Relave	2,3	50	70	8,12	1,02

ANEXO III
FICHAS TECNICAS DE LOS ENSAYOS PIROMELURGICOS Y
CARACTERIZACION POR MICROSCOPIA ELECTRONICA
Y DIFRACCION DE RAYOS X

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA No 12

Muestra: Lodos anódicos calcinados

Objetivo: Determinación de las características mineralógicas de los lodos calcinados a 1 100 °C, 1 137 °C.

A continuación, se presentan una serie de difractogramas obtenidos de la caracterización mineralógica de varias muestras lodos anódicos a diferente temperatura, además, también se comparte el resultado cuantitativo de dicho análisis:

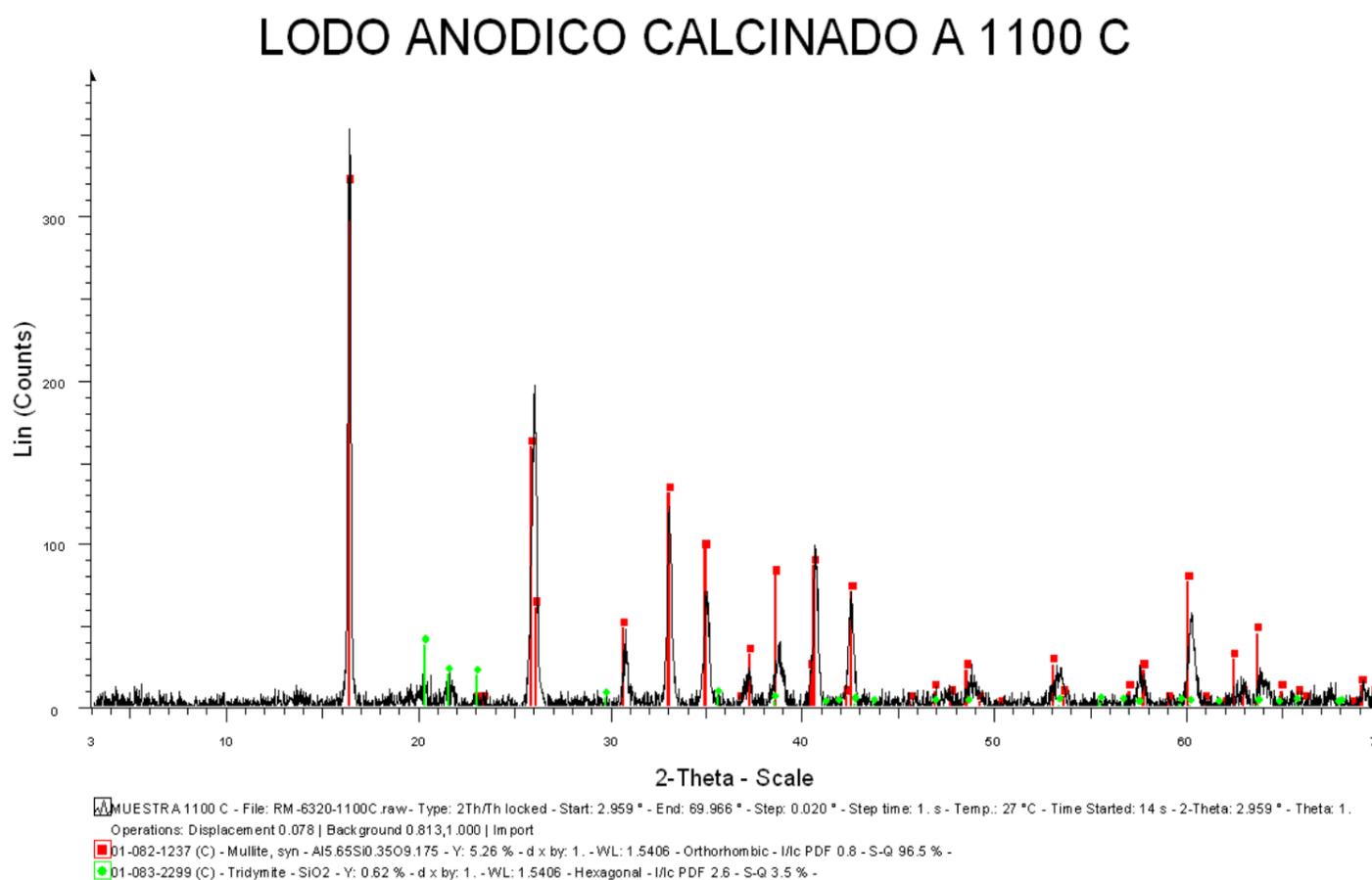


Figura AIII. 1. Difractograma del lodo calcinado a 1 100 °C

LODO ANODICO CALCINADO A 1137 C (NO PULVERIZADO)

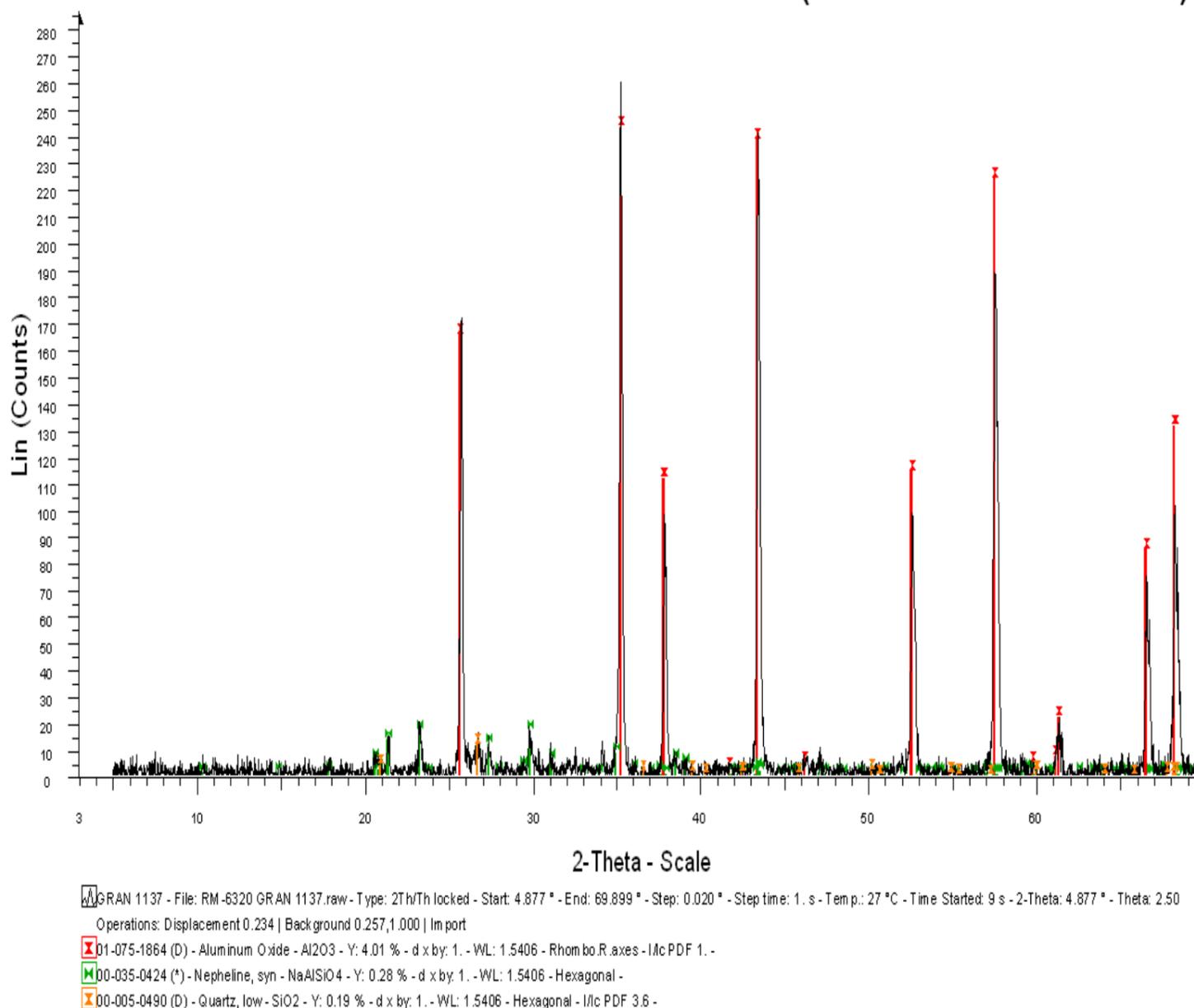


Figura AIII. 2. Comparación del difractograma del lodo calcinado a 1 137 °C

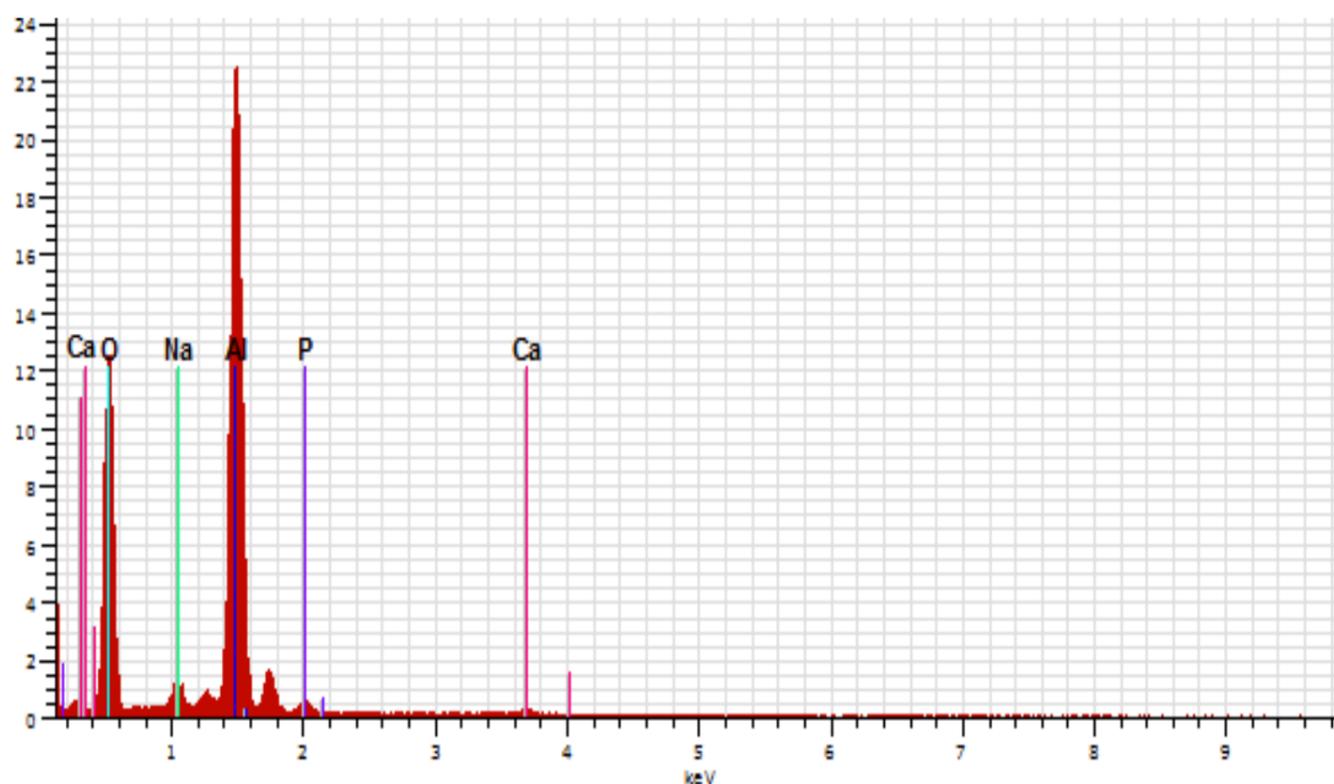
**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TÉCNICA No 13

Muestra: Lodos anódicos calcinados a 1 200 °C

Objetivo: Observaciones al microscopio electrónico de muestras de lodos anódicos calcinados a 1 200 °C

En las siguientes figuras se ilustra los resultados obtenidos de las observaciones al microscopio electrónico de la muestra calcinada a 1 200 °C, y los resultados cuantitativos del análisis químico elemental que realiza este equipo:



Lodo MO1-1200 1 Fecha:4/11/2013 4:59:55 PM HV:15.0kV D. imp.:5.56kcps

El	AN	Series	unn.	C norm.	C Atom.	C Compound	Comp.	C norm.	Comp.	C	Error
			[wt. %]	[wt. %]	[at. %]		[wt. %]		[wt. %]		[wt. %]
O	8	K-series	41.03	51.08	63.78		51.08		41.03		4.8
Al	13	K-series	35.97	44.78	33.15		44.78		35.97		1.7
Na	11	K-series	1.88	2.34	2.04		2.34		1.88		0.2
P	15	K-series	0.77	0.96	0.62		0.96		0.77		0.1
Ca	20	K-series	0.67	0.83	0.41		0.83		0.67		0.1
Total:			80.32	100.00	100.00						

Figura AIII. 3. Análisis químico obtenido de la microscopía electrónica de barrido para una muestra de lodo calcinado a 1 200 °C

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA No 14

Muestra: Lodos anódicos secos a 600 °C y 1 200 °C

- **Objetivo:** Determinar del área superficial por método BET (Brunauer, Emmett, y Teller). en equipo Quantachrome NOVA[®] 1000 e Surface Area Analyzer.

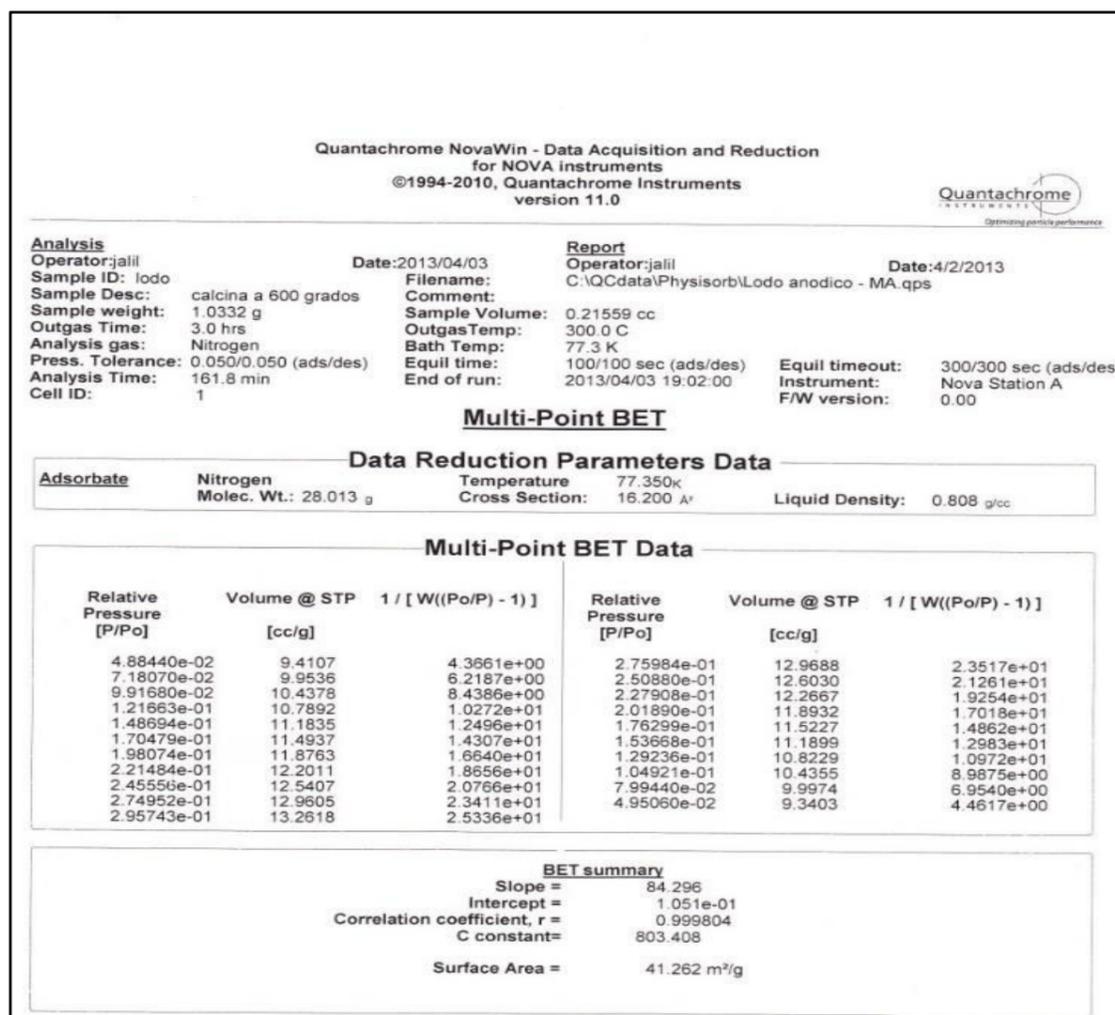


Figura AIII. 4. Análisis del área superficial de los lodos calcinados a 600 °C por el método BET (proceso de adsorción)

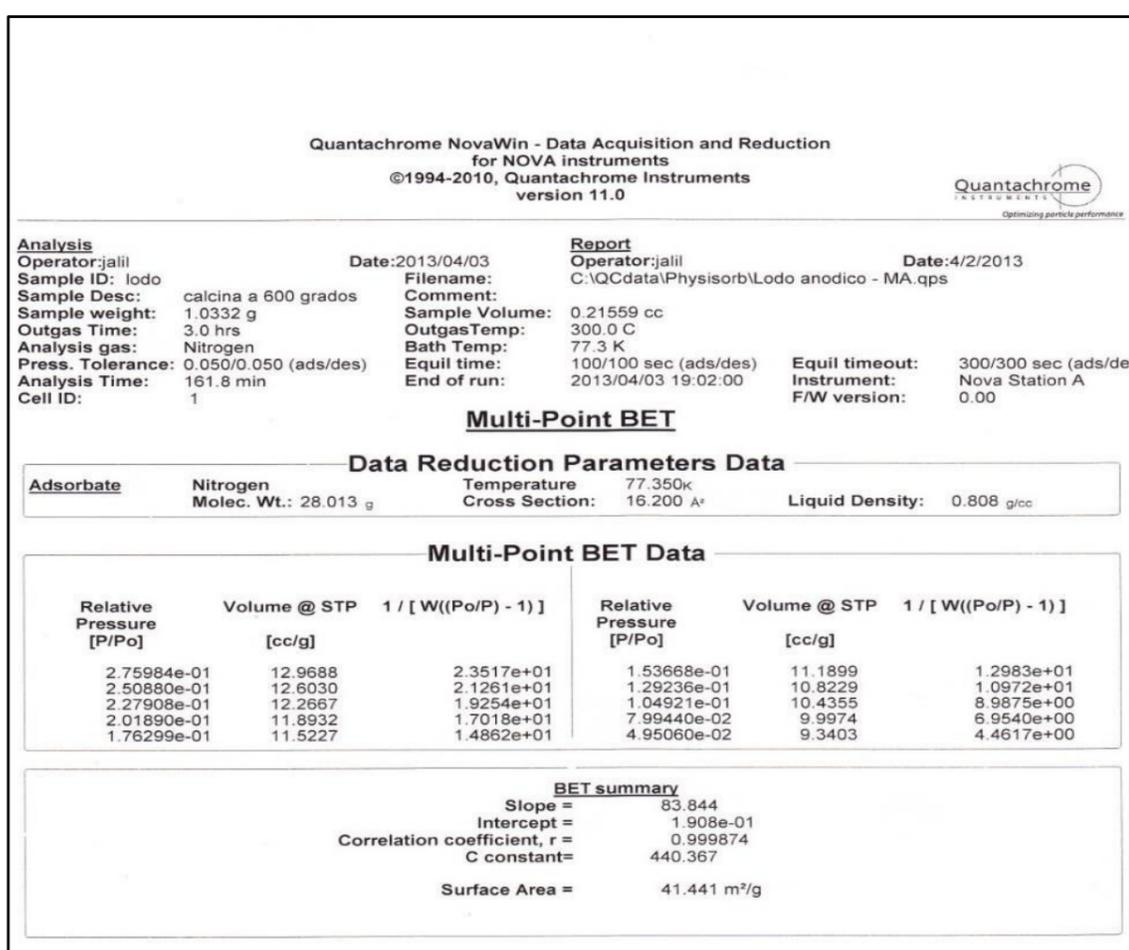


Figura AIII. 5. Análisis del área superficial de los lodos calcinados a 600 °C por el método BET (proceso de desorción)

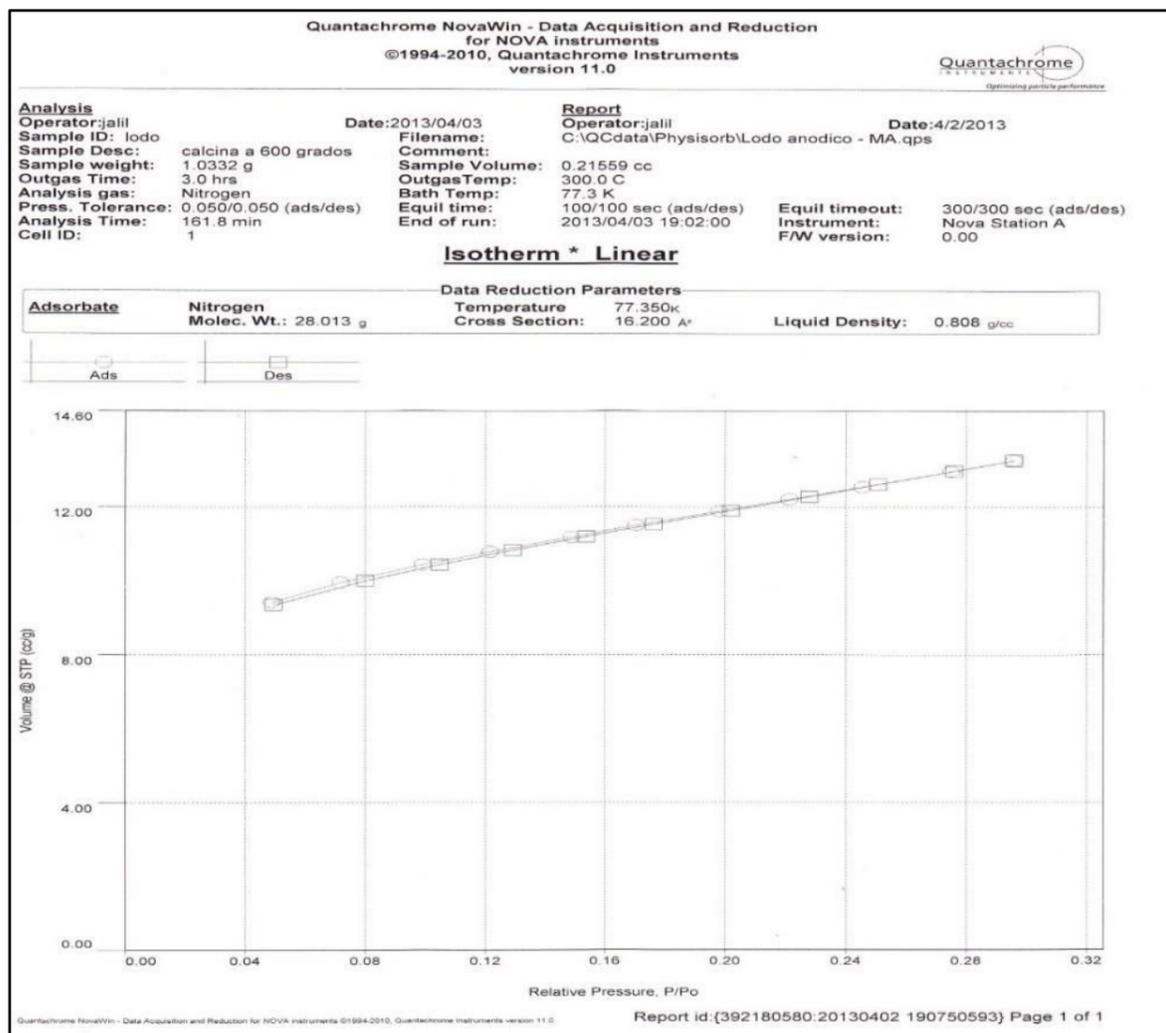


Figura AIII. 6. Isotherma de adsorción y desorción de los lodos calcinados a 600 °C

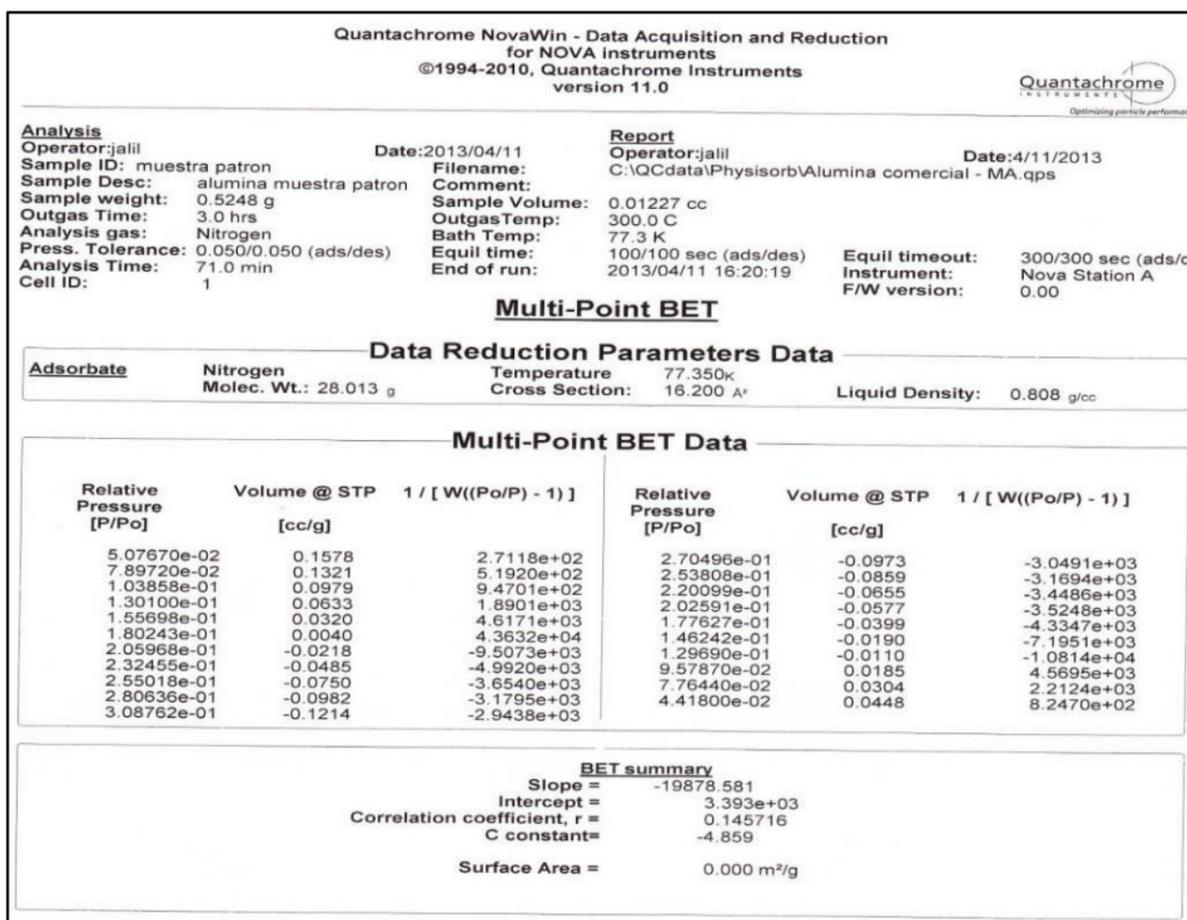


Figura AIII. 7. Análisis del área superficial de los lodos calcinados a 200 °C por el método BET (proceso de adsorción)

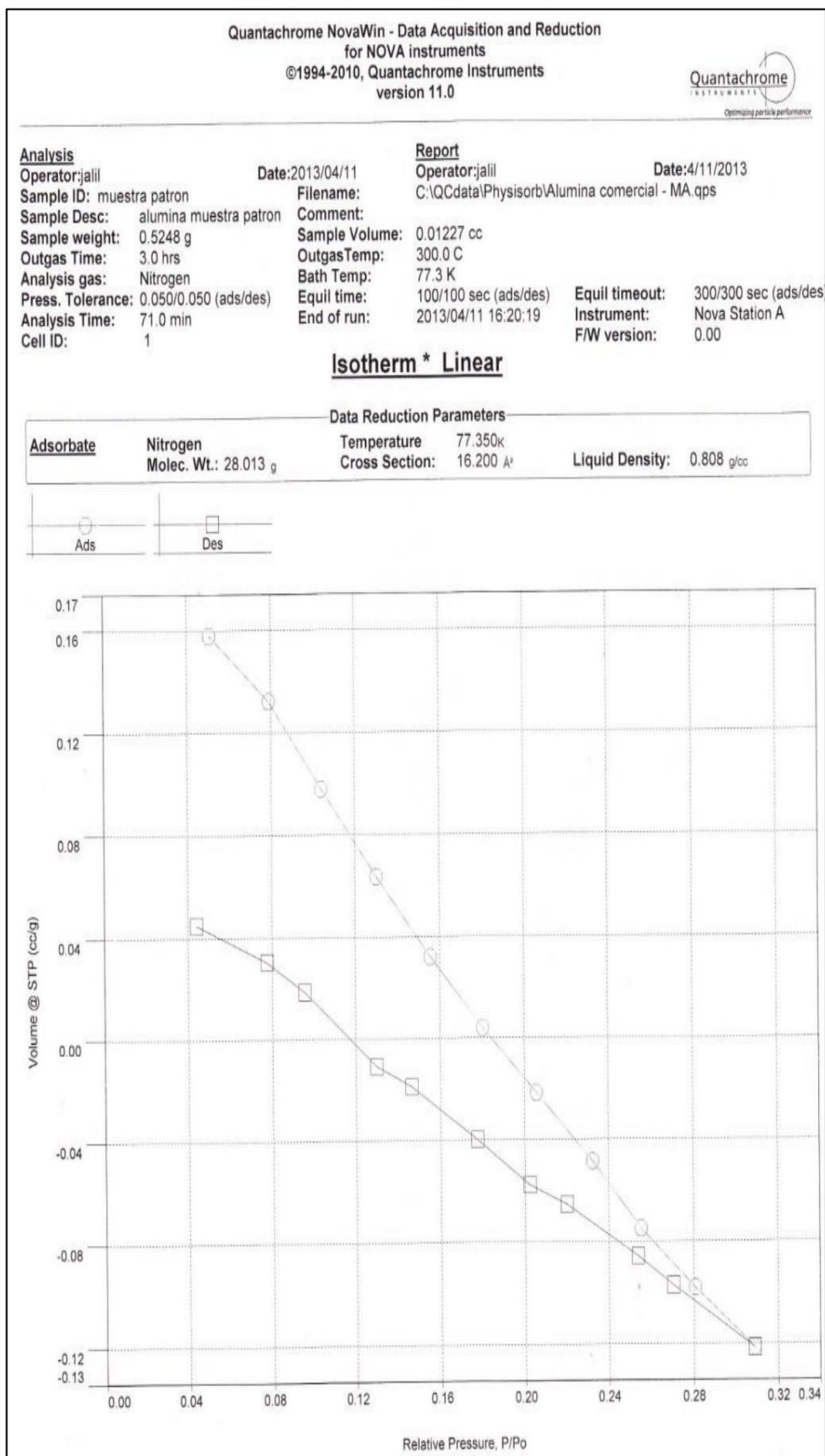


Figura AIII. 8. Isotherma de adsorción y desorción de los lodos calcinados a 1 200 °C

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 15

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Analizar el tamaño de partícula.

Peso de la muestra: 100 g

Tabla AIII. 1. Resultado del análisis granulométrico de los lodos calcinados a 1 200 °C

Malla #	Abertura (um)	Peso (g)	% Retenidos	% Retenidos acumulado	% Pasado acumulado
100	150	0,45	0,49	0,49	99,51
150	106	1,02	1,02	1,51	98,49
200	75	3,77	3,77	5,28	94,72
270	53	23,74	23,74	29,02	70,98
325	45	18,22	18,22	47,24	52,76
400	38	12,44	12,44	59,68	40,32
500	25	16,78	17,48	77,16	22,84
< 500	0	22,00	22,84	100,00	0,00

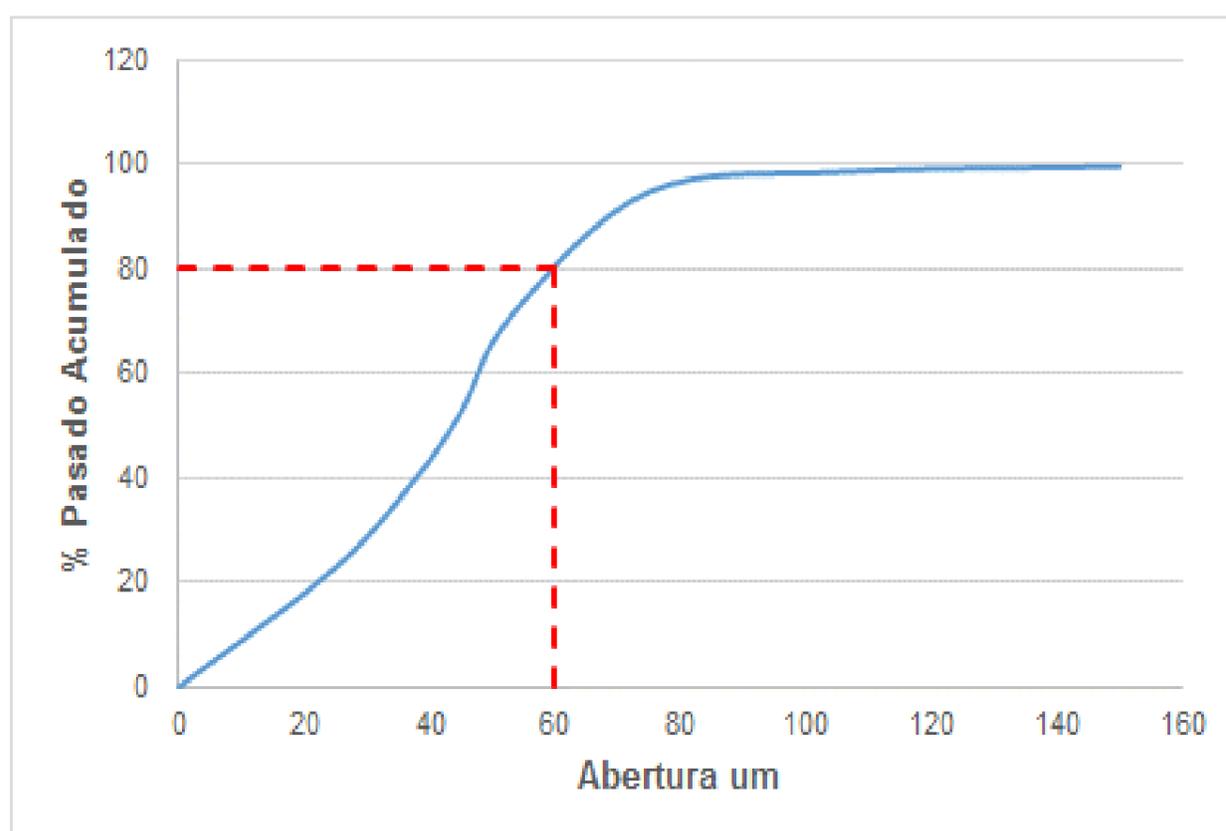


Figura AIII. 9. Porcentaje pasado acumulado vs tamaño de partícula

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 16

ALÚMINA COMERCIAL

Esta alúmina con cristales hexagonales es ampliamente utilizada en la industria cerámica, refractaria y abrasiva

 **Nippon Light Metal Company, Ltd.**

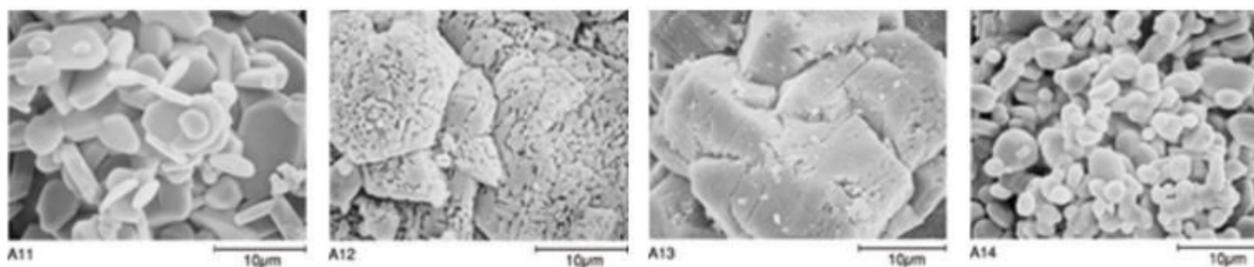


Tabla AIII. 2. Propiedades químicas y físicas de una alúmina comercia A21

ALUMINA	A21
Impurezas (%)	0,01
Na ₂ O (%)	0,37
SiO ₂ (%)	10-15
Fe ₂ O ₃ (%)	0,01
Al ₂ O ₃ (%)	86
Tamaño promedio de partícula (µm)	75
Tamaño de partícula α-alúmina (µm)	4-5
Area especifica superficial BET (m ² /g)	0,6
Densidad suelta (g/cm ³)	3,7
Densidad real (g/cm ³)	3,9

ANEXO IV
DISEÑO CONCEPTUAL DE LA PLANTA DE VALORIZACIÓN
DE LODOS GENERADOS EN EL TRATAMIENTO DE
EFLUENTES DEL ANODIZADO DE PIEZAS DE ALUMINIO

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA 17

Muestra: Lodos anódicos

Objetivo: Determinar el porcentaje de los compuestos que conforman los lodos anódicos. Base de cálculo: 100 g

A partir de los resultados obtenidos en el transcurso del desarrollo de esta investigación, se realizó el balance de masa de la planta de valorización de lodos generados en el tratamiento de efluentes del anodizado de piezas de aluminio. Para este cálculo se utiliza el análisis de espectrofotometría de atómica (Tabla 3.2.) al igual que el análisis mineralógico de lodos calcinados a 1 200 °C (Tabla 3.7). En la Tabla AIV.1, se muestra el porcentaje de los compuestos posibles en los lodos anódicos, que se detectaron en la Sección 3.4.2.

Tabla AIV. 1. Porcentaje de los compuestos posibles en los lodos anódicos

Compuestos	Formula química	Peso molecular (g/mol)	Porcentaje (%)
Hidróxido de aluminio (gibbsita)	$Al(OH)_3 \cdot 3H_2O$:	132	72,43
Sulfato de sodio	Na_2SO_4 :	142,04	2,7
Sulfato de calcio	$CaSO_4$:	136,14	0,14
Sulfato de aluminio	$Al_2(SO)_4$:	342,15	17,59
Oxido de silicio	SiO_2 :	60,08	5,89
Oxido magnesio	MgO	40,30	1,25

(*Perry's Chemical Engineers' Handbook, 2007)

A continuación se realiza un ejemplo de cálculo que se utiliza para todos los demás compuestos. Como base del cálculo se toma 100 g de lodo anódico seco.

- Cantidad de Magnesio en los lodos anódicos:

$$m_{Mg} = 100 \text{ g} \times X_i = 100 \text{ g} \times 0,8 \% = 0,8 \text{ g Mg}$$

$$m_{MgO} = 0,8 \text{ g Mg} \times \frac{1 \text{ mol MgO}}{1 \text{ mol Mg}} \times \frac{40,30 \text{ g MgO}}{1 \text{ mol MgO}} = 1,33 \text{ g MgO}$$

Este cálculo se realiza para cada uno de los elementos presente en los lodos anódicos.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 18

Datos meteorológicos de la Latacunga otorgados por la Dirección General de la Aviación Civil (DAC)

Tabla AIV. 2. Datos meteorológicos de la ciudad de la Latacunga del año 2013 (Dirección General de Aviación Civil DAC)

Meses	Temperatura media (°C)	Humedad relativa media (%)	Presión Media (hPa)	Presión de vapor media (hPa)	Viento	
					Dirección	Velocidad (nudos)
Enero	15	71	899,5	12,0	S	12,8
Febrero	14	72	780	12,2	S	12,3
Marzo	14,1	80	730,8	12,3	S	11,3
Abril	13,3	81	730,6	12,1	S	9,5
Mayo	13,1	83	730,8	12,4	S	8,6
Junio	12,6	78	730,6	11,1	S	11
Julio	11,8	79	730,8	10,8	S	11,8
Agosto	12,2	78	730,4	10,8	S	11,2
Septiembre	12,6	76	730,6	10,7	S	11,2
Octubre	13,4	77	730	11,4	S	9,5
Noviembre	13,7	74	729,1	11,1	S	9,4
Diciembre	13,5	78	729,5	11,8	S	12,3
Promedio	13,3	77	748,56	11,7	-----	10,9

Los datos de la radiación solar se recolectaron de la página de la Escuela Politécnica Nacional

<http://leae.epn.edu.ec/reporteDiario.aspx>

Tabla AIV. 3. Datos de energía solar del Centro de Información de Energías Alternativas y Eficiente Energética del año 2013

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL INGENIERIA MECANICA Centro de Información de Energías Alternativas y Eficiente Energética (Reporte de Radiación Solar)	
Fecha	Energía Solar (J/m ²) mensual
Enero	601399,32
Febrero	435235,73
Marzo	575170,16
Abril	533010,68
Junio	615921,41
Julio	670707,13
Agosto	671069,15
Septiembre	561030,05
Promedio	582942,95

Máxima Radiación Solar máxima: Máximo valor diario de las máximas radiaciones solares registradas en cada minuto.

Mínima Radiación Solar máxima: Mínimo valor diario de las máximas radiaciones solares registradas en cada minuto.

Energía: Energía total incidente diaria por unidad de área calculada en base a los promedios de las radiaciones solares en cada minuto

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 19

Dimensiones del secador invernadero

El diseño de estos invernaderos se los realiza en base de las 5 000 kg/día de lodos anódicos (LA) húmedos generados. El sistema de operación consiste en la recolección diaria de estos lodos durante una semana, entonces la masa recolectada será:

$$\dot{m}_{LA\ 80\ \%} = 5000 \left[\frac{kg}{dia} \right] * 7[dias] = 35000 \left[\frac{kg}{semana} \right]$$

Se calcula el volumen que ocupa esta cantidad de materia, con la densidad aparente (80 % humedad).

$$V_{LA\ 80\ \%} = \frac{m_{LA\ 80\ \%}}{\rho_{80\ \%}} = \frac{35\ 000[kg]}{413,8 \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = 84,58 [m^3]$$

Tanto el ancho (11 m) y el largo (40 m) son datos iterativos que se obtuvieron tomando en cuenta la altura de cama lodo anódico

$$h_{cama} = \frac{V_{lodo}}{largo * ancho} = \frac{84,58[m^3]}{11 * 40[m^2]} = 0,19[m]$$

Tanto el ancho (11 m) y el largo (40 m) son datos iterativos que se obtuvo tomando en cuenta la altura de cama lodo anódico

$$h_{cama} = \frac{V_{LA}}{largo (L) * ancho(A)} = \frac{84,58[m^3]}{11 * 40[m^2]} = 0,19[m]$$

La altura del invernadero se determinó considerando la altura de la retroexcavadora que ingresará para realizar los procesos de agitación, carga y descarga de los lodos

El invernadero se construirá con la entrada de aire en dirección sur, ya que la dirección del viento en la Latacunga viene en esa dirección todo el año, como lo indica los datos meteorológicos (Tabla IV.3)

- Cálculo de los milímetros de agua evaporada al día con los datos mineralógicos tiempo de secado

Este cálculo se lo realiza para determinar cuántos milímetros de agua se evaporan a condiciones meteorológicas de Latacunga, para esto se aplica la Ecuación 2.7, que se muestra en la sección 2.4:

$$E = c(P_a - P)\left(1 + \frac{V}{16}\right)$$

$$E = 0,50(11,3 - 9,38)\left(1 + \frac{16,67}{16}\right)$$

$$E = 1,89 \text{ mm/día}$$

- Energía necesaria para la evaporación del agua contenida en los lodos anódicos.

Primero se obtuvo la masa de agua evaporada de los lodos anódicos al reducir la humedad del 80 % al 12 %. En la Figura AV.1 se muestra las condiciones.

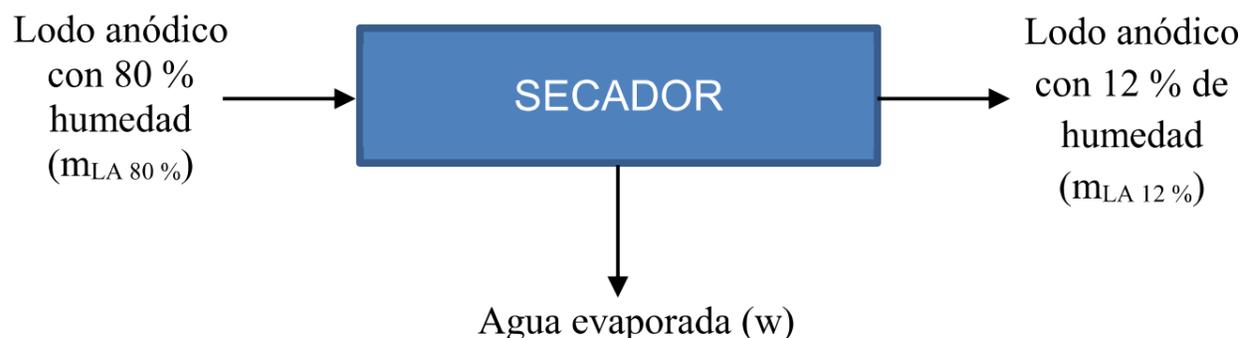


Figura AIV. 1. Balance de masa en el secador invernadero

$$m_w = \frac{m_{LA\ 80\ \%} \times 68\ \%}{1 - 12\ \%} = 26\ 950 \text{ kg fr agua evaporad}$$

$$m_{LA\ 12\ \%} = 8\ 050 \text{ kg de LA}$$

A partir del calor latente de evaporación del agua se determina la energía (E_{Lp}) necesaria para evaporar la cantidad de agua (w) contenida en los anódicos. Con la Ecuación AIV.1 se calcula este parámetro.

$$E_{Lp} = \text{Calor latente de evaporación } (Lp) \times w \quad [\text{AIV. 1}]$$

$$E_{Lp} = 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \times 26\,950 \text{ kg} = 60\,826\,150 \text{ kJ}$$

La energía disponible se calcula con el dato de la energía de radiación (Tabla IV.2) y con el área de invernadero. Con la Ecuación AIV.2 se realiza el cálculo de este parámetro.

$$E_{RS} = \text{Energía de radiación} \times A_{\text{invernadero}} \quad [\text{AIV. 2}]$$

$$E_{RS} = 435\,235,73 \frac{\text{kJ}}{\text{m}^2} \times 440 \text{ m}^2 = 191\,503\,721,20 \text{ kJ}$$

Parkson Thermo System (2012), proporcionó el dato de energía necesaria para evaporar agua en un invernadero solar, que es de 126 000 kJ/t agua evaporada, con el cual se calcula la energía para evaporar el agua de los lodos anódicos.

$$E_{PTS} = E_{EVRTS} \times w = 126\,000 \frac{\text{kJ}}{\text{t}} \times 26\,950 \text{ kg} \frac{1 \text{ t}}{1000 \text{ kg}} = 3\,395\,700 \text{ kJ}$$

- Cálculo del volumen de agua que se evapora a condiciones meteorológicas de Latacunga y volumen de agua que se debe remover de los anódicos

Con el valor de la evaporación E (1,89 mm/día) se calcula el volumen (Ecuación AIV.3) que se puede evaporar de agua a condiciones meteorológicas de la Latacunga, con las dimensiones del invernadero en 27 días de secado.

$$V_{CN} = E \times L \times A \times h_{\text{cama}} \quad [\text{AIV. 3}]$$

$$V_{CN} = 1,89 \frac{\text{mm}}{\text{día}} * 27 \text{ día} * 11 \text{ m} * 40 \text{ m} \frac{1 \text{ m}}{1\,000 \text{ mm}}$$

$$V_{\text{evap}} = 22,45 \text{ m}^3$$

Mientras que el volumen que se debe evaporar de los lodos anódicos será el siguiente:

$$V_w = \frac{m_{LA\ 12\%}}{\rho_{agua}} = \frac{26\ 950\ kg}{1000\ \frac{kg}{m^3}} = 26,95\ m^3$$

- Conformación del piso que soportara el del lodo y maquinaria

El piso que se muestra en la Figura AV.2, corresponde a un tipo industrial. Está formado primero de una capa de piedra y arena, los diámetros aproximados de la piedra serán de 30 cm. Esta permitirá soportar el peso de la maquinaria, al constituirse una parte importante de la cimentación.

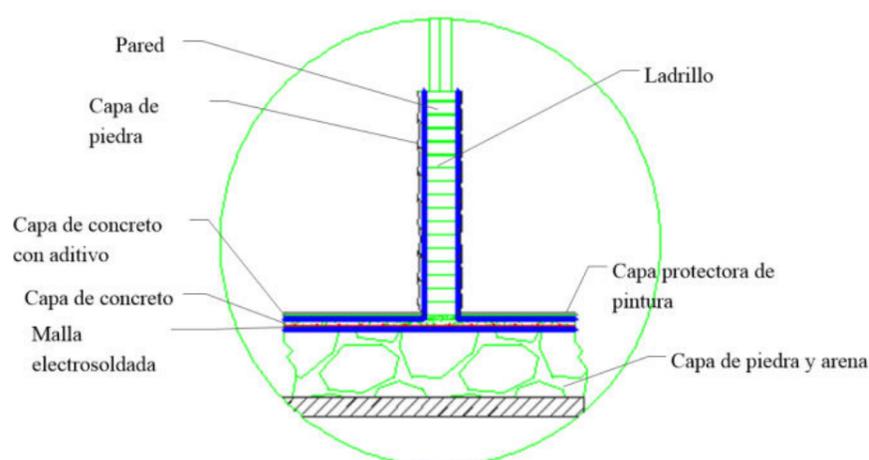


Figura AIV. 2. Materiales que conforman el piso y la pared de los invernaderos

Luego viene una capa plástica de contra piso, para evitar que el agua hacienda por capilaridad y proteger a las paredes y al hormigón armado. La siguiente capa corresponde a una hormigón armado con malla electrosoldada de diámetro 5 mm y 15 cm de separación, que brinde resistencia a la tracción. A continuación se coloca otra capa plástica de contra piso para evitar que cualquier filtración pase, esta capa debe ir desde las paredes con el objetivo de impermeabilizar un invernadero respecto a su adyacente. La capa de mortero-cemento con aditivo (humo de sílice) de 2 cm, brinda protección al deterioro por ataque ácidos. Finalmente la superficie se protege con una capa de pintura resistente al ataque de los ácidos presente en los lodos, de preferencia debe ser de color negro para captar mayor radiación.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 20

Dimensionamiento de la tolva de almacenamiento para el lodo seco al 12 % de humedad

El tamaño va de acuerdo a la capacidad de lodo seco que se obtiene al mes de los cuatro secadores tipo invernaderos. Además con la densidad aparente del lodo seco (12% de humedad) que corresponde a 700 kg/m³, se determina el volumen de la tolva.

$$m_{4LA\ 12\ \%} = m_{LA\ 12\ \%} \times 4 = 8\ 000\ kg \times 4 = 32\ 000\ kg$$

$$V_{tolva} = \frac{m_{4LA\ 12\ \%}}{\rho_{aparente} \left[\frac{kg}{m^3} \right]} = \frac{32\ 000\ kg}{700 \left[\frac{kg}{m^3} \right]}$$

$$V_{tolva} = 45,71 [m^3]$$

Con factor de seguridad de 1,5 el volumen es el siguiente:

$$V_{tolva} = 45,71m^3 * 1,5$$

$$V_{tolva} = 68,57 [m^3]$$

Con este volumen se busca en catálogos la tolva requerida. Además, para la selección en catálogo se toma la relación de los silos esbeltos donde se cumple que $h/D > 1$.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA No 21

Dimensionamiento de horno de calcinación para los lodos anódicos y balance energético

Después del secado se tiene la calcinación de los lodos anódicos, para esto se tiene el siguiente balance de masa. Se utiliza dos hornos del tipo que se indica en el Anexo VI.

Cada horno procesara 500 kg ($m_{\text{calcinación}}$) de lodo seco y a partir de este valor se determina las dimensiones de la cámara, para lo cual se utiliza la densidad aparente al 12 % de humedad.

$$V_{\text{Cámara}} = \frac{m_{\text{calcinación}}}{\rho_{12\%}} = \frac{500 \text{ kg}}{700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0,71 \text{ m}^3$$

Entonces con el valor de 0,71 m³, se buscó en catálogos y se encontró uno de 1,13 m³, como se detalla en Anexo VI.

Para determinar el tiempo de calentamiento del horno se utilizó la potencia del horno seleccionado en catalogo que es de 120 kW. Además, se calculó el calor necesario para calentar el lodo anódico desde 13,3 °C hasta 1 200 °C. El calor específico fue calculado de los compuestos de mayor porcentaje en los lodos anódicos, como son el hidróxido de aluminio y sulfato de aluminio (Tabla AV.1). En la Tabla AIV.4 se muestra los calores específicos para cada uno de estos compuestos.

Tabla AIV. 4. Calor específico de los principales componentes del lodo anódico

Calor específico	Calor específico J/(mol °K)	Peso molecular (g/mol)	Porcentaje en los lodos anódicos (%)
Hidróxido de aluminio	91,7	78,00	72.43
Sulfato de aluminio	85,6	342,15	17,59

(*Perry's Chemical Engineers' Handbook, 2007)

Con la Ecuación AIV.5 se calcula el peso molecular de la mezcla y con este valor se determina el calor específico de la mezcla.

$$PM_{mezcla} = X_{Al(OH)_3} \times PM_{Al(OH)_3} + X_{Al_2(SO_4)_3} \times PM_{Al_2(SO_4)_3} \quad [\text{AIV. 4}]$$

$$Cp_{LA} = \frac{Cp_{mezcla}}{PM_{mezcla}} = \frac{83,95 \frac{J}{mol \cdot ^\circ K}}{116,68 \frac{g}{mol}} = 0,72 \frac{J}{g \cdot ^\circ K}$$

A partir de la Ecuación AIV.6 se encuentra la energía de calentamiento

$$E_{Calentamiento} = m_{calcinación} Cp_{LA} \times (T_{calcinación} - T_{ambiente}) \quad [\text{AIV. 5}]$$

$$E_{Calentamiento} = 427\,320 \text{ kJ}$$

$$t_{calentamiento\ masa} = \frac{E_{calentamiento}}{P_{potencia\ de\ horno}} \quad [\text{AIV. 6}]$$

$$t_{calentamiento\ masa} = 68,40 \text{ min}$$

Gasto de energía para el procesamiento mensual de los lodos anódicos

El Costo de energía eléctrica para la provincia de Cotopaxi se muestra en la Tabla AIV.5. Con este valor se calculó el gasto energético mensual para el proceso de calcinación de los lodos anódicos

Tabla AIV. 5. Costo de la energía eléctrica en Latacunga

Categoría	Costo de la Energía eléctrica (\$/kw h)
Nivel tensión industriales	0,075

(*www.elepcosa.com)

El costo energético para el procesamiento de la calcinación de los lodos anódicos se realiza con los datos de la Tabla AIV.5 y Tabla AIV.6.

Tabla AIV. 6. Parámetros para el cálculo el gasto energético mensual en el proceso de calcinación

PROCESAMIENTO MENSUAL		
Parámetros	Valor	Unidad
Carga de lodo con humedad del 12 %	32 000	kg
Numero de hornos	2	unidades
Tiempo de calentamiento del horno	120	min
Porcentaje de pérdida de energía en el horno	10	%
Número de Bach por mes	64	unidades
Número de Bach para cada horno por mes	32	unidades

Primero se calculó la energía de calentamiento a partir de la potencia del horno y el tiempo de calentamiento que se determinó con el análisis termogravimétrico. El tiempo que se determinó en este análisis fue de 120 min

$$E_{calentamientoH} = P_{Potencia\ de\ horno} \times t_{calentamientoH} = 120 \frac{kJ}{s} \times 7\ 200\ s = 1\ 728\ 000\ kJ$$

- Luego la energía de calentamiento de la masa a calcinar, para lo cual se toma en cuenta los 64 batch que se realiza al mes. El número de batch se detalla en el Anexo VI.

$$E_{calentamiento\ mesual} = E_{calentamiento} \times 64 = 427\ 320\ kJ \times 64 = 27\ 348\ 480\ kJ$$

- Se considera 10 % de pérdidas en el horno. Se toma el tiempo de batch, que viene de la suma del tiempo de calentamiento de la masa, tiempo de carga y descarga y tiempo de calcinación

Para el tiempo de carga y descarga se asume 60 min, mientras que el tiempo de calcinación se determino es la investigación que fue 120 min.

$$t_{bach} = t_{calentamiento\ masa} + t_{carga\ y\ descarga} + t_{calcinación}$$

$$t_{bach} = 68,40\ min + 60\ min + 120\ min = 248,4\ min \approx 4\ horas$$

- Perdida de energía del 10 %

$$E_{pérdida} = 10\ \% \times P_{potencia\ horno} \times t_{bach} \times \#\ bach$$

$$E_{pérdida} = 10\ \% \times 120\ \frac{kJ}{s} \times 4\ h \times 64 \times \frac{3600\ s}{1\ h} = 11\ 059\ 200\ kJ$$

- Energía total requerida por los hornos

$$E_{total} = E_{calentamiento\ H} + E_{calentamiento\ mensual} + E_{pérdida}$$

$$E_{total} = 1\ 728\ 000\ kJ + 27\ 348\ 480\ kJ + 11\ 059\ 200\ kJ = 41\ 829\ 509\ kJ$$

Tabla AIV. 7. Resumen de los cálculos de energía para la calcinación de los lodos anódico y condiciones de operación

Parámetro	Valor	Unidad
Energía de calentamiento de la masa	27 348 480	kJ
Energía de calentamiento de hornos	1 728 000	kJ
Energía de perdida por operación de hornos	11 059 200	kJ
Energía total requerida para operación de hornos al mes	41 829 509	kJ
Tiempo de total de procesamiento del batch	4,0	horas

- Costo de energía mensual para la calcinación de los lodos anódicos

El cálculo se realiza con la energía total requerida para la operación de los hornos eléctricos y con el costo de la energía eléctrica (Tabla AV.3) en Latacunga

$$Costo_{mensual} = \frac{E_{total}}{3\ 600\ s} \times Costo_{energía\ eléctrica} = 41\ 829\ 509\ \frac{kJ\ h}{3\ 600\ s} \times \frac{\$ 0,075}{kw\ h}$$

$$Costo_{mensual} = \$ 871,45$$

En la Tabla AIV.8 y Tabla AIV.9 se muestra los costos energéticos mensuales para la calcinación y el costo total respectivamente.

Tabla AIV. 8. Costo de energía para la calcinación de los lodos anódicos

Energía total requerida para operación de hornos al mes	kWh	11 619,31
Costo de operación de hornos al mes	\$	871,45

Tabla AIV. 9. Costo total de los dos hornos para el procesamiento de calcinación

Costo de hornos (según cotización 2014)	\$/unidad	15 756,68
Costo total de hornos	\$	31 513,36

ANEXO V
SISTEMA DE PROCESAMIENTO (ETAPA CALCINACIÓN)

Tabla AV. 1. Sistema de procesamiento para el proceso de calcinación (Horno 1)

Día	Detalle	Hora inicio	Duración (h)	Hora finalización	Batch proc
1	Calentamiento del horno 1	6,0	2,0	8,0	
	Carga de horno	8,0	0,5	8,5	1
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	8,5	3,0	11,5	
	Descarga de producto	11,5	0,5	12,0	
	Carga de horno	12,0	0,5	12,5	3
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	12,5	3,0	15,5	
	Descarga de producto	15,5	0,5	16,0	
	Carga de horno	16,0	0,5	16,5	5
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	16,5	3,0	19,5	
	Descarga de producto	19,5	0,5	20,0	
	Carga de horno	20,0	0,5	20,5	7
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	20,5	3,0	23,5	
	Descarga de producto	23,5	0,5	0,0	
2	Carga de horno	0,0	0,5	0,5	9
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	0,5	3,0	3,5	
	Descarga de producto	3,5	0,5	4,0	
	Carga de horno	4,0	0,5	4,5	11
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	4,5	3,0	7,5	
	Descarga de producto	7,5	0,5	8,0	
	Carga de horno	8,0	0,5	8,5	13
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	8,5	3,0	11,5	
	Descarga de producto	11,5	0,5	12,0	
	Carga de horno	12,0	0,5	12,5	15
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	12,5	3,0	15,5	
	Descarga de producto	15,5	0,5	16,0	
	Carga de horno	16,0	0,5	16,5	17
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	16,5	3,0	19,5		
Descarga de producto	19,5	0,5	20,0		
Carga de horno	20,0	0,5	20,5	19	

	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	20,5	3,0	23,5	
	Descarga de producto	23,5	0,5	0,0	
3	Carga de horno	0,0	0,5	0,5	21
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	0,5	3,0	3,5	
	Descarga de producto	3,5	0,5	4,0	
	Carga de horno	4,0	0,5	4,5	23
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	4,5	3,0	7,5	
	Descarga de producto	7,5	0,5	8,0	25
	Carga de horno	8,0	0,5	8,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	8,5	3,0	11,5	27
	Descarga de producto	11,5	0,5	12,0	
	Carga de horno	12,0	0,5	12,5	29
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	12,5	3,0	15,5	
	Descarga de producto	15,5	0,5	16,0	31
	Carga de horno	16,0	0,5	16,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	16,5	3,0	19,5	33
	Descarga de producto	19,5	0,5	20,0	
	4	Carga de horno	20,0	0,5	20,5	35
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1		20,5	3,0	23,5	
Descarga de producto		23,5	0,5	0,0	
Carga de horno		0,0	0,5	0,5	37
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1		0,5	3,0	3,5	
Descarga de producto		3,5	0,5	4,0	39
Carga de horno		4,0	0,5	4,5	
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1		4,5	3,0	7,5	41
Descarga de producto		7,5	0,5	8,0	
Carga de horno		8,0	0,5	8,5	39
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1		8,5	3,0	11,5	
Descarga de producto		11,5	0,5	12,0	41
Carga de horno		12,0	0,5	12,5	
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1		12,5	3,0	15,5	41
Descarga de producto	15,5	0,5	16,0		
Carga de horno	16,0	0,5	16,5	41	
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	16,5	3,0	19,5		
Descarga de producto	19,5	0,5	20,0		

	Carga de horno	20,0	0,5	20,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	20,5	3,0	23,5	43
	Descarga de producto	23,5	0,5	0,0	
5	Carga de horno	0,0	0,5	0,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	0,5	3,0	3,5	45
	Descarga de producto	3,5	0,5	4,0	
	Carga de horno	4,0	0,5	4,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	4,5	3,0	7,5	47
	Descarga de producto	7,5	0,5	8,0	
	Carga de horno	8,0	0,5	8,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	8,5	3,0	11,5	49
	Descarga de producto	11,5	0,5	12,0	
	Carga de horno	12,0	0,5	12,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	12,5	3,0	15,5	51
	Descarga de producto	15,5	0,5	16,0	
	Carga de horno	16,0	0,5	16,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	16,5	3,0	19,5	53
	Descarga de producto	19,5	0,5	20,0	
Carga de horno	20,0	0,5	20,5		
Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	20,5	3,0	23,5	55	
Descarga de producto	23,5	0,5	0,0		
6	Carga de horno	0,0	0,5	0,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	0,5	3,0	3,5	57
	Descarga de producto	3,5	0,5	4,0	
	Carga de horno	4,0	0,5	4,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	4,5	3,0	7,5	59
	Descarga de producto	7,5	0,5	8,0	
	Carga de horno	8,0	0,5	8,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	8,5	3,0	11,5	61
	Descarga de producto	11,5	0,5	12,0	
	Carga de horno	12,0	0,5	12,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 1	12,5	3,0	15,5	63
	Descarga de producto	15,5	0,5	16,0	

Tabla AV. 2. Sistema de procesamiento para el proceso de calcinación (Horno 2)

Día	Detalle	Hora inicio	Duración (h)	Hora finalización	Batch proc
1	Calentamiento del horno 2	8,0	2,0	10,0	
	Carga de horno	10,0	0,5	10,5	2
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	10,5	3,0	13,5	
	Descarga de producto	13,5	0,5	14,0	
	Carga de horno	14,0	0,5	14,5	4
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	14,5	3,0	17,5	
	Descarga de producto	17,5	0,5	18,0	
	Carga de horno	18,0	0,5	18,5	6
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	18,5	3,0	21,5	
	Descarga de producto	21,5	0,5	22,0	
	Carga de horno	22,0	0,5	22,5	8
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	22,5	3,0	1,5	
	Descarga de producto	1,5	0,5	2,0	
2	Carga de horno	2,0	0,5	2,5	10
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	2,5	3,0	5,5	
	Descarga de producto	5,5	0,5	6,0	
	Carga de horno	6,0	0,5	6,5	12
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	6,5	3,0	9,5	
	Descarga de producto	9,5	0,5	10,0	
	Carga de horno	10,0	0,5	10,5	14
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	10,5	3,0	13,5	
	Descarga de producto	13,5	0,5	14,0	
	Carga de horno	14,0	0,5	14,5	16

	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	14,5	3,0	17,5	
	Descarga de producto	17,5	0,5	18,0	
	Carga de horno	18,0	0,5	18,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	18,5	3,0	21,5	18
	Descarga de producto	21,5	0,5	22,0	
	Carga de horno	22,0	0,5	22,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	22,5	3,0	1,5	20
3	Descarga de producto	1,5	0,5	2,0	
	Carga de horno	2,0	0,5	2,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	2,5	3,0	5,5	22
	Descarga de producto	5,5	0,5	6,0	
	Carga de horno	6,0	0,5	6,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	6,5	3,0	9,5	24
	Descarga de producto	9,5	0,5	10,0	
	Carga de horno	10,0	0,5	10,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	10,5	3,0	13,5	26
	Descarga de producto	13,5	0,5	14,0	
	Carga de horno	14,0	0,5	14,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	14,5	3,0	17,5	28
	Descarga de producto	17,5	0,5	18,0	
	Carga de horno	18,0	0,5	18,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	18,5	3,0	21,5	30
	Descarga de producto	21,5	0,5	22,0	
	Carga de horno	22,0	0,5	22,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	22,5	3,0	1,5	32
4	Descarga de producto	1,5	0,5	2,0	

	Carga de horno	2,0	0,5	2,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	2,5	3,0	5,5	34
	Descarga de producto	5,5	0,5	6,0	
	Carga de horno	6,0	0,5	6,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	6,5	3,0	9,5	36
	Descarga de producto	9,5	0,5	10,0	
	Carga de horno	10,0	0,5	10,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	10,5	3,0	13,5	38
	Descarga de producto	13,5	0,5	14,0	
	Carga de horno	14,0	0,5	14,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	14,5	3,0	17,5	40
	Descarga de producto	17,5	0,5	18,0	
	Carga de horno	18,0	0,5	18,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	18,5	3,0	21,5	42
	Descarga de producto	21,5	0,5	22,0	
	Carga de horno	22,0	0,5	22,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	22,5	3,0	1,5	44
5	Descarga de producto	1,5	0,5	2,0	
	Carga de horno	2,0	0,5	2,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	2,5	3,0	5,5	46
	Descarga de producto	5,5	0,5	6,0	
	Carga de horno	6,0	0,5	6,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	6,5	3,0	9,5	48
	Descarga de producto	9,5	0,5	10,0	
	Carga de horno	10,0	0,5	10,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	10,5	3,0	13,5	50

	Descarga de producto	13,5	0,5	14,0	
	Carga de horno	14,0	0,5	14,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	14,5	3,0	17,5	52
	Descarga de producto	17,5	0,5	18,0	
	Carga de horno	18,0	0,5	18,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	18,5	3,0	21,5	54
	Descarga de producto	21,5	0,5	22,0	
	Carga de horno	22,0	0,5	22,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	22,5	3,0	1,5	56
6	Descarga de producto	1,5	0,5	2,0	
	Carga de horno	2,0	0,5	2,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	2,5	3,0	5,5	58
	Descarga de producto	5,5	0,5	6,0	
	Carga de horno	6,0	0,5	6,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	6,5	3,0	9,5	60
	Descarga de producto	9,5	0,5	10,0	
	Carga de horno	10,0	0,5	10,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	10,5	3,0	13,5	62
	Descarga de producto	13,5	0,5	14,0	
	Carga de horno	14,0	0,5	14,5	
	Calentamiento de masa y calcinación en horno 2	14,5	3,0	17,5	64
	Descarga de producto	17,5	0,5	18,0	
	Apagado de hornos y limpieza	18,0	4,0	22,0	

ANEXO VI
ANÁLISIS ECONÓMICO PRELIMINAR DEL PROYECTO DE
VALORACIONE DE LOS ANODICOS

Tabla VI. 1. Parámetros para realizar el análisis del proyecto

Parámetros	Valor	Unidad
Aportación de socios	50 000,00	\$
Aporte patronal al IESS	11,15	% de valor sueldo o salario
Costo de construcción de bodegas y galpones por m ²	80,00	\$/m ²
Costo de construcción de oficinas por m ²	240,00	\$/m ²
Impuesto a la renta sobre utilidades netas	22	%
Interés bancario por anualidad	11,38	%
Mantenimiento de maquinaria y equipos	2	%
Amortización de edificios	10	años
Amortización de maquinaria y equipo	10	años
Amortización de muebles y equipo de oficina	5	años
Amortización de equipo de computación	3	años
Amortización de otros activos	5	años

Tabla VI. 2. Consumo de energía mensual para la planta de producción de corindón

SECADOR INVERNADERO				
Equipo	Consumo de energía (kwh/t agua)	Agua evaporada (toneladas/mes)	Numero de invernaderos	Energía (kw h) al mes
Secador Invernadero	20	27,06	4	2 164,40
RESTO DE EQUIPOS				
Equipo	Consumo de energía	Tiempo de operación (días/mes)	Horas/día	Energía (kw h) al mes
Banda transportadora	2,21	1	12	26,48
Hornos de calcinación (datos del balance energético de los hornos Tabla AV.6)				11 619,31
Molino de rodillo	0,75	6	24	108,00
Lámparas	0,25	4	24	24,00
Oficinas	0,62	30	12	223,20
TOTAL				14 164,82

Tabla VI.3. Nómina de Administración para la producción de corindón

Salario Mensual individual	Horas extras	Salario Mensual individual (\$)	Horas extras (\$)	Total ingreso (\$)	Vacaciones (\$)	13avo (\$)	14avo (\$)	Fondo de Reserva (\$)	Total de beneficios sociales (\$)	Aporte Patronal de 11.15% al IESS (\$)	Total mensual (\$)	Total anual (\$)
Chofer		0,00	0,00	0,00	0,00	\$0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Contadora	1	340,00	0,00	340,00	14,17	28,33	28,33	28,33	99,17	41,31	480,48	5.765,72
Administrador	1	1.000,00	0,00	1 000,00	41,67	83,33	28,33	83,33	236,67	121,50	1 358,17	16 298,00
Secretaria	1	340,00	0,00	340,00	14,17	28,33	28,33	28,33	99,17	41,31	480,48	5 765,72
Guardia	1	340,00	0,00	340,00	14,17	28,33	28,33	28,33	99,17	41,31	480,48	5 765,72
TOTAL											2 799,60	33. 95,16

Tabla VI.4. Nómina de producción para la generación de corindón

Salario Mensual individual	Horas extras	Salario Mensual individual (\$)	Horas extras (\$)	Total ingreso (\$)	Vacaciones (\$)	13avo (\$)	14avo (\$)	Fondo de Reserva (\$)	Total de beneficios sociales (\$)	Aporte Patronal de 12.15% al IESS (\$)	Total mensual (\$)	Total anual (\$)
Chofer		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Contadora	1	340,00	0,00	340,00	14,17	28,33	28,33	28,33	99,17	41,31	480,48	5.765,72
Administrador	1	1.000,00	0,00	1 000,00	41,67	83,33	28,33	83,33	236,67	121,50	1 358,17	16 298,00
Secretaria	1	340,00	0,00	340,00	14,17	28,33	28,33	28,33	99,17	41,31	480,48	5 765,72
Guardia	1	340,00	0,00	340,00	14,17	28,33	28,33	28,33	99,17	41,31	480,48	5 765,72
TOTAL											2 799,60	33. 95,16

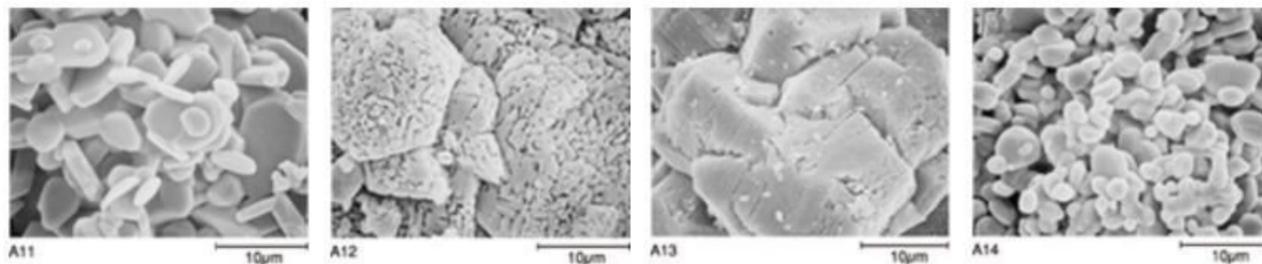
Tabla VI. 5. Flujo de caja del proyecto de valoración de los lodos anódicos

Designación	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3
Aportación de socios	50 000,00			
Ventas		249 600,00	249 600,00	249 600,00
(-) Costo de producción		110 825,16	110 825,16	110 825,16
(-) Gasto de venta				
(-) Gasto de administración		0,00	0,00	0,00
Flujo bruto		138 774,84	138 774,84	138 774,84
Dividendo de financiamiento	-229 451,43	40 327,08	40 327,08	40 327,08
Flujo antes de impuestos		98 447,76	98 447,76	98 447,76
(-) Impuesto a la renta		21 658,51	21 658,51	21 658,51
Flujo después de impuestos		76 789,25	76 789,25	76 789,25
Flujo acumulativo		-202 662,18	-125 872,92	-49 083,67
Inversión Total	-279 451,43			
Designación	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
Aportación de socios				
Ventas	249 600,00	249 600,00	249 600,00	249 600,00
(-) Costo de producción	110 825,16	110 825,16	110 825,16	110 825,16
(-) Gasto de venta			0,00	0,00
(-) Gasto de administración	0,00	0,00	0,00	0,00
Flujo bruto	138 774,84	138 774,84	138 774,84	138 774,84
Dividendo de financiamiento	40 327,08	40 327,08	40 327,08	40 327,08
Flujo antes de impuestos	98 447,76	98 447,76	98 447,76	98 447,76
(-) Impuesto a la renta	21 658,51	21 658,51	21 658,51	21 658,51
Flujo después de impuestos	76 789,25	76 789,25	76 789,25	76 789,25
Flujo acumulativo	27 705,58	104 494,84	181 284,09	258 073,34
Designación	Año 8	Año 9	Año 10	
Aportación de socios				
Ventas	249 600,00	249 600,00	249 600,00	
(-) Costo de producción	110 825,16	110 825,16	110 825,16	
(-) Gasto de venta	0,00	0,00	0,00	
(-) Gasto de administración	0,00	0,00	0,00	
Flujo bruto	138 774,84	138 774,84	138 774,84	
Dividendo de financiamiento	40 327,08	40 327,08	40 327,08	
Flujo antes de impuestos	98 447,76	98 447,76	98 447,76	
(-) Impuesto a la renta	21 658,51	21 658,51	21 658,51	
Flujo después de impuestos	76 789,25	76 789,25	76 789,25	
Flujo acumulativo	334 862,59	411 651,85	488 441,10	

ANEXO VII COTIZACIÓN DE LOS DIFERENTES EQUIPOS

FICHA TECNICA NO 22

Regular/Coarse Grain Alumina



Grade A11 is alumina with its crystals in a hexagonal platelet shape and is widely used as a raw material for refractories, abrasives, and ceramics. Coarse grain type Grade A21 that has excellent flowability and is less dusting is also available. Grade A12 is easy sintering alumina with smaller alpha alumina particles that leads to high fired density at relatively low temperatures. Grade A13 is an alumina with superfine alpha particle size and with reactivity. Because of superfine particle size and low abrasiveness it is suitable for material of the abrasive. Coarse grain type A23 is also available. Grade A14 has relatively spherical crystals resulting in high filling capability, and is used as a material for the refractories and ceramics.

Características y precio	Valor	Unidad
Impurezas	0,01	(%)
Na ₂ O (%)	0,37	(%)
SiO ₂ (%)	10-15	(%)
Fe ₂ O ₃ (%)	0,01	(%)
Al ₂ O ₃ (%)	86	(%)
Tamaño promedio de partícula	75	(µm)
Tamaño de partícula α-alúmina	4-5	(µm)
Área específica superficial BET	0,6	(m ² /g)
Densidad suelta	3,7	(g/cm ³)
Densidad real	3,9	(g/cm ³)
Precios	850-950	USD/kg

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA NO 23



RETROEXCAVADORA

Especificaciones

Modelo	430E IT
Precio	35 000 USD
Carga en la cuchara	3501 kg
Potencia bruta	75 kW
Potencia neta	97 hp
Peso máximo	10 700 kg
Altura total de transporte (brazo estándar)	3 866 mm
Altura total de transporte (brazo extensible)	3890 mm
Altura hasta la parte superior del techo	2 819 mm
Profundidad de excavación -estándar	4 689 mm
Profundidad de excavación-extendido	5 951 mm

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA NO 24

COTIZACION DE LOS CUATRO INVERNADEROS

ECUAMEDIOS

Policarbonato y Cubiertas Metálicas

Quito, 28 de junio del 2014

Señor ingeniero
Mauricio Acosta
Presente.-

De mi consideración:

Por medio de la presente me dirijo a usted, para poner a su consideración la cotización para la cubierta del invernadero según el plano enviado por usted, en la ciudad de Latacunga.

AREA A CUBRIR: 40m x 44m = 1760,00m²

LUGAR DE LA OBRA: Latacunga

ANTECEDENTES:

1. Se colocará en la cubierta policarbonato marca Sunlite, color cristal (transparente) de 8mm de espesor, material elaborado con tecnología israelita, con respaldo de la fábrica Palram, con 10 años de garantía. Este material tiene protección UV para los rayos solares, con propiedades de anti-condensación y aislante del ruido.
2. La estructura metálica de 4m de alto será soportada en postes redondos de 3". Cada cubierta que tendrá un radio de 2m, irá soportada con 11 cerchas cada 4,20m y la última a 2,10m, en cada nave, con tubos redondos de 3"x2mm, 2"x2mm y 1 1/4"x2mm. Los canales de agua de 20cm en los laterales y entre cada nave con boquetes de 4" cada 8,40m aproximadamente para que el cliente coloque los bajantes y la tubería para la evacuación del agua lluvia. El tiempo que llevará la construcción de la cubierta metálica es alrededor de un mes y medio.
3. Para la colocación de los postes que soportarán la estructura se necesita que el cliente coloque plintos de 40cm x 40cm x 50 cm de profundidad cada 4,20m en todo el perímetro del invernadero y a lo largo de las divisiones de cada nave.

*Dirección: Av. Maldonado y Prj. Flores esq. Frente a la fábrica de Plywood
Teléfonos: 2674-563 / cel. 0998316-408
Mail: ecuamedios@hotmail.com*



Policarbonato y Cubiertas Metálicas

4. De acuerdo al cálculo realizado, se necesitarán 76 planchas de policarbonato, las cuales las tendremos que importar de Estados Unidos, el tiempo que lleva la importación hasta que llegue a Quito, es alrededor de 2 meses y medio.

PROPUESTA ECONOMICA:

1. Costo de la estructura metálica:	\$46.400,00
2. Costo de la cubierta de policarbonato, Incluye accesorios	\$45.120,00
TOTAL COSTO DE LA OBRA	\$91.520,00
COSTO POR m2	\$52,00

Este precio ya incluye IVA.

GARANTIA:

1. Garantía de un año en pintura de la estructura metálica
2. Garantía del fabricante del policarbonato 10 años, salvo extremas condiciones climáticas.

Por la favorable atención que le brinde a la presente, y en espera de poderle servir, me despido.

Atentamente,

Ms. Katherine Escudero V.
REPRESENTANTE LEGAL
ECUAMEDIOS

Dirección: Av. Maldonado y Pzj. Flores esq. Frente a la fábrica de Plywood
Teléfonos: 2674-563 / cel. 0998316-408
Mail: ecuamedios@hotmail.com

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA NO 25

COTIZACION DE LA BANDA TRANSPORTADORA DE LOS LODOS ANIDICOS



Construcción de maquinaria, Consultoría, planos y proyectos de ingeniería.
Quito-Ecuador
Teléfono: (593-2) 3 227 697
Celular: (593-8) 4 768 414
E-mail: vini.lopezm@gmail.com

Quito, 1 de Octubre del 2014

COTIZACIÓN (C 02-10-00231)

Sr. Mauricio Acosta

Me dirijo a usted, para poner a su consideración la cotización de Banda transportadora para solidos disgregados, las características técnicas según sus requerimientos solicitados.

VALOR:

1. Silo de Almacenamiento:	\$ 25000,00
2. Costo de transporte:	\$ 300
TOTAL	\$ 25300,00 (IVA incluido)

GARANTIA:

1. Garantía un año en juntas soldadas

Forma de pago: 60% en calidad de anticipo y 40% contra entrega.

Tiempo de entrega: 30 días a partir de hecho efectivo el anticipo.

Lugar de entrega: Latacunga

Validez de la oferta: 15 días.

Atentamente,

Ing. Vinicio López

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA NO 26

COTIZACION DE LA TOLVA DE ALMACENAMIENTO



Construcción de maquinaria, Consultoría, planos y proyectos de ingeniería.
Quito-Ecuador
Teléfono: (593-2) 3 227 697
Celular: (593-8) 4 768 414
E-mail: vini.lopezm@gmail.com

Quito, 6 de Octubre del 2015

COTIZACIÓN (C 02-10-00105)

Sr. Mauricio Acosta

Me dirijo a usted, para poner a su consideración la cotización de una silo de almacenamiento, con las características técnicas que usted solicitó.

VALOR:

1. Silo de Almacenamiento:	\$ 7000,00
2. Costo de transporte:	\$ 200
TOTAL	\$ 7200,00 (IVA incluido)

GARANTIA:

1. Garantía un año en juntas soldadas

Forma de pago: 60% en calidad de anticipo y 40% contra entrega.

Tiempo de entrega: 30 días a partir de hecho efectivo el anticipo.

Lugar de entrega: Latacunga

Validez de la oferta: 15 días.

Atentamente,

Ing. Vinicio López

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA NO 27

DIMENSIONES Y COTIZACIÓN DEL LOS HORNOS DE CALCINACIÓN



Main specifications

Model	TZ-CBF-120 Car Bottom Furnace
Furnace construction	<ul style="list-style-type: none"> • High purity ceramic fibre insulation (energysaving 40% and weight lighter about 30% than old furnace). • Double layers steel casing with dual fan cooling, to ensure the surface of furnace below 50 °C
Chamber size	900mmX700mmX1800mm(Width*Height*Depth)
Working Temperature	0--1200°C
Heating Rate	0-10°C/min
Temperature Control	<ul style="list-style-type: none"> • PID automatic control and auto-tune function • 30 programmable segments for precise • Built in protection for over-heated and broken Thermal couple control. • Larger digital control panel for easy operation.
Heating Element	High quality SIC Heating Elements
Thermocouple	K type
Temperature accuracy	+/- 1 °C
Unite price	Ex works 15 756.68 USD
Freight	-----
Payment	T/T in advance
Delivery time	30 days

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA**

FICHA TECNICA NO 28

DIMENSIONES Y COTIZACION DE LA BANDEJA DE ENFRIAMIENTO



Construcción de maquinaria, Consultoría, planos y proyectos de ingeniería.
Quito-Ecuador
Teléfono: (593-2) 3 227 697
Celular: (593-8) 4 768 414
E-mail: vini.lopezm@gmail.com

Quito, 2 de Octubre del 2014

COTIZACIÓN (C 02-10-00101)

Sr. Mauricio Acosta

Me dirijo a usted, para poner a su consideración la cotización de una Bandeja de Enfriamiento, las características técnicas según sus requerimientos solicitados podrá encontrar en el plano adjunto.

VALOR:

1. Bandeja de Enfriamiento:	\$ 1.640,00
2. Costo de transporte:	\$ 200
TOTAL	\$ 1840,00 (IVA incluido)

GARANTIA:

1. Garantía un año en juntas soldadas

Forma de pago: 60% en calidad de anticipo y 40% contra entrega.

Tiempo de entrega: 30 días a partir de hecho efectivo el anticipo.

Lugar de entrega: Latacunga

Validez de la oferta: 15 días.

Atentamente,

Ing. Vinicio López

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA
EXTRACTIVA

FICHA TECNICA NO 29

DIMENSIONES Y COTIZACIÓN DEL MOLINO DE RODILLO



Construcción de maquinaria, Consultoría, planos y proyectos de ingeniería.
Quito-Ecuador
Teléfono: (593-2) 3 227 697
Celular: (593-8) 4 768 414
E-mail: vini.lopezm@gmail.com

Quito, 2 de Octubre del 2014

COTIZACIÓN (C 02-10-00100)

Sr. Mauricio Acosta

Me dirijo a usted, para poner a su consideración la cotización de un Molino de Rodillos para Arcillas, las características técnicas según sus requerimientos solicitados podrá encontrar en el plano adjunto.

VALOR:

1. Molino de rodillos para arcillas:	\$3.200,00
2. Costo de transporte:	\$250,00
TOTAL	\$3.450,00 (IVA incluido)

GARANTIA:

1. Garantía del fabricante del motor un año.
2. Garantía de rodillos un año.

Forma de pago: 60% en calidad de anticipo y 40% contra entrega.

Tiempo de entrega: 30 días a partir de hecho efectivo el anticipo.

Lugar de entrega: Latacunga

Validez de la oferta: 15 días.

Atentamente,

Ing. Vinicio López