

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INGENIERÍA DE ALIMENTOS



**PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN
DE LA ESCORIA SALINA DE LA INDUSTRIA
DE ALUMINIO EN EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO

GABRIELA ALEJANDRA RODRÍGUEZ PINEDA

PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERA QUÍMICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, AGOSTO DE 2012

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

ING. MARIO ROBERTO NIETO LOVO

SECRETARIA GENERAL :

DRA. ANA LETICIA ZA VALETA DE AMAYA

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

DIRECTOR :

INGA. TANIA TORRES RIVERA

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA E
INGENIERÍA DE ALIMENTOS

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERA QUÍMICO

Título :

**PROPUESTA DE ALTERNATIVAS DE GESTIÓN
DE LA ESCORIA SALINA DE LA INDUSTRIA
DE ALUMINIO EN EL SALVADOR**

Presentado por :

**PATRICIA IDALIA CHÉVEZ APARICIO
GABRIELA ALEJANDRA RODRÍGUEZ PINEDA**

Docentes Directores :

**INGA. M. Sc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA
INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA**

San Salvador, Agosto de 2012

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docentes Directores :

INGA. M. Sc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA

INGA. EUGENIA SALVADORA GAMERO DE AYALA

Agradecimientos

Agradecemos a Dios permitirnos culminar satisfactoriamente nuestros estudios universitarios en tan prestigiosa institución como lo es la **Universidad de El Salvador**, con orgullo honraremos todo lo aprendido durante estos años de estudio, poniendo en alto el nombre de nuestra alma mater.

A la **Escuela de Ingeniería Química**, y a sus **Docentes**, por formarnos como profesionales, transmitiendo sus conocimientos y experiencias, muchas gracias.

A nuestras **Asesoras, Ing. Delmy Rico Peña e Ing. Eugenia Gamero de Ayala**, por su dirección y apoyo durante el desarrollo de este trabajo de graduación, así como también durante todo el proceso de formación profesional, expresamos nuestro agradecimiento, admiración y respeto hacia ustedes como personas y profesionales.

A **A.P.K. Inc.** Empresa en la que trabajamos, expresamos nuestros más sinceros agradecimientos, por el apoyo y comprensión brindado durante estos años de estudio y para el desarrollo de nuestro trabajo de graduación.

A todas las personas que de alguna forma contribuyeron positivamente al desarrollo de nuestro trabajo de graduación y en nuestra formación como profesionales, muchas gracias.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primeramente a **JESÚS**, mi Dios, por regalarme la bendición de culminar mi carrera universitaria, por su amor, misericordia y fidelidad que puedo ver en cada momento de mi vida hasta el día de hoy, por ser propicio en cada situación y darme la sabiduría y las fuerzas para alcanzar esta meta, porque siempre me enviaste a alguien para hacerme sentir tu amor, confortarme y mostrarme que estabas conmigo siempre. Te amo Jesús, este logro es para ti.

A **Napoleón y Mary Chévez**, mis padres, gracias por su amor, oraciones, apoyo, guía, palabras de aliento, comprensión, consejos, sacrificios, por inculcar en mi valores, a soñar en grande y a luchar por alcanzar mis metas, no terminaría de enumerar todas las cosas por las cuales estoy infinitamente agradecida, ustedes son una prueba irrefutable del amor de Jesús hacia mi, los amo!

A **Fermín**, mi hermano, tu has estado conmigo toda mi vida, no hay otra persona con la que haya compartido mas momentos, le agradezco a Dios por tenerte a ti como hermano, y gracias a ti por traer a mi vida a María Fernanda, te amo!

A **Karla Melissa**, mi hermana, prima y amiga, por cada vez que me hiciste reír, por todas tus locuras, por estar siempre pendiente de mi, por preguntar cosas aun sabiendo que no vas a entender la respuesta, gracias! Te amo linda!

A **María Fernanda**, mi princesita bella, la luz de mis ojos, mi sobrinita. Faltan muchos años para que puedas leer esto, pero le doy gracias a Dios por tu vida, por permitirme conocer a través de ti el amor mas sincero. Disfruto con todo mi ser tu sonrisa, tus palabras mal dichas, tu voz, gracias por hacerme sentir tan especial y regalarme tantos momentos divertidos, te amo preciosa!.

A **Gabyta Rodríguez**, mi compañera y amiga, tu y tu familia son una gran bendición para mi, gracias por hacerme reír, siempre hacer que vea las cosas desde otro punto de vista, por escucharme, por tus consejos, solo Dios sabe cómo es que hacemos tan buen equipo, le doy gracias a Él por tu vida, por permitirme haber vivido todas estas experiencias contigo, momentos felices y no tan felices, gracias porque en todos has estado allí y me has hecho sacar lo mejor de mi, "amigo es siempre amigo, y en los tiempos difíciles es más que un hermano". Sigamos sumando experiencias a nuestra amistad! Te quiero mucho!

A **Neni, Denisse, Yid, Dani y Rodrigo** mis amigos, me siento muy orgullosa de haber estudiado con tan excelentes personas, gracias por su amistad sincera, por todas las experiencias vividas, desveladas, risas, aflicciones, triunfos, decepciones, locuras, gracias a ustedes todos estos años han tenido un mejor sentido, Dios es bueno, los puso en mi camino. No dudo que son grandes profesionales, los admiro y los quiero mucho!

A **Jorge y Maritza Rodríguez**, Ingenieros! Toda mi admiración, respeto y agradecimiento, por su cariño, consejos, apoyo, comprensión, son de gran bendición para mi vida.

A todos mis amigos y familiares **GRACIAS**, por su cariño, oraciones, buenos deseos, palabras de aliento, apoyo incondicional, escucharme, ayudando a que este proceso fuera más pleno de satisfacción. Gracias por compartir conmigo la alegría de este logro.

Patricia Chávez Aparicio

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a mi **Dios Todopoderoso** por haberme dado la sabiduría y el entendimiento para poder llegar al final de mi carrera, por no haber dejado que me rinda en ningún momento e iluminarme para salir adelante.

A mi padre **JORGE RODRÍGUEZ**, por el apoyo incondicional que me brindó, aun recuerdo los primeros días de la universidad en el que tu nos llevabas después del colegio y nos ayudaste a hacer las largas filas para realizar los tramites de ingreso, por todos los sacrificios que hiciste a lo largo de mi carrera, las veces que fuiste a traerme en la madrugada que nos quedábamos trabajando en la tesis, el tiempo que dedicaste para cada revisión de este trabajo de graduación, y gracias por tus ánimos para seguir adelante. Te amo.

A mi madre **MARITZA DE RODRÍGUEZ**, por tu comprensión y paciencia en todo momento, gracias por tu guía, oraciones, consejos y el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera. Eres la luz de mi inspiración, el ejemplo a seguir en todas las áreas de mi vida, como madre y profesional. Te amo.

A mis hermanas **KARLA Y PAMELA RODRÍGUEZ**, gracias por estar conmigo apoyándome para seguir adelante en mis estudios, por alegrar mi vida cada día con sus risas y locuras, pero sobretodo gracias por su amor incondicional. Las amo.

A mis familiares, por todo el cariño que me han dado y su ayuda incondicional cuando la he necesitado, cada detalle que han tenido conmigo es muy importante para mí, desde cosas pequeñas, como estar pendientes de un agitador, hasta cosas grandes, como sus constantes oraciones.

A **FRANCISCO CÁCERES**, gracias amor por todo tu apoyo, tus palabras de animo cuando mas lo necesitaba. Por tu ayuda en varios proyectos de la universidad, todas las veces que estabas para escucharme y darme tus consejos y, sin duda, por tus oraciones incondicionales. Te amo.

A mis amigos en la U: **DENISSE, YID, DANI, FRANCIS, NENA y RODRIGO**, no saben como le agradezco a Dios porque nos puso en el mismo camino, cuantas cosas hemos pasado juntos, desde llantos, desvelos, locuras, angustias hasta risas. Si regresara el tiempo quisiera que todo esto que viví, vivirlo de nuevo con ustedes. Ahora puedo decir que no solo fuimos compañeros en la U, sino amigos, porque formamos una muy bonita amistad.

A mis amigos en la iglesia, gracias por su apoyo y oraciones constantes. Por sus palabras en el momento más oportuno, para seguir delante en este proceso.

A mi compañera y amiga **PATRICIA CHÉVEZ**, este largo viaje no puedo imaginar vivirlo con otra persona que no seas tú, aunque tuvimos que separarnos por un momento en algunas materias, Dios tenía todo el control y sabía que debíamos terminar juntas esta aventura. Le agradezco a Dios por tu vida, porque nos permitió conocernos desde noveno grado, y continuar juntas hasta el día de hoy, hemos compartido tantos logros que me alegra mucho vivir este momento contigo. Gracias por tu positivismo, consejos, por escucharme mis alegrías, mis llantos y sueños, y darme palabras de ánimo en todo instante. No sé que hubiera hecho sin ti, y específicamente sin tu redacción☺, Te quiero mucho.

Gabriela Rodríguez Pineda

Resumen

En El Salvador, todo el aluminio procesado por la industria del aluminio y sus manufacturas, es importado desde países donde se realiza la extracción de aluminio a partir del mineral de la Bauxita, el cual es transformado en una gran variedad de productos de aluminio. Como parte de los procesos productivos se realizan operaciones de fundición para el reciclaje de aluminio, obteniendo como resultado aluminio secundario.

Las escorias salinas son un residuo generado por el procesamiento de aluminio secundario. De acuerdo a las operaciones inmediatas que se realicen para su descarga y enfriamiento de los hornos de fundición se tienen dos tipos de escorias salinas: suelta y compacta. Según con la Lista Europea de Residuos, contemplada en el Convenio de Basilea, las escorias salinas del procesamiento de aluminio secundario se clasifican como un residuo peligroso, debido a su posible reacción con el agua o humedad del ambiente, dando lugar a la generación de gases tóxicos o la lixiviación de elementos a los suelos o mantos acuíferos. Sin embargo las escorias salinas de aluminio representan un residuo con un potencial de valorización importante, ya que es posible la recuperación de subproductos como aluminio metálico y otros productos no metálicos como óxidos y sales fundentes de sodio, potasio y magnesio.

Para el desarrollo de esta investigación el reciclaje de materiales de aluminio corresponde a “chatarra nueva” es decir subproductos del procesamiento de aluminio primario, como productos fuera de especificación, de composición conocida, y que no requieren pretratamiento para su procesamiento.

Se determinó la composición química de ambos tipos de escoria salina de aluminio, a través del desarrollo de la metodología experimental diseñada para el análisis de este residuo en particular, que incluye análisis instrumental de Fotometría, Difracción de Rayos X, Espectrofotometría de Absorción Atómica y el procedimiento experimental denominado Método DIN 38414-S4 (Instituto Alemán de Normalización por sus siglas en alemán). Este último método proporciona información sobre los efectos adversos que pueden generar los residuos sólidos sobre las aguas superficiales y subterráneas, de forma tal que al entrar en contacto con el agua se produce una solución lixiviada. Como resultado se

obtuvo que el mayor contenido de aluminio total se encuentra en las partículas de tamaño menor a 5 mm, siendo para el caso de la escoria salina suelta de 37.90% y para la escoria salina compacta de 43.68%. Para ambos tipos de muestra de escoria salina, el mayor contenido de aluminio en forma metálica se encuentra en las partículas de tamaño mayor a 5 mm. La composición química en peso se reporta por fracción granulométrica y contenido total por especie atómica, siendo los elementos químicos analizados Al, Na, K, Mg, Ca, Si, y Zn.

Se presentan propuestas de gestión ambiental de la escoria salina de la industria del aluminio de El Salvador, las cuales han sido desarrolladas tomando como base la composición química del residuo en estudio y el principio de jerarquía en la gestión de residuos, que establece que se debe fijar un orden de preferencia para la selección de la alternativa de gestión a aplicar a determinado residuo. Este principio de jerarquía, establece que se debe considerar la gestión de los residuos en el orden de preferencia siguiente: Reducción de la generación de residuos, reutilización, reciclado, valorización y eliminación del residuo. Además se considera la viabilidad técnica y económica del método de gestión, tomando en cuenta las condiciones tecnológicas, territorio, y otros factores propios de la región.

Las alternativas de gestión propuestas incluyen lineamientos sobre manejo apropiado de las escorias salinas y las consideraciones necesarias para su almacenamiento temporal. Para la escoria salina suelta, debido a su bajo contenido de aluminio metálico, la alternativa de gestión adecuada para su disposición final es su co-procesamiento en hornos cementeros autorizados por el Ministerio del Medio Ambiente en El Salvador. En el caso de la escoria salina compacta se tiene además la alternativa de su exportación para su tratamiento y valorización en el exterior de El Salvador, donde se cuente con la tecnología que permita dicha actividad.

Índice

Introducción

Objetivos

Capitulo 1. Generalidades del aluminio	3
1.1 Características generales del aluminio	5
1.2 Características físicas del aluminio puro	6
1.3 Características químicas del aluminio puro.....	8
1.4 Aplicaciones y usos del aluminio	9
1.5 Producción mundial de aluminio	11
1.5.1 Consumo mundial de aluminio.....	12
1.5.2 Producción y comercio mundial de aluminio	15
1.6 Industria del aluminio en El Salvador.....	16
Capitulo 2. Procesamiento de aluminio secundario.....	19
2.1 Pretratamiento de materia prima para fundición de aluminio secundario.....	22
2.1.1 Inspección y Clasificación de materiales para fundición de aluminio secundario.....	22
2.1.2 Pretratamiento de materiales para fundición de aluminio secundario	24
2.1.3 Descripción de procesos de pretratamiento de materiales para fundición de aluminio secundario.....	25
2.2 Fundición de materiales de aluminio.....	26
2.2.1 Horno de reverbero o de inducción.....	28
2.2.2 Horno rotativo	29
2.2.3 Horno de crisol basculante	31
2.2.4 Proceso de fundición de aluminio secundario con adición de sales fundentes.....	32
2.3 Proceso de fundición realizado para la investigación.....	33
2.4 Residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario.....	34
2.4.1 Escorias salinas de aluminio secundario	34
2.4.2 Espumas de aluminio	36
2.4.3 Polvo de aluminio	36
2.5 Técnicas de disposición final de escorias salinas de aluminio secundario	37

Capítulo 3.	Aspectos ambientales y efectos a la salud humana relacionados con la escoria salina de aluminio.....	39
3.1	Emisiones al aire por el procesamiento de aluminio secundario y disposición de residuos generados.....	40
3.2	Consumo de energía en el procesamiento de aluminio secundario	43
3.3	Contaminantes en los vertidos líquidos por el procesamiento de aluminio secundario y disposición de residuos generados.....	44
3.4	Efectos nocivos sobre los suelos por la disposición de residuos del procesamiento de aluminio secundario.....	45
3.5	Reacciones químicas relacionadas con la disposición en vertedero de la escoria salina.....	46
Capítulo 4.	Marco legal sobre la disposición de residuos del procesamiento de aluminio secundario	48
Capítulo 5.	Caracterización de la escoria salina de aluminio secundario	62
5.1	Procedimiento experimental para la caracterización de la escoria salina de aluminio secundario.....	66
5.1.1	Muestreo de escoria salina de aluminio secundario.....	67
5.1.2	Trituración y tamizado de escoria salina de aluminio secundario.....	68
5.1.3	Análisis de lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario.....	70
5.1.4	Análisis químico instrumental de muestras de escorias salinas de aluminio secundario	72
5.2	Resultados de análisis químico de escorias salinas de aluminio secundario	74
5.2.1	Muestreo de escoria salina de aluminio secundario.....	74
5.2.2	Trituración y Tamizado de muestras de escoria salina de aluminio secundario	75
5.2.3	Análisis de lixiviados de escoria salina de aluminio secundario	78
5.2.4	Análisis de lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario.....	81
5.2.5	Análisis químico instrumental de Difracción de Rayos X de muestras de escorias salinas de aluminio secundario	82
5.2.6	Análisis químico instrumental de Espectrofotometría de Absorción Atómica de muestras de escorias salinas de aluminio secundario	84
5.2.7	Balance de masa para determinación de composición química de escorias salinas de aluminio secundario	85
Capítulo 6.	Propuestas de gestión de la escoria salina de aluminio secundario.....	92
6.1	Reducción de generación de escorias salinas de aluminio secundario en la fuente.	95

6.2	Manejo apropiado de escorias salinas de aluminio secundario.....	97
6.2.1	Manejo apropiado de escoria salina compacta de aluminio secundario	97
6.2.2	Manejo apropiado de escoria salina suelta de aluminio secundario.....	99
6.3	Almacenamiento adecuado de escorias salinas de aluminio secundario en recintos industriales, bodegas y recintos aduanales	100
6.3.1	Consideraciones para el almacenamiento de la escoria salina de aluminio secundario	100
6.3.2	Condiciones de la operación de almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario	102
6.3.3	Condiciones de la bodega de escorias salinas de aluminio secundario	102
6.3.4	Almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario en recipientes móviles.....	104
6.3.5	Consideraciones de higiene y seguridad ocupacional para el almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario	105
6.3.6	Selección del equipo de protección en el manejo de las escorias salinas de aluminio secundario	108
6.3.7	Etiquetado de recipientes con escoria salina de aluminio secundario.....	110
6.4	Exportación de escorias salinas de aluminio secundario para su tratamiento en el exterior	111
6.5	Co-Procesamiento de escorias salinas de aluminio secundario en hornos cementeros.....	115
6.5.1	Co-procesamiento de residuos en El Salvador	115
6.5.2	Aspectos generales del co-procesamiento de residuos en hornos cementeros	116
	Observaciones.....	119
	Conclusiones	121
	Recomendaciones	123
	Bibliografía	
	ANEXOS	

Índice de Figuras

Figura 1-1 Estructura electrónica del aluminio	3
Figura 1-2 Mineral Bauxita	3
Figura 1-3 Uso del aluminio en la fabricación de empaques y envases	9
Figura 1-4 Usos varios del aluminio	10
Figura 1-5 Consumo mundial de aluminio primario por región	12
Figura 1-6 Aluminio Secundario: Consumo y tendencia por región.	14
Figura 1-7 Consumo mundial de aluminio por sector industrial	15
Figura 1-8 Producción de aluminio y alúmina (1950-2004)	15
Figura 2-1 Procedimiento general de producción de aluminio secundario.....	20
Figura 2-2 Chatarra nueva, perfiles de aluminio para reciclaje.....	21
Figura 2-3 Chatarra usada de aluminio	21
Figura 2-4 Diagrama del proceso típico de clasificación y pretratamiento para segunda fundición de aluminio	24
Figura 2-5 Esquema ilustrativo de un horno reverbero.....	28
Figura 2-6 Esquema ilustrativo de un horno rotatorio.....	30
Figura 2-7 Fotografía de un horno de crisol basculante	31
Figura 3-1 Uso de energía por el procesamiento de aluminio	43
Figura 3-2 Fuentes y uso de electricidad para producción primaria de aluminio	44
Figura 5-1 Escoria salina suelta de aluminio secundario.....	66
Figura 5-2 Escoria salina compacta de aluminio secundario.....	66
Figura 5-3 Diagrama de proceso experimental para caracterización de escoria salina de secundario	67
Figura 5-4 Molino de martillos utilizado para la trituración de la muestra de escoria salina de aluminio propiedad de empresa A.....	69
Figura 5-5 Tamiz US N°12	69
Figura 5-6 Tamiz US N°4	69
Figura 5-7 Diagrama de proceso de análisis de lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario, norma DIN 38414-S4	71
Figura 5-8 Muestra de escoria salina suelta.....	74
Figura 5-9 Muestra de escoria salina compacta.....	74
Figura 5-10 Lingotes de escoria salina compacta	75

Figura 5-11 Extracción de muestra de escoria salina compacta	75
Figura 5-12 Distribución de partículas por malla de muestras de escoria salina de aluminio secundario tamizada.	77
Figura 5-13 Selección de muestra para análisis de lixiviado de Escoria Salina.....	78
Figura 5-14 Medición de masa de muestras de escoria salina.....	78
Figura 5-15 Horno de secado	79
Figura 5-16 Secado de muestras de escoria salina de aluminio secundario	79
Figura 5-17 Agitación de lixiviados de escoria salina de aluminio secundario.....	80
Figura 5-18 Diagrama de proceso de lixiviación de escorias salinas de aluminio secundario para balance de masa.....	85
Figura 6-1. Propuesta de alternativas de gestión para escoria salina compacta de aluminio secundario	93
Figura 6-2. Propuesta de alternativas de gestión de la escoria salina suelta de aluminio secundario	94
Figura 6-3 Ejemplos de señalización recomendada para bodega de escorias salinas de aluminio secundario	106
Figura 6-4 Propuesta de etiqueta para envases de almacenamiento de escoria salina de aluminio secundario	110

Índice de Cuadros

Cuadro 1-1. Resumen de características físicas del aluminio	7
Cuadro 1-2. Aluminio primario: Consumo y participación de los principales mercados	13
Cuadro 1-3 Empresas dedicadas a la industria del aluminio en El Salvador	17
Cuadro 1-4 Exportaciones totales de El Salvador de aluminio y sus manufacturas	18
Cuadro 2-1 Descripción de la clasificación de materia prima para segunda fundición de aluminio.....	23
Cuadro 2-2 Hornos considerados como Mejores Técnicas Disponibles para producción de aluminio secundario.	27
Cuadro 2-3 Residuos generados en el procesamiento de aluminio secundario	34
Cuadro 2-4 Familias y compuestos presentes en la escoria salina del procesamiento de aluminio secundario.	35
Cuadro 2-5 Composición típica de las escorias salinas del procesamiento de aluminio secundario	35
Cuadro 2-6 Composición típica de los polvos de aluminio generados por el procesamiento de aluminio secundario	36
Cuadro 3-1 Comparación de los procesos primario y secundario en la producción de aluminio.....	39
Cuadro 3-2 Efectos nocivos a la salud humana y medio ambiente de las emanaciones gaseosas generadas por el procesamiento de aluminio secundario	42
Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.	49
Cuadro 4-2 Listado de características peligrosas consideradas en el Convenio de Basilea	61
Cuadro 5-1 Resumen de composiciones de escorias salinas de aluminio secundario reportadas en la literatura consultada.	63
Cuadro 5-2 Distribución de partículas de tamizado de muestras de escoria salina	76
Cuadro 5-3 Mediciones de masa de muestras de escoria salina durante el secado	79
Cuadro 5-4 Mediciones de parámetros fisicoquímicos de lixiviado de Escoria Salina de aluminio secundario	80
Cuadro 5-5 Concentraciones de elementos químicos en lixiviado de escoria salina de aluminio secundario.	81
Cuadro 5-6 Resultados de análisis de difracción de rayos X de muestras de escorias salinas de aluminio secundario.	83

Cuadro 5-7 Resultados de análisis de AA a muestras de escorias salinas de aluminio secundario	84
Cuadro 5-8 Resumen de resultados de análisis instrumental de muestras de escoria salina de aluminio	84
Cuadro 5-9. Cuadro resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lixiviado de escoria salina suelta de aluminio secundario	87
Cuadro 5-10. Cuadro resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lixiviado de escoria salina compacta de aluminio secundario	87
Cuadro 5-11. Cuadro Resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lodo de lixiviado de escoria salina suelta de aluminio secundario.....	88
Cuadro 5-12. Cuadro resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lodo de lixiviado de escoria salina compacta.....	88
Cuadro 5-13. Resumen de cálculo de composición química de escoria salina de aluminio secundario con tamaño de partícula menor a 5 mm.....	90
Cuadro 5-14. Resumen de cálculo de composición química de escoria salina de aluminio secundario con tamaño de partícula mayor a 5 mm	91
Cuadro 5-15. Resumen de composición química en peso de escoria salina suelta y escoria salina compacta de aluminio secundario, por especie atómica	91
Cuadro 6-1 Descripción de medidas propuestas para minimización de generación de escorias salinas de aluminio secundario en la fuente.	96
Cuadro 6-2 Condiciones de manejo apropiado de la escoria salina de aluminio secundario y sus beneficios	97
Cuadro 6-3 Condiciones de manejo recomendadas para la escoria salina suelta de aluminio secundario	99
Cuadro 6-4 Contrastes de color para la señalización	106
Cuadro 6-5 Colores de seguridad, significado y otras indicaciones sobre su uso	107
Cuadro 6-6 Descripción del equipo de protección personal a utilizar para el manejo de escorias salinas de aluminio secundario	109
Cuadro 6-7 Empresas dedicadas a la gestión, tratamiento y destrucción de residuos industriales, peligrosos y no peligrosos, con experiencia en el tratamiento de escorias salinas de aluminio secundario	114
Cuadro 6-8 Entidades autorizadas para la disposición final de residuos peligrosos en El Salvador.....	116
Cuadro 6-9. Componentes típicos de los cementos tipo portland	118

Introducción

Los beneficios económicos y medioambientales del reciclaje de aluminio son evidentes y significativos, siendo uno de los aspectos más importantes que el aluminio puede ser reciclado casi de manera completa, sin pérdida de calidad del producto final. Otro aspecto a destacar es la energía que se utiliza durante el reciclaje de aluminio, comparado con el consumo de energía necesaria para producir aluminio, el proceso de reciclaje sólo consume entre el 5 y el 20 % de la energía necesaria para la producción de aluminio a partir del mineral Bauxita. La cantidad y naturaleza de los residuos y efluentes generados durante el reciclaje de aluminio también hacen que este proceso presente un menor impacto medioambiental que el proceso de producción de aluminio primario. A pesar de todas estas ventajas, la demanda mundial de aluminio hace que la producción de aluminio primario siga siendo la principal fuente para la obtención de este metal.

En los últimos años, la conveniencia o no de tratar los residuos que se generan en el reciclado de aluminio y de cómo se lleva a cabo, ha generado un amplio debate en la comunidad científica e industrial. Durante el proceso de reciclaje se generan varios tipos de residuos, destacando entre éstos las escorias salinas.

Las escorias salinas se generan cuando en el proceso de fundición de materiales de aluminio, se utilizan sales para cubrir el aluminio fundido. Las sales fundentes previenen la oxidación del aluminio y permiten separar fácilmente los óxidos metálicos del aluminio metal. Debido a su composición y posible reacción con el agua, las escorias salinas que vienen de los procesos de reciclaje de aluminio están catalogadas como residuos peligrosos, código LER (Lista Europea de Residuos) 100308. De igual forma, las escorias salinas son un subproducto que podría ser recuperado en la medida que el proceso sea económicamente viable. Los materiales que se podrían recuperar son el aluminio metal, la sal fundente y el residuo final, formado por una mezcla de óxidos metálicos diversos.

Objetivos

1. Objetivo General.

Elaborar una propuesta de alternativas de gestión de la escoria salina de la industria de aluminio en El Salvador.

2. Objetivos Específicos.

- a. Identificar los impactos ambientales y a la salud humana del procesamiento de aluminio secundario en El Salvador.
- b. Caracterizar la escoria salina de aluminio generada por el procesamiento de aluminio secundario en El Salvador.
- c. Proponer alternativas de tratamiento, reciclaje o disposición final de la escoria salina de aluminio.

Capítulo 1. Generalidades del aluminio

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre, en un principio se consideró como un metal precioso, la primera presentación pública de este metal fue en 1855 en la Exposición Universal de París, en aquel entonces se le conocía como “plata de arcilla” (Aparicio, Manero, & Rodriguez, 2001).

El aluminio es un elemento químico, cuyo símbolo es Al y su número atómico es 13, es un metal no ferro magnético y es el tercer elemento más común en el planeta, sus compuestos forman el 8% en la corteza terrestre, y se encuentran presentes en la mayoría de las rocas, vegetación y animales. En estado natural se encuentra en muchos silicatos. Como metal se extrae únicamente del mineral conocido con el nombre de bauxita, el cual es transformado en alúmina mediante el proceso Bayer y a continuación en aluminio metálico mediante electrólisis.

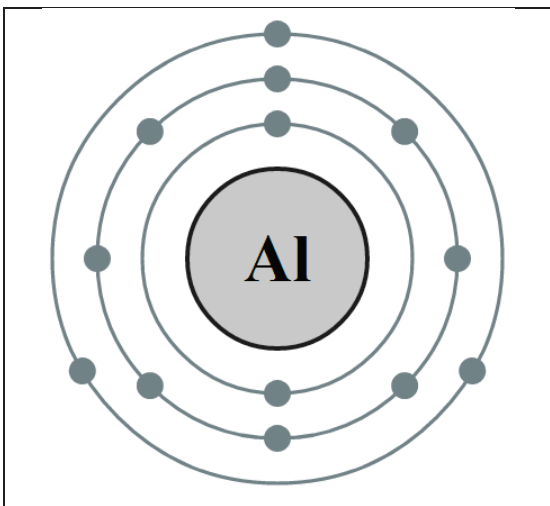


Figura 1-1 Estructura electrónica del aluminio (Robson, 2010).

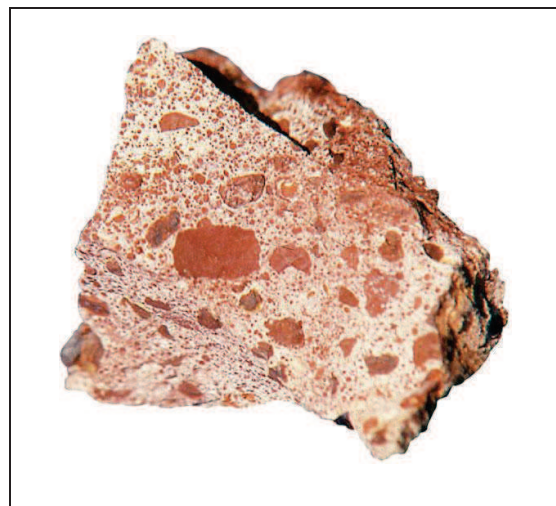


Figura 1-2 Mineral Bauxita (Cerrato, 2002).

El Aluminio posee una combinación de propiedades que lo hacen muy útil en ingeniería mecánica, tales como su baja densidad (2.700 kg/m^3) y su alta resistencia a la corrosión. Mediante aleaciones adecuadas se puede aumentar sensiblemente su resistencia mecánica (hasta los 690 MPa). Es buen conductor de la electricidad y del calor, se mecaniza con facilidad y es relativamente barato. Por todo ello es desde mediados del siglo XX el metal que más se utiliza después del acero, con una producción mundial anual de aproximadamente 31 millones de toneladas. Sin embargo para la producción de

aluminio metálico se requiere una elevada cantidad de energía eléctrica, problema que se compensa por su bajo costo de reciclado, dilatada vida útil y estabilidad de su precio (Aparicio, Manero, & Rodriguez, 2001).

Desde la antigüedad (siglo V a. C.) el aluminio se ha utilizado en tintorería y medicina bajo la forma de una sal doble, conocida como alumbre. El elemento fue identificado, gracias al desarrollo de la física y la química, en el siglo XIX; su nombre inicial *aluminum*, fue propuesto por el británico Sir Humphrey Davy en el año 1809. A medida que se sistematizaban los nombres de los distintos elementos, se cambió por coherencia a la forma *aluminium*, que es la preferida hoy en día por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) debido al uso uniforme del sufijo *-ium*. Sin embargo, no es la única aceptada ya que la primera forma es muy popular en los Estados Unidos (Aparicio, Manero, & Rodriguez, 2001).

Las primeras muestras de aluminio fueron aisladas por electrólisis en el año de 1825 por el físico danés Hans Christian Orsted, descubridor del electromagnetismo, estas primeras muestras fueron bastante impuras, el aislamiento total fue conseguido dos años después por Friedrich Wöhler.

La extracción del aluminio a partir de las rocas que lo contenían era una tarea ardua. A mediados del siglo XIX, podían producirse pequeñas cantidades, reduciendo con sodio un cloruro mixto de aluminio y sodio, gracias a que el sodio era más electropositivo.

El aluminio llegó a considerarse un material exótico, de precio exorbitado, y máspreciado incluso que la plata o el oro, ya que la producción era bastante costosa. Durante la Exposición Universal de 1855 se expusieron unas barras de aluminio junto a las joyas de la corona de Francia. El mismo emperador francés había pedido una vajilla de aluminio para agasajar a sus invitados. En 1884, el vértice del monumento a Washington se hizo de aluminio, a un precio que rondaba el de la plata, en ese tiempo (Aparicio, Manero, & Rodriguez, 2001).

Con la invención del dínamo en 1866, que permitía generar la cantidad de electricidad necesaria para realizar el proceso de extracción de la alúmina u óxido de aluminio a partir de la bauxita, y el desarrollo y perfeccionamiento de técnicas como el proceso Bayer (patentado por el austriaco Karl Bayer en 1889) o el proceso Hall Héroult (patentado por el

francés Paul Héroult y el norteamericano Charles Martin Hall en 1886), la producción de aluminio se incrementó vertiginosamente. En 1882, la producción anual alcanzaba escasamente las 2 toneladas, en 1900 alcanzó las 6.700 toneladas, en 1939 las 700.000 toneladas, en 1943 las 2.000.000de toneladas, y en aumento desde entonces, llegando a convertirse en el metal no férreo más producido en la actualidad.

La abundancia conseguida convirtió al aluminio en un metal común, en 1895 era suficientemente abundante para ser usado en la construcción. Hoy en día las líneas generales del proceso de extracción se mantienen, aunque se recicla de manera general desde 1960, por motivos medioambientales y también económicos ya que la recuperación del metal a partir de la chatarra cuesta un 5% de la energía de extracción a partir de la roca.

1.1 Características generales del aluminio

El aluminio es un material idóneo para una gran cantidad de aplicaciones, gracias a sus características. Generalmente no se utiliza puro, sino en aleación. Sus características más sobresalientes son (Smith, 1998):

- a. **Ligereza:** El aluminio tiene un peso muy reducido, pesa solamente un tercio que el acero con el mismo volumen, permitiendo de esta manera obtener importantes ahorros de peso en casi todos los tipos de aplicaciones, sobre todo, la mecánica.
- b. **Duración:** El aluminio, gracias a la capacidad de desarrollar una película en la que no puede penetrar el óxido en las superficies expuestas, no está sometido a los problemas de corrosión atmosférica habituales en el hierro y el cobre, y no requiere ningún tipo de pintura de protección. Por este motivo, está especialmente indicado para aplicaciones arquitectónicas y navales, así como la fabricación de cerramientos y fachadas continuas.
- c. **Conductividad:** El aluminio tiene una conductividad eléctrica que lo hace indispensable para la electrónica y las aplicaciones eléctricas. Permite realizar líneas de gran longitud con cables de aluminio capaces de conducir la corriente

eléctrica en cantidad doble que las de cobre del mismo peso. De hecho, se presta también a aplicaciones de calefacción y refrigeración.

- d. Maleabilidad:** El aluminio es muy maleable y puede modelarse, con todas las técnicas habituales de tratamiento, con más facilidad que la mayoría de otros metales. Se puede forjar, laminar hasta obtener una hoja muy fina, ser extrusado en perfiles complejos o plegar.
- e. Versatilidad:** La posibilidad de utilizar el metal en aleaciones, que pueden ser rígidas o elásticas, especialmente sólidas y resistentes a la corrosión, permite adaptar el aluminio a una amplia gama de necesidades.
- f. Reciclabilidad:** El aluminio se recicla con gran facilidad y con un coste energético reducido, actualmente una cuarta parte de las necesidades de aluminio en Europa se abastecen utilizando metal de segunda fusión que, a su vez, puede reciclarse indefinidamente.
- g. Resistente a la corrosión:** el aluminio es resistente a la corrosión, gracias a la capa protectora de óxido de aluminio característica, resiste a los productos químicos, puede estar expuesto a la intemperie, al mar, etc.
- h. Ductilidad:** La ductilidad es una característica notable en el aluminio; es un material muy maleable y de gran ductilidad, mucho más fácil de conformar que el acero.
- i. Carácter Magnético:** el aluminio es un material clasificado de acuerdo a su carácter magnético como un material paramagnético ya que presenta un magnetismo significativo. Atraído por la barra magnética.

1.2 Características físicas del aluminio puro

Las propiedades físicas más destacables del aluminio y sus aleaciones son: poco peso, buena resistencia a la corrosión y conductividad elevada, tanto térmica como eléctrica. En el Cuadro 1-1 se presenta un resumen de las propiedades físicas más características del

aluminio puro. Evidentemente, algunas de estas propiedades varían según el contenido de impurezas.

Cuadro 1-1. Resumen de características físicas del aluminio

Propiedad	Valor
Color	Blanco-plata
Estructura cristalográfica	Cúbica centrada en las caras
Estado ordinario	Sólido
Densidad a 20 °C	$2698.40 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Dureza mohs	2.75
Punto de fusión	933.47 K
Punto de ebullición	2792.00 K
Entalpía de vaporización	$293.40 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
Entalpía de fusión	$10.79 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$
Presión de vapor	$2.42 \times 10^6 \text{ Pa a } 577 \text{ K}$
Volumen molar	$10.00 \times 10^6 \frac{\text{m}^3}{\text{mol}}$
Calor específico a 20 °C	$930 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$
Conductividad eléctrica	$37.7 \times 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}}$
Conductividad térmica	$237 \frac{\text{W}}{\text{K} \cdot \text{m}}$

(EFIG, 1995)

1.3 Características químicas del aluminio puro

El aluminio es un elemento químico metálico, de símbolo Al, número atómico 13, peso atómico 26.9815, que pertenece al grupo IIIA del sistema periódico. La capa de valencia del aluminio está poblada por tres electrones, por lo que su estado normal de oxidación es III. Esto hace que reaccione con el oxígeno de la atmósfera formando con rapidez una fina capa gris mate de alúmina Al_2O_3 , que recubre el material, aislándolo de futuras corrosiones. Esta capa puede disolverse con ácido cítrico. A pesar de ello es tan estable que se usa con frecuencia para extraer otros metales de sus óxidos. Por lo demás, el aluminio se disuelve en ácidos y bases. Reacciona con facilidad con el ácido clorhídrico y el hidróxido sódico (Robson, 2010).

Si se necesita una mayor resistencia a la corrosión para aplicaciones industriales específicas, ésta se puede conseguir aumentando artificialmente el espesor de la capa de alúmina, a través de un procedimiento de oxidación profunda y, con posterior colmatado por inmersión en agua caliente.

Los ácidos clorhídrico, fluorhídrico y sulfúrico concentrados pueden atacar fácilmente al aluminio y a sus aleaciones, mientras que en soluciones de ácido nítrico, amoníaco y en la mayoría de ácidos orgánicos reaccionan ligeramente. La resistencia química del aluminio depende de la composición química y concentración de la solución así como de la pureza del metal.

Según el efecto que tienen los aleantes sobre la resistencia a la corrosión, éstos se pueden clasificar en:

- a. Elementos que mejoran la resistencia a la corrosión: cromo, magnesio y manganeso
- b. Elementos que empeoran la resistencia: cobre, hierro, níquel, estaño, plomo y cobalto
- c. Elementos que tienen poca influencia: silicio, titanio, zinc, antimonio, cadmio y circonio.

1.4 Aplicaciones y usos del aluminio

Gracias a sus propiedades, el aluminio encuentra múltiples aplicaciones y su uso sigue una constante evolución al alza. La utilización industrial del aluminio ha hecho de este metal uno de los más importantes, tanto en cantidad como en variedad de usos, siendo hoy un material polivalente que se aplica en ámbitos económicos muy diversos y que resulta estratégico en situaciones de conflicto. La combinación de la ligereza con resistencia y alta conductividad eléctrica y térmica es la propiedad que convirtió al aluminio y sus aleaciones en materiales de construcción importantísimos para la elaboración de aviones, automóviles, máquinas de transporte, electrotecnia, fabricación de motores de combustión interna, etc.

El aluminio se usa en forma pura, aleado con otros metales o en compuestos no metálicos. En estado puro se aprovechan sus propiedades ópticas para fabricar espejos domésticos e industriales, como pueden ser los de los telescopios reflectores. Su uso más popular, sin embargo, es como papel aluminio, que consiste en láminas de material con un espesor tan pequeño que resulta fácilmente maleable y apto para embalaje alimentario, también se usa en la fabricación de latas y tetrabriks.



Figura 1-3 Uso del aluminio en la fabricación de empaques y envases

Por sus propiedades eléctricas es un buen conductor, capaz de competir en coste y prestaciones con el cobre tradicional. Dado que, a igual longitud y masa, el conductor de aluminio tiene más conductividad; resulta un componente útil para aplicaciones donde el exceso de peso resulta oneroso, por ejemplo en la aeronáutica el menor peso implica menos gasto de combustible y mayor autonomía, en el caso de los tendidos eléctricos, significa la posibilidad de separar las torres de alta tensión.



Figura 1-4 Usos varios del aluminio

La resistencia a la corrosión al agua del mar del aluminio también lo hace útil para fabricar cascos de barcos y otros mecanismos acuáticos. Se puede preparar una amplia gama de aleaciones recubridoras y aleaciones forjadas que proporcionen al metal más fuerza y resistencia a la corrosión o a las temperaturas elevadas. Algunas de las nuevas aleaciones pueden utilizarse como planchas de blindaje para tanques y otros vehículos militares. Además, el aluminio aleado con otros metales, se utiliza para la creación de estructuras portantes en la arquitectura y para fabricar piezas industriales de todo tipo de vehículos y calderería. También está presente en enseres domésticos tales como utensilios de cocina y herramientas. Se utiliza asimismo en la soldadura aluminotermia y como combustible químico y explosivo por su alta reactividad.

El uso del aluminio también se realiza a través de los compuestos que forma. La misma alúmina, el óxido de aluminio que se obtiene de la bauxita, se usa tanto en forma cristalina como amorfa. En el primer caso forma el corindón, una gema utilizada en joyería que puede adquirir coloración roja o azul, llamándose entonces rubí o zafiro, respectivamente. Ambas formas se pueden fabricar artificialmente. Asimismo, la dureza del corindón permite su uso como abrasivo para pulir metales. Otros compuestos del aluminio se utilizan en la fabricación de explosivos.

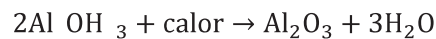
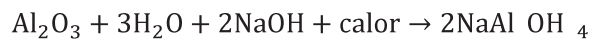
Verdaderamente, son pocos los sectores de aplicación en los que no se usa el aluminio. Su uso está destinado a aumentar progresivamente ya que sus propiedades son especialmente apreciadas por diseñadores, arquitectos e ingenieros, constructores y usuarios finales del producto.

1.5 Producción mundial de aluminio

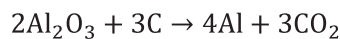
La industria del aluminio es la industria de metales no ferrosos más grande en la economía mundial. Desde su producción industrial, la demanda de aluminio ha aumentado continuamente a unos 45 millones de toneladas en 2004 y su aplicación se ha extendido a diversos sectores económicos (Zheng & Soria, 2008) (Brown, 2011).

La producción del aluminio primario a partir de la bauxita es un proceso intensivo de la electricidad y consume la mayoría de la energía utilizada en el sector. Por otra parte, el proceso de producción de aluminio primario, emite dióxido de carbono y dos tipos de gases de perfluorocarbono (PFC), que son importantes gases de invernadero (GEI). Por lo tanto el precio de la energía y la política de reducción de gases de efecto invernadero tienen una gran influencia en la evolución de la tecnología y la economía del sector.

El óxido de aluminio, también conocido como alúmina, es el componente mayoritario de la bauxita, el principal mineral de aluminio. La bauxita se compone de Oxido de Aluminio (Al_2O_3), Óxido de Hierro (Fe_2O_3), y Dióxido de Silicio (SiO_2) e impurezas. A través del proceso Bayer, el óxido de aluminio se disuelve en hidróxido de sodio y luego se precipita como Hidróxido de Aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_3$), el cual por calcinación se descompone de nuevo a Oxido de Aluminio(Al_2O_3), de acuerdo a la siguiente reacción química:



La Alúmina se reduce aún más mediante un proceso de electrólisis, denominado proceso de Hall-Héroult, a aluminio metálico líquido.



La fundición de aluminio como una actividad industrial es la actividad más joven y más grande de la industria de metales no ferrosos, ya que inició hace un siglo. El aluminio, como se mencionó en la sección 1.4, es un material con una amplia gama de aplicaciones, como vehículos de transporte, construcción, industria del embalaje, electrónica, electrodomésticos, etc., y por lo tanto las actividades económicas de estos sectores industriales determinan la demanda global de aluminio. En la mayoría de

aplicaciones, el aluminio es usado en forma de aleación, independientemente de su origen (aluminio primario o aluminio secundario).

1.5.1 Consumo mundial de aluminio

El consumo total mundial de aluminio, tanto primario como secundario, ha crecido a una tasa promedio del 3,1% anual en los años 90, de 29 millones de toneladas en 1994 a 38 millones de toneladas en el año 2000, sin embargo, el crecimiento del consumo se aceleró en los últimos años en torno al 5% anual llegando a 45 millones de toneladas en el 2004, según la industria del aluminio. La tasa de crecimiento más pronunciado al año se observó en Asia, alrededor de un 6% antes del año 2000 y el 12% después del mismo año, y la menor, en los países de Europa Oriental, del 1% en este momento. El consumo de aluminio primario fue de aproximadamente 32 millones de toneladas en el 2005, con Asia teniendo la mayor proporción equivalente al 45%, seguido por América del Norte y la Unión Europea. Ver Figura 1-5 (Brown, 2011).

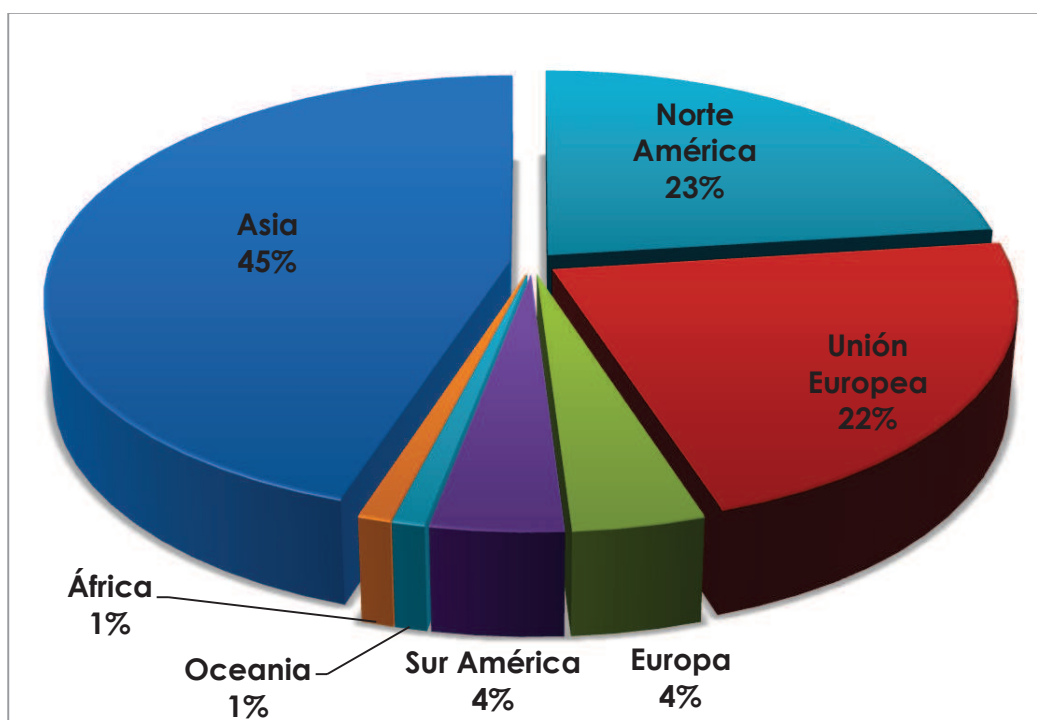


Figura 1-5 Consumo mundial de aluminio primario por región (Brown, 2011).

China, como principal país de la región Asiática, ha cuadruplicado el consumo de 1994 a 2005 y representa el 22% del consumo total mundial, ver Cuadro 1-2. Mientras que el porcentaje se ha mantenido relativamente sin cambios para la mayoría de los principales países, la participación relativa de los mercados de EE.UU. y Japón se ha reducido drásticamente en un 8 y un 4%, respectivamente. El consumo de aluminio primario en la Unión Europea (27 países) ha ido en aumento, cada año en torno al 2%, inferior a la tasa de crecimiento del total de aluminio (3%), lo que implica que la disponibilidad de chatarra de aluminio secundario es cada vez mayor.

Cuadro 1-2. Aluminio primario: Consumo y participación de los principales mercados

Mercado	Consumo de Aluminio (kT)*		Participación en el Mercado	
	1994	2005	1994	2005
USA	5,557	6,630	28%	20%
China	1,500	7,105	8%	22%
Japón	2,346	2,405	12%	8%
Alemania	1,370	1,846	7%	6%
Rusia	604	1,140	3%	4%
Canadá	559	805	3%	3%
Francia	736	810	4%	3%
India	474	930	2%	3%
Brasil	414	683	2%	2%
España	352	640	2%	2%
Reino Unido	565	500	3%	2%
Taiwán	355	470	2%	1%
Bélgica/Luxemburgo	329	425	2%	1%
Oceanía	393	415	2%	1%
TOTAL	19,868	31,801	100%	100%

*kT: kilo toneladas
(Brown, 2011)

El consumo estimado de aluminio secundario, basado en los datos presentados, indica una tendencia creciente en todas las regiones. Europa y Norte América representaron una participación dominante del 50% en el total mundial del 2004. Una vez más el crecimiento en China es más importante, siendo más del doble entre el 2000 y el 2004. El consumo de aluminio secundario en Europa aumentó en un promedio anual de 3% en el mismo período de tiempo. Como ya se mencionó en la sección 1.4, el aluminio es ampliamente utilizado como un insumo en diversos sectores industriales. Una estimación del consumo del sector del aluminio en los principales mercados, muestra que el transporte y la construcción representaron la participación mayoritaria con más del 50% en Europa, Japón y los EE.UU., mientras que en China y Rusia, el sector de la construcción tuvo la mayor proporción.

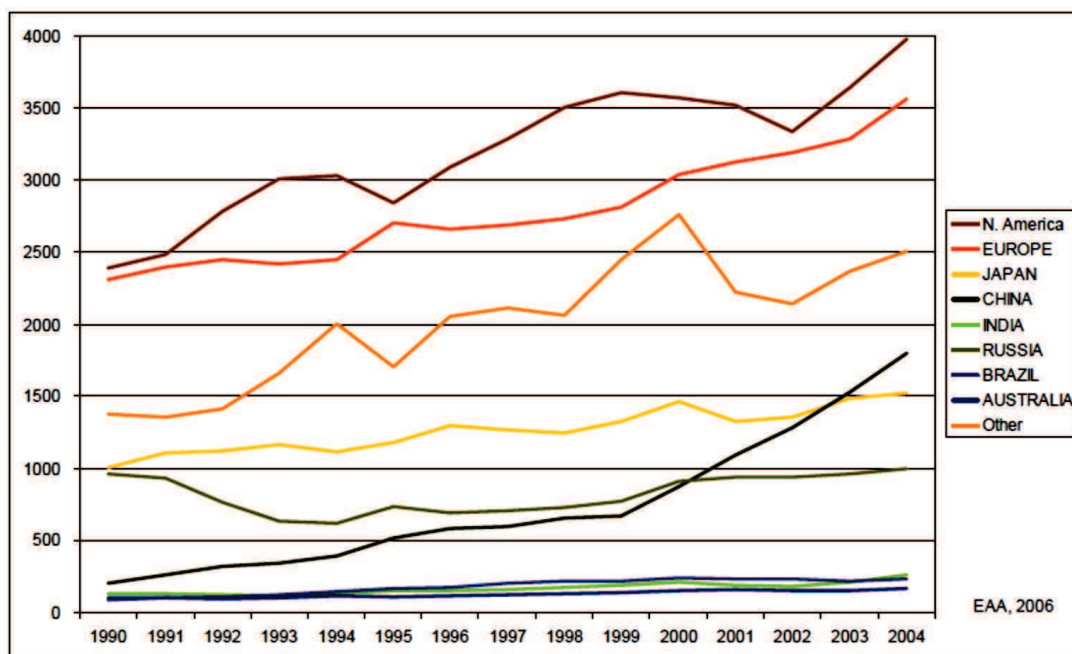


Figura 1-6 Aluminio Secundario: Consumo y tendencia por región (Brown, 2011).

Sin embargo, las participaciones pueden variar considerablemente de un país a otro como consecuencia de su diferente estructura económica industrial. Entre todos los principales países, los datos indican que la proporción para el transporte presenta un aumento más pronunciado que el de todos los otros sectores y se ha duplicado desde 1997 en el caso de China (ver Figura 1-7).

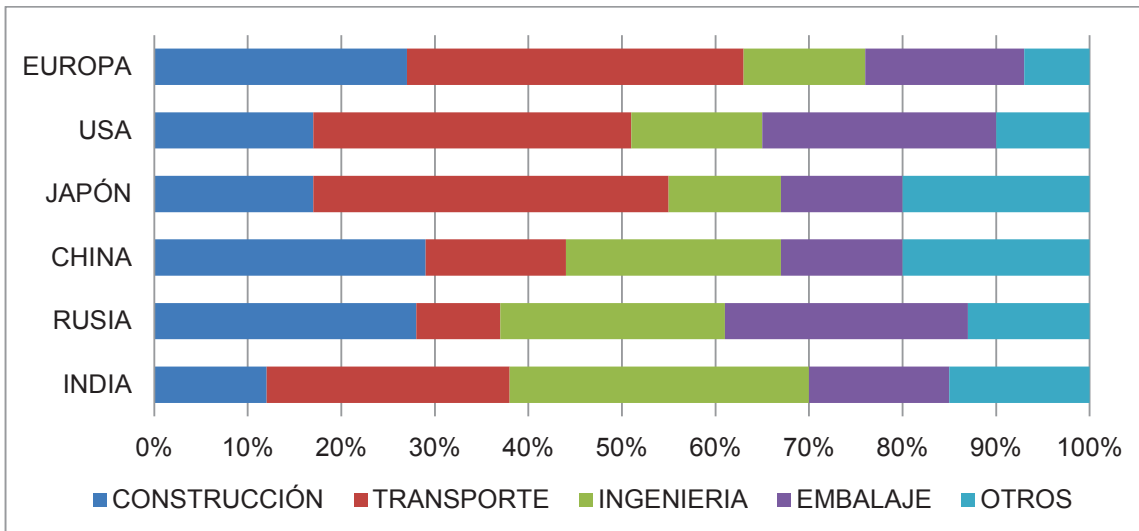


Figura 1-7 Consumo mundial de aluminio por sector industrial (Brown, 2011).

1.5.2 Producción y comercio mundial de aluminio

La historia de la producción mundial de aluminio, tal como se presenta en la Figura 1-8, muestra una marcada tendencia cada vez mayor de la producción tanto de aluminio como de alúmina desde los años 50.

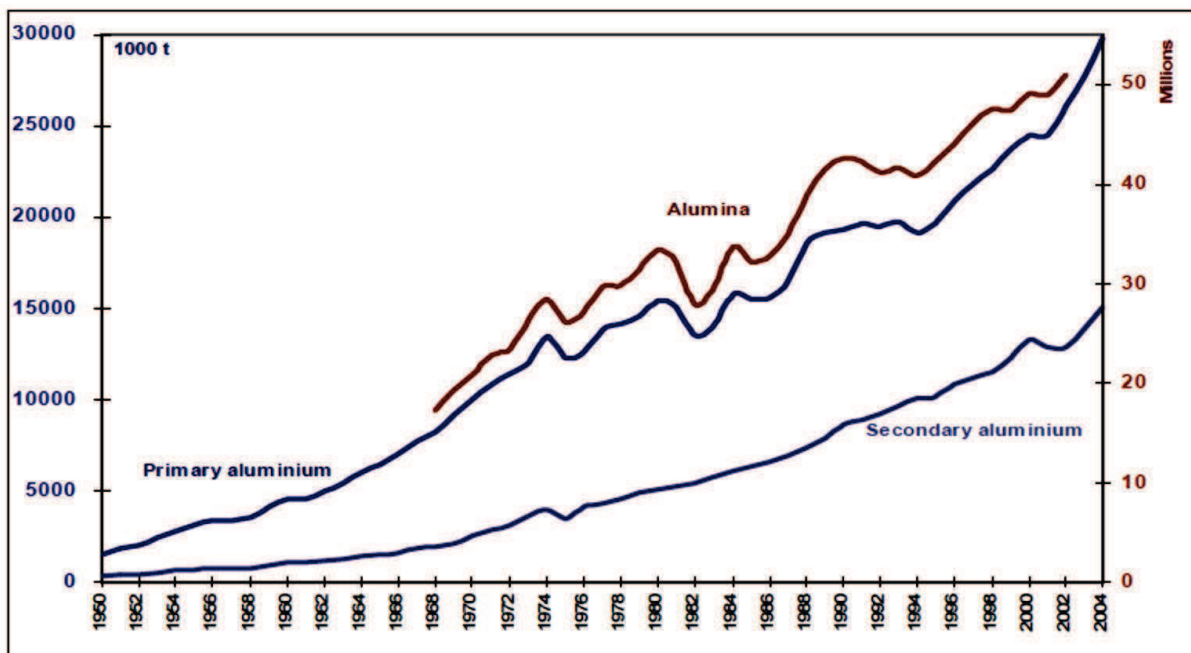


Figura 1-8 Producción de aluminio y alúmina (1950-2004) (Brown, 2011).

El aluminio primario es producido por la reducción de la alúmina, que se transforma a partir de la bauxita. En promedio, 100 toneladas de bauxita producen de 40 a 50 toneladas de alúmina que luego generan alrededor de 20-25 toneladas de aluminio. Los recursos de bauxita se estiman en 55.000-75.000 millones de toneladas, ubicadas en América del Sur (33%), África (27%), Asia (17%), Oceanía (13%) y en otros lugares (10%).

Aunque América del Sur tiene la mayor reserva, la producción tanto de bauxita como de alúmina es por mucho, más alto en Australia. Existen varios centros de producción de alúmina en la Unión Europea que utilizan para producir aproximadamente la misma cantidad de alúmina que era necesaria para su producción primaria, aunque cada vez más insuficiente en los últimos años. Actualmente, existen 56 refinерías de alúmina y 200 plantas de fundición de aluminio primario en todo el mundo, de los cuales 7 y 38, respectivamente, se encuentran en Europa.

Existen alrededor de 100 plantas de producción reportadas en China, de las cuales un número considerable son pequeños productores primarios aportando significativamente a la capacidad del país y la producción. Se estima que en la actualidad Europa tiene alrededor de 286 refinерías/refundidores, la mayoría con una capacidad anual de más de 1000 toneladas. Otros 137 y 77 refinерías/refundidores en América del Norte y Japón, y junto con el resto del mundo, el número de la industria de reciclaje alcanza las 1.200 plantas.

1.6 Industria del aluminio en El Salvador.

En El Salvador existen alrededor de 19 empresas dedicadas a la producción o distribución de productos de aluminio. De éstas únicamente 6 realizan algún tipo de proceso de fundición de aluminio. Además de estas empresas que se encuentran registradas como procesadoras de aluminio o productos de aluminio, existen muchas otras que se dedican a realizar este tipo de actividades de forma artesanal, las cuales no se reportan en este estudio ya que no se encuentran registradas como tal. Las empresas registradas se listan en el Cuadro 1-3. En el Cuadro 1-4 se presenta un resumen sobre las exportaciones de El Salvador en la industria del aluminio y sus manufacturas.

Cuadro 1-3 Empresas dedicadas a la industria del aluminio en El Salvador

No	Nombre o Razón Social	Actividad Económica	Tipo de Proceso
1	Luna Sol S.A de C.V.	Producción y fabricación en aluminio y vidrio a nivel nacional e internacional.	Montaje
2	Aluminios Internacionales	Fabricación de Ollas, Sartenes, Huacales, Arroceras, Porta leche, Lecheros, Picheles, Cucharones, Azafates, Moldes para Pan, Pizza, Vasos, Budineras, Pocillos, Azucareras, Baldes.	Fundición Moldeo
3	Industrias Torno Lara S.A. de C.V.	Fabricación de productos de metal y servicios varios de mantenimiento industrial.	Torneado
4	Aluminio de Centro América S.A. de C.V.	Fabricación de perfiles de aluminio, así como de sistemas que utilizan el aluminio como materia prima.	Fundición Anodizado
6	Aluminios Salvadoreños	Fabricación y Comercialización de artículos de cocina en Aluminio.	Fundición Moldeo
7	Unimetal S.A de C.V	Productos con recubrimiento de aluminio.	Distribución
8	Industrias Consolidadas, S. A. de C. V.	Fabricante de escaleras en aluminio y fibra de vidrio, accesorios de escaleras, productos de ferretería, puertas y ventanas. Así como la distribución de vidrio, perfiles de aluminio y accesorios para puertas y ventanas.	Moldeo Distribución
9	Vidrio Industrial, S.A. DE C.V.	Productos fabricados con vidrio y aluminio	Montaje
10	ALUMINARTE	Ventanas y Puertas de Vidrio y Aluminio	Montaje
11	CORINCA S.A. DE CV	Palanquillas de Aluminio	Fundición
12	Aluminios Cuscatlán, S.A. DE C.V.	Todo tipo de aluminio y vidrio, sillas, mesas, vitrinas y puertas.	Montaje
13	DURAN COMPANY, S.A. DE C.V	Empresa dedicada al reciclaje de desperdicios de metales ferrosos y no ferrosos.	Fundición
14	COMERCIALIZADORA HECASA, S.A. DE C.V.	Remaches de aluminio	Distribución
15	IMFICA, S.A. DE C.V.	Escaleras de aluminio, Laminas revestidas de aluminio y zinc	Distribución
18	INDROSAS.A DE C.V	Pasadores de aluminio	Distribución
16	INDUMETASIS.A. DE C.V.	Laminas revestidas de aluminio y zinc	Moldeo Distribución
17	INDUSTRIAS SANTANA S.A DE C.V	Laminas revestidas de aluminio. Capotes y canales de aluminio	Moldeo Distribución
18	INVERSIONES CALMA, SA	Laminas revestidas de aluminio	Moldeo Distribución
19	Talleres Sarti, S.A. DE C.V.	Manufacturas de metales comunes	Fundición

Fuente: ASI (2011).

Cuadro 1-4 Exportaciones totales de El Salvador de aluminio y sus manufacturas

PAÍS	Año				
	2000	2004	2008	2010	2011
Estados Unidos (U.S.A.)	1,981,651.90	3,926,092.82	2,920,728.98	5,328,853.46	6,405,357.44
México	25,405.00	230,219.46	173,139.61	23,358.96	12,028.82
Belice	36,488.77	19,505.05	26,137.75	46,408.43	22,540.79
Guatemala	3,266,152.76	4,738,990.73	5,258,116.20	2,886,751.61	2,828,644.17
Honduras	2,241,321.14	1,488,067.03	1,914,086.54	1,488,581.12	1,438,879.85
Nicaragua	737,080.69	562,405.92	933,866.08	725,624.46	738,877.85
Costa Rica	1,024,184.44	791,002.46	957,392.63	539,667.89	1,009,551.75
Panamá	286,225.87	501,856.33	1,076,064.27	1,149,860.35	1,335,816.95
Cuba	1,179.00	63,305.75	13,871.99	0	1,923.41
Republica Dominicana	215,745.76	161,900.39	799,111.21	597,085.40	984,613.90
Jamaica	43,438.87	112,774.59	82,930.78	59,669.75	62,608.04
Trinidad Y Tobago	53,836.18	0	6,037.20	9,127.04	5,938.16
Puerto Rico	243,107.00	967.92	12,160.30	0	33,643.08
Ecuador	0	0	17,256.03	33,823.69	45,065.63
Brasil	0	146,383.06	1,414,658.43	439,308.71	112,001.07
Chile	0	0	9,794.94	17,391.92	29,291.40
Corea Del Sur	0	146,363.63	166,200.08	997,182.03	2,124,008.70
Republica Popular de China	0	1,561,357.69	1,474,757.94	990,576.93	206,807.21
Taiwan	160,042.37	5,164,545.23	918,890.11	1,022,709.89	1,093,828.48
TOTALES	1,804,627.93	2,736,684.56	4,141,157.53	4,540,432.53	2,300,669.16

Unidad: kilogramos de aluminio y sus manufacturas exportadas

Fuente: BCR (2012)

Capítulo 2. Procesamiento de aluminio secundario.

El reciclaje del aluminio fue una actividad de bajo perfil hasta finales de los años sesenta, cuando el uso creciente del aluminio para la fabricación de latas de refrescos trajo el tema al conocimiento de la opinión pública. Sólo en Estados Unidos, existen aproximadamente 116 plantas recicladoras de aluminio, con una capacidad de recuperación aproximada de 2.6 millones de toneladas de aluminio por año (Brown, 2011).

Al aluminio reciclado se le conoce como aluminio secundario, o aluminio de segunda fundición. La fundición de aluminio secundario implica su producción a partir de materiales usados de dicho metal, los que son procesados para recuperar metales por pretratamiento, fundición y refinado.

El procesamiento de aluminio secundario tiene una gran importancia debido a que se puede llevar a cabo sin pérdida de la calidad del producto final. Además, en comparación con la producción del aluminio primario, en este proceso de reciclaje se consume del 5% al 20% de la energía necesaria en el proceso de producción primaria, haciendo que el uso del aluminio tenga un mayor sentido económico, técnico y ambiental. El aluminio secundario, constituye en la actualidad un tercio del aluminio total que se consume en el mundo (Gil, 2006).

La principal característica de la producción de aluminio secundario es la diversidad de materias primas y la variedad de hornos que se pueden emplear para su procesamiento. El tipo de materia prima y su pretratamiento determina la elección del tipo de horno a utilizar. El horno de fundición más utilizado en la industria del aluminio es el horno rotatorio porque es el que mayor diversidad de materias puede reciclar (Gil, 2006).

El proceso de producción de aluminio secundario se puede resumir como se muestra en la Figura 2-1.



Figura 2-1 Procedimiento general de producción de aluminio secundario (Gil, 2006)

El aluminio destinado al reciclaje se puede dividir en dos categorías:

- a. **Subproductos de la transformación del aluminio:** tienen su origen en el proceso de fabricación de materiales de aluminio, entre estos se pueden mencionar los productos fuera de especificación como perfiles, envases, viruta, recortes, piezas moldeadas, etc. La principal ventaja de este tipo de materia prima es que se conoce su calidad y su composición, facilitando su clasificación y permitiendo que se realice la fundición sin que haya que realizar un proceso de pretratamiento.



Figura 2-2 Chatarra nueva, perfiles de aluminio para reciclaje

- b. Chatarra usada:** es material de aluminio proveniente de artículos de aluminio ya producidos, usados y/o desechados al final de su ciclo de vida (cables, electrodomésticos usados, radiadores, latas de bebidas, etc.). Este tipo de chatarra de aluminio va a los recicladores tras un gran número de procesos de separación, debido a que suele encontrarse unido a otros materiales, siendo necesarios su tratamiento y separación previa.



Figura 2-3 Chatarra usada de aluminio

2.1 Pretratamiento de materia prima para fundición de aluminio secundario.

Para el procesamiento del aluminio secundario es necesario realizar una serie de actividades cuya configuración varía dependiendo de la naturaleza de la materia prima (materiales de aluminio a reciclar) y su calidad, especificaciones de producto final que se desee obtener, equipos auxiliares disponibles, y diseño del horno de fundición.

Para el desarrollo de este proyecto de investigación, los materiales de aluminio a reciclar se clasifican como subproductos del procesamiento de aluminio, específicamente chatarra nueva, por lo que no se realizó ningún tipo de proceso de pretratamiento para su refundición (Ver sección 2.1.2).

2.1.1 Inspección y Clasificación de materiales para fundición de aluminio secundario.

El objetivo principal de someter el material de aluminio a un proceso previo de inspección y clasificación es identificar y separar todo el material de aluminio que no requiere otro tratamiento previo, sino que se encuentra limpio y puede ser almacenado o alimentado directamente al horno de fundición. Además de separar otros materiales como plástico, hierro, acero inoxidable, cinc y latón libres, que se consideran contaminantes.

La materia prima se inspecciona y clasifica tomando en cuenta su tamaño, cantidad de impurezas visibles que no se puedan separar manualmente, naturaleza de la materia prima, y otros aspectos que se consideren convenientes, el Cuadro 2-1 muestra la descripción de la clasificación de los materiales a reciclar. Éste proceso de inspección y clasificación se realiza de forma manual, con operarios previamente entrenados.

Cuadro 2-1 Descripción de la clasificación de materia prima para segunda fundición de aluminio.

Categoría	Clasificación	Descripción
Subproducto de la Transformación del Aluminio	Chatarra nueva	Tiene su origen en el proceso de fabricación de materiales de aluminio, entre estos se pueden mencionar los productos fuera de especificación como perfiles, envases, viruta, recortes, piezas moldeadas, etc. Este tipo de material permite que se realice la fundición sin que haya que realizar un pretratamiento.
	Residuos	A esta clasificación corresponden aquellos materiales residuales de la transformación del aluminio, entre éstos se pueden mencionar las escorias frías y escorias calientes y otros residuos de fundición.
Chatarra Usada	Chatarra usada	Es material de aluminio contaminado con otros materiales como hierro, acero inoxidable, cinc, latón o plástico, el cual será separado de sus impurezas mediante su pretratamiento correspondiente, ver sección 2.1.3.
	Cables	Este tipo de materiales se separan debido a que requieren un pretratamiento específico, para separar el alma de hierro y el forro de plástico.
	Virutas	Material de tamaño relativamente pequeño, con forma de lámina curvada o espiral, que es extraído mediante un cepillo u otras herramientas, tales como brocas, al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación.
	Chatarra con alto contenido de hierro	Chatarra, piezas de fundición y escoria de aluminio con alta proporción de hierro.
	Papel aluminio	Hojas delgadas de aluminio de un grosor inferior a 0,2 mm, siendo comúnmente laminado en combinación con otros materiales como plástico o papel.

Ref. (EFIG, 1995) (Gil, 2006) (Hwang, Huang, & Xu, 2006).

2.1.2 Pretratamiento de materiales para fundición de aluminio secundario

Todo el material de aluminio destinado al reciclaje debe sufrir un pretratamiento donde se eliminen contaminantes y se prepare el material para la fundición, permitiendo realizar un procesamiento más rápido y económico. Las principales actividades que comprende el pretratamiento de los materiales de aluminio a reciclar se muestran en la Figura 2-4 y se describen en la sección 2.1.3.

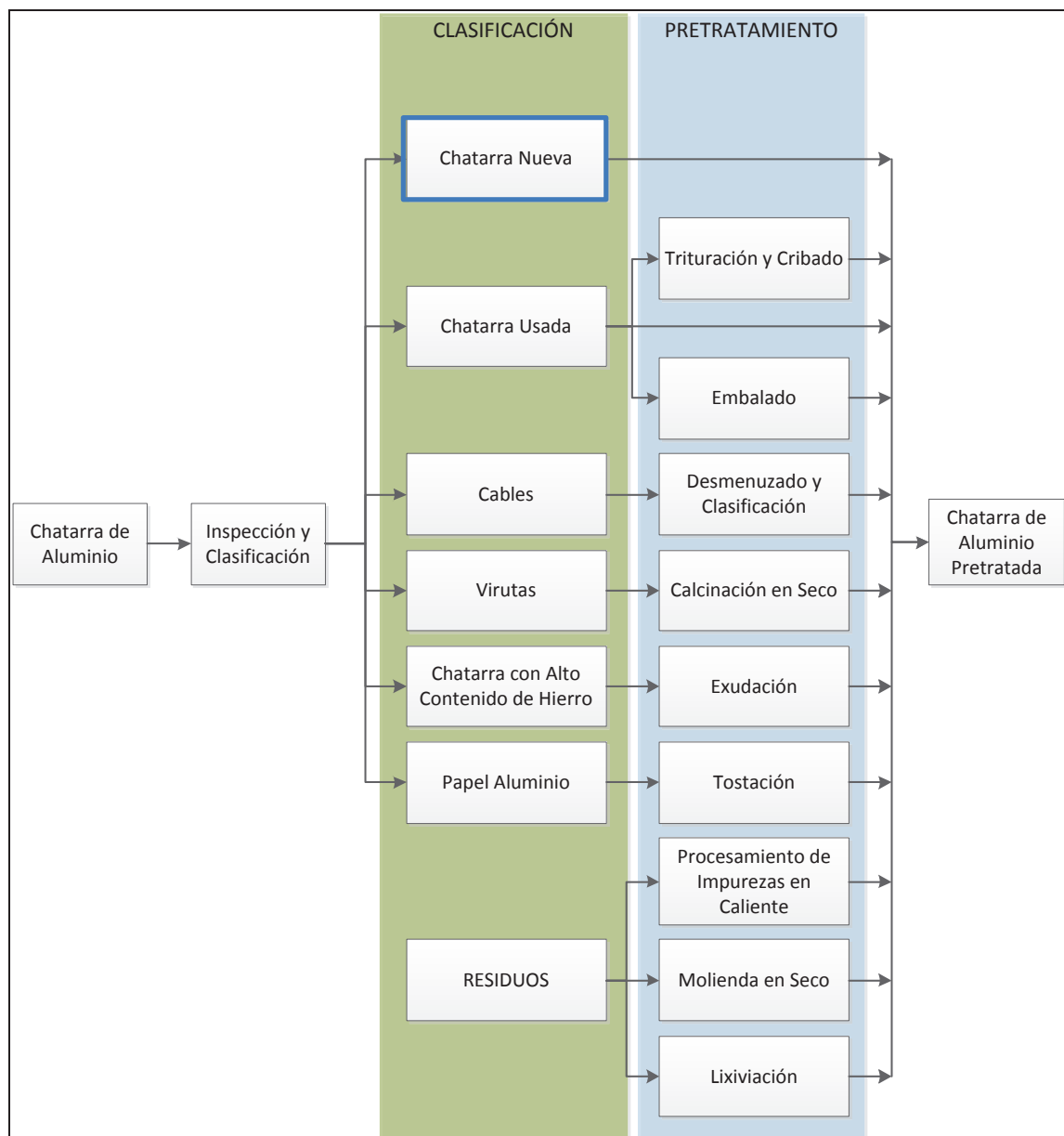


Figura 2-4 Diagrama del proceso típico de clasificación y pretratamiento para segunda fundición de aluminio (EFIG, 1995).

2.1.3 Descripción de procesos de pretratamiento de materiales para fundición de aluminio secundario.

Luego de clasificar los materiales a reciclar, se aplica el pretratamiento correspondiente a cada uno de los materiales, dichos procedimientos se describen en los numerales siguientes (OIT, 1998) (EFIG, 1995).

- a. **Trituración y Cribado:** El material se transporta a una trituradora o molino de martillos, donde el material se desmenuza y tritura, y el hierro se separa del aluminio. El material triturado se hace pasar por cribas vibrantes, con un tamaño de malla de 5 a 100 mm, para separar partículas finas e impurezas en forma de suciedad, plástico, metales como el hierro, y otros materiales.
- b. **Embalado:** Si el volumen de las piezas es demasiado grande, estas se pueden compactar utilizando un equipo de embalado especialmente diseñado al efecto y de esta manera transportarlo con seguridad. Generalmente estos equipos brindan una presión máxima de 2000 psi.
- c. **Desmenuzado y Clasificación:** El cable de aluminio puro, con refuerzo o aislamiento de acero, se corta con cizallas, después de lo cual se granula o se reduce a fragmentos aún más pequeños en molinos de martillos para separar del aluminio el alma de hierro y el forro de plástico.
- d. **Calcinación y secado:** El material de aluminio como virutas de taladrado y torno, se tratan previamente para eliminar los aceites de corte, grasas, humedad y hierro libre. La humedad y los materiales orgánicos se volatilizan en un secador rotativo, los fragmentos secos se criban para eliminar las partículas finas de aluminio, el material restante se trata magnéticamente para separar el hierro, y las virutas limpias y secas se clasifican en cajas de piezas.
- e. **Procesado de impurezas calientes:** Se puede separar el aluminio de las impurezas calientes descargadas del horno de afino, mediante tratamiento en lotes por fundente, con una mezcla de sal y criolita. Este proceso se lleva a cabo en una cuba con revestimiento refractario y rotación mecánica. Periódicamente se drena el metal a través de un orificio existente en la base de la cuba.

- f. Molturación en seco:** En el proceso de molturación en seco, la escoria fría cargada de aluminio y otros residuos se procesa mediante molturación, cribado y concentración hasta obtener un producto que contiene de un 60% a un 70 % de aluminio como mínimo. Para reducir los óxidos y los materiales no metálicos a polvo fino pueden utilizarse molinos de bolas, de varillas o de martillos. La suciedad y otros materiales no recuperables se separan del metal mediante cribado, clasificación por corriente de aire o separación magnética.

- g. Tostación:** En el proceso de tostación, los materiales carbonosos asociados con las hojas de aluminio se tuestan y después se separan del producto metálico.

- h. Exudación de aluminio:** La exudación es un proceso pirometalúrgico que se utiliza para recuperar el aluminio de la chatarra con alto contenido de hierro. Son materias primas para este proceso la chatarra, piezas de fundición y escoria de aluminio con alta proporción de hierro. La separación se produce al fundirse el aluminio y otros constituyentes de bajo punto de fusión, con lo cual escurren por la solera y pasan por una rejilla a moldes refrigerados por aire, cubos de recogida o pozos de retención. Los materiales con punto de fusión más alto, como el hierro, latón y productos de la oxidación formados durante el proceso de exudación, se extraen periódicamente del horno mediante sangrado.

2.2 Fundición de materiales de aluminio

Todo el material pre-tratado se somete a un proceso de fundición y refinado, seleccionado a partir de la naturaleza del material a procesar. El horno más utilizado en la industria del aluminio es el horno rotatorio, porque es el que mayor diversidad de materiales puede reciclar. Así, por ejemplo, pueden ser recicladas escorias de primera y segunda fusión y espumas de aluminio. En él la materia prima de aluminio se funde bajo una capa de sal (fundente), consistente de modo general, en una mezcla de aproximadamente 30% de KCl y 70 % de NaCl. La temperatura de trabajo oscila cerca de los 850°C (Gil, 2006).

Los procesos de fundición y fusión que se consideran como Mejores Técnicas Disponibles (MTD) son el horno de reverbero, el horno rotatorio basculante, el horno rotatorio, o el horno de inducción Meltower, según los materiales de alimentación. Ver Cuadro 2-2.

Cuadro 2-2 Hornos considerados como Mejores Técnicas Disponibles para producción de aluminio secundario.

Horno	Recolección de Gas	Ventajas	Desventajas	Comentarios
Horno de reverbero	Semicerrada.	Gran capacidad de metal.	Baja eficacia, material de alimentación limitado.	Uso de sistema de carga cerrado (carro de carga).
Horno de reverbero con pozo lateral / pozo de carga	Semicerrada.	El pozo de carga permite una recuperación eficaz del material. Gran rango de material de alimentación.	Baja eficacia térmica.	Uso de sistema de carga cerrado (carro de carga).
Horno rotatorio	Semicerrada.	No hay restricciones de material. Buena eficacia térmica.	Uso relativamente alto de escoria salina.	Extracción de vapores focalizada.
Horno rotatorio basculante	Semicerrada.	Eficaz para material de baja calidad, incluidas escorias superficiales. Buena eficacia térmica.	Capacidad de metal limitada.	Mínimo uso de fundente salino en comparación con el horno rotatorio fijo.
Horno de inducción	Abierta, con campana	No hay gases de combustión.	Limitación de capacidad de metal y de material de alimentación.	Útil para cargas pequeñas de metal limpio.
Horno de cuba (Meltower)	Semicerrada.	Pre calentamiento de la carga.		Para metal limpio.

Ref. (BREF, 2001)

Las tecnologías empleadas en los procesos de fundición, se describen en las secciones 2.2.1, 2.2.2 y 2.2.3 (BREF, 2001).

2.2.1 Horno de reverbero o de inducción.

En la producción secundaria de aluminio, la chatarra puede ser fundida en hornos de reverbero, a base de gas o petróleo, de 13.000 a más de 45.000 kg de capacidad. El nombre reverbero deriva de la consideración de que reverbera de calor (irradia) desde el techo y las paredes del horno en el baño de metal fundido (Tsakiridis, 2012). El modo de transferencia de calor principal es a través de la radiación de las paredes de ladrillo refractario para el aluminio, pero la transferencia de calor por convección también proporciona un calentamiento adicional del quemador al aluminio. En términos generales son hornos de estructura cúbica en el que se alimenta por la parte superior el material de aluminio a reciclar, de manera que con las corrientes convectivas que se generan en el interior del horno, el material llega al fondo del horno prácticamente sinterizado. Los residuos generados corresponden a escorias y polvos de filtro de mangas (ver Figura 2-5).

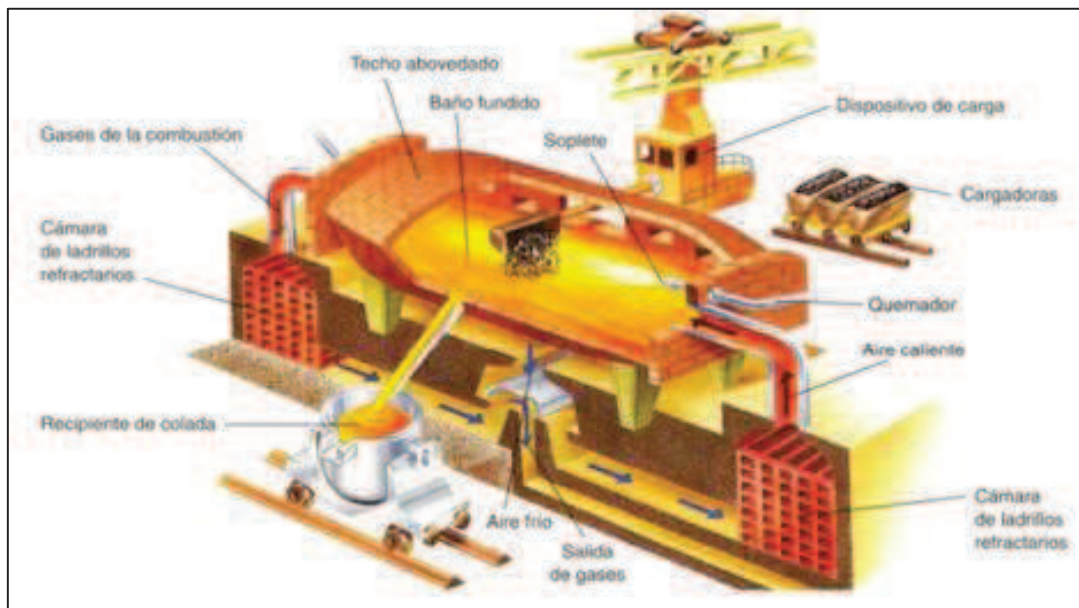


Figura 2-5 Esquema ilustrativo de un horno reverbero

Los hornos de reverbero son de poca altura y gran longitud. En uno de los extremos se encuentra el hogar donde se quema el combustible, y en el extremo opuesto la chimenea. Las llamas y productos de la combustión atraviesan el horno y son dirigidos, por la bóveda de forma adecuada hacia la solera del horno, donde está situada la carga del metal que

se desea fundir. Esta carga se calienta, no solo por su contacto con las llamas y gases calientes sino también por el calor de radiación de la bóveda del horno de reverbero.

La superficie de la solera es aproximadamente tres veces mayor que la de la parrilla y sus dimensiones oscilan entre un ancho de 150 a 300 cm. y una longitud de 450 a 1500 cm. La capacidad de los hornos de reverbero es muy variable y oscila entre los 45 kg. a los 1000 kg. para hornos de fusión de metales no férreos, hasta las 80 Tm. en hornos empleados para la fusión de la fundición de hierro.

Los hornos de reverbero típicos de aluminio presentan una eficiencia energética (relación de la cantidad de calor absorbido por la materia prima a la cantidad de calor del combustible total consumido) del 15% al 39%, que puede ser aumentada (15%) por recuperación. Las principales ventajas proporcionadas por hornos de fusión reverbero, son la tasa de volumen de procesamiento, y los bajos costos de operación y mantenimiento. Sus desventajas son las altas tasas de oxidación de metal, baja eficiencia y requerimientos de grandes espacios.

2.2.2 Horno rotativo

Los hornos rotatorios de fusión se utilizan para fundir chatarra de aluminio y materiales que contienen aluminio. Su capacidad de fusión varía de 0.5 a 0.7 toneladas por hora. Las temperaturas típicas de fusión son alrededor de 700 a 750°C. Durante una operación normal, los gases residuales normalmente tienen temperaturas de 1000°C. La ventaja del horno rotativo es que incluso chatarra altamente contaminada puede ser fundida. Las desventajas de este tipo de hornos son la alta demanda de energía, porque además del metal, las sales de fundición también tienen que ser fundidas, adicionando costes por el tratamiento de la escoria salina. Dependiendo del tipo de horno rotativo utilizado y el tipo de chatarra que se funde, hasta 500 kg de escoria salina pueden ser generadas, en la producción de una tonelada de aluminio metálico secundario.

Generalmente son hornos de estructura cilíndrica que gira mientras ocurre el proceso de fusión. Se pueden producir pequeñas explosiones en el interior debido a la presencia de aceites, etc. Los residuos generados son escorias salinas y polvos de filtro de mangas.

Los hornos rotativos están formados por una envoltura cilíndrica de acero, de eje sensiblemente horizontal, que termina con dos troncos de cono, uno en cada extremo (ver Figura 2-6). En uno de los extremos está situado el quemador y en el otro la salida de los gases quemados, que generalmente pasan por un sistema de recuperación de calor para precalentar el aire de soplado antes de ser evacuados por la chimenea. Todo el interior del horno está revestido con un material refractario. El combustible puede ser gasoil o carbón pulverizado.

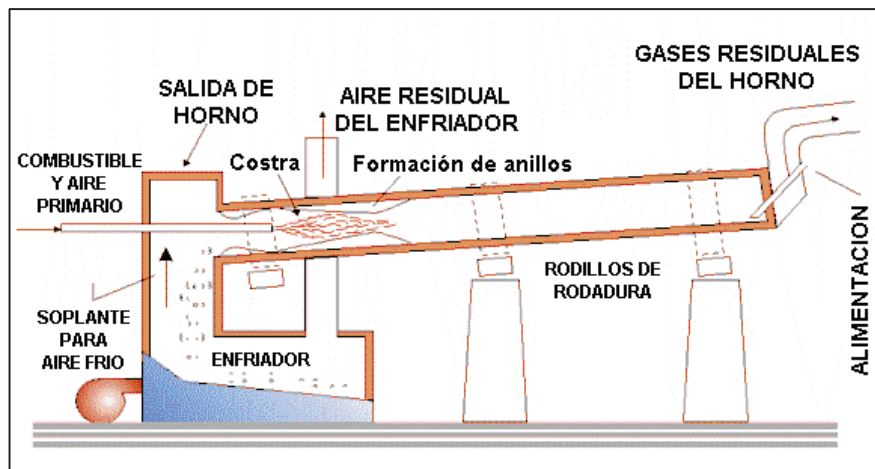


Figura 2-6 Esquema ilustrativo de un horno rotatorio

Los hornos rotativos se han considerado como hornos de reverbero perfeccionados, ya que además de calentarse la carga por el contacto de las llamas y gases y por la radiación de la bóveda caliente, se calienta también por el contacto directo con la parte superior del horno, que al girar queda bajo la carga. Con esto se consigue un notable acortamiento del tiempo de fusión, pues se logra evitar el efecto aislante de la capa de escorias, que flota sobre el baño, que en los hornos de reverbero ordinarios dificulta el calentamiento de la masa del metal.

También se construyen hornos oscilantes que no llegan a girar, sino solamente oscilar de un lado a otro. Los hornos rotativos se emplean para fundir toda clase de metales y aleaciones, como cobre, bronce, latón, aluminio, fundiciones, maleables, aceros, etc.

2.2.3 Horno de crisol basculante

El proceso de fundir los metales en crisol es uno de los más antiguos y sencillos. Se emplea todavía mucho en la funderías modernas, y probablemente se seguirá usando porque el costo inicial es barato y el metal se funde fuera del contacto con el combustible, y por tanto, no se altera su composición por efecto de los gases producidos en la combustión. La estructura total del horno puede inclinarse alrededor de un eje horizontal para efectuar la colada sin tener que recurrir a la extracción del caldo del crisol mediante cucharas introducidas en él. El horno no es más que una carcasa de acero suave revestida con materiales refractarios, en forma de ladrillos o apisonados. Suelen ser cilíndricos como en el que se muestra en la Figura 2-7.

Cuando se encienden los hornos de crisol basculantes se calienta el crisol vacío, al principio suavemente, con la menor llama posible que puedan dar los quemadores durante los primeros 10 min. Después se aumenta por etapas la velocidad de calentamiento hasta, que el crisol se ponga al rojo, en cuyo momento se le carga y se pone el quemador al máximo. El tiempo necesario para llevar los crisoles al rojo debe ser de, aproximadamente 45 min para capacidades de hasta 225 Kg. de aluminio y de 75 minutos para 450 Kg. de aluminio.



Figura 2-7 Fotografía de un horno de crisol basculante

2.2.4 Proceso de fundición de aluminio secundario con adición de sales fundentes

El proceso de fusión de los materiales de aluminio, se lleva a cabo bajo una capa de sal, que absorbe los óxidos y los contaminantes de la chatarra y protege al aluminio fundido de pérdidas por oxidación. La capa de sal se compone principalmente de NaCl y KCl y alguna criolita adicional o CaF_2 . En el proceso de fundición con sales, el horno se carga con el material de aluminio a fundir y se añade un fundente salino (hasta 50% de la alimentación).

Cuando el metal entra en contacto con el aire, se forma óxido de aluminio en la superficie exterior de la masa fundida. La sal protege el metal de la atmósfera reactiva y facilita la aglomeración y separación del metal, aumentando con ello la recuperación de metales. También mejora la transferencia de calor al metal, previene la oxidación del metal y recoge los contaminantes, tales como óxidos, nitruros, carburos y otros contenidos en la chatarra o producidos por reacciones durante el proceso de fusión. Después de la fusión, el metal de aluminio y las escorias salinas son descargadas del horno.

Los componentes no metálicos de la mezcla cruda están completamente absorbidos por el fundente líquido, formando luego de la descarga y enfriamiento la llamada escoria salina o torta de sal. El óxido en la escoria (en la mezcla bruta) presenta la forma de una red continua, donde el aluminio permanece atrapado. El fundente líquido rompe dicho marco y facilita la fusión de aluminio en gotas que se hunden en el baño de aluminio. Los contaminantes orgánicos, después de su descomposición, normalmente dejan carbono en la escoria salina. Si hay insuficiente sal, alta de óxidos y otros contaminantes puede conducir a niveles de alta viscosidad en la sal fundida. Más escoria viscosa, mantiene las gotas de metal atrapadas, y conduce a una pérdida importante de metal en la práctica.

La elección de los tipos de fundentes a utilizar depende del tipo de materia prima y del horno disponible para la fundición, siendo su función múltiple (Gil, 2006):

- a. Permite la transferencia de calor al metal y contribuye a aislar el metal de la atmósfera, evitando su oxidación. Para que se pueda producir, es necesario que en el horno se alcance una temperatura suficiente para fundir la sal y que sobrenade en el metal.
- b. Tienen la misión de dispersar mecánicamente los óxidos y sustancias metálicas o no metálicas sólidas presentes en el horno.

- c. Algunos fundentes pueden reaccionar químicamente con los óxidos de aluminio, disolviéndolos.

Primero, se funde la sal en el horno de fundición y después se introduce la materia prima en el baño de sal. Una vez fundido, se extrae el metal y las escorias o mezcla de sustancias metálicas y no metálicas. La naturaleza y el enfriamiento que sufre en la extracción determinan su apariencia más inmediata (bloques, grandes trozos o polvo).

2.3 Proceso de fundición realizado para la investigación.

En El Salvador no se cuenta con las mejores técnicas disponibles para el procesamiento de aluminio secundario. El procedimiento de reciclaje de aluminio del cual se obtienen las muestras para la caracterización de la escoria salina, se lleva a cabo haciendo uso de un horno de crisol basculante. El procedimiento general aplicado se describe a continuación:

- a. El material a ser procesado en fundición es separado por lotes con calidades específicas, y se mide su peso.
- b. Se precalienta el material a reciclar, antes de ser colocado en el crisol. La temperatura de pre-calentamiento oscila entre 150°C- 250°C
- c. Durante el proceso de cargas parciales, llenado y carga total del crisol, se mantiene la temperatura en un intervalo de 680°C - 720°C.
- d. Se monitorea la temperatura por medio de dos tipos de controles: uno fijo y permanente en el crisol y otro portátil para controlar la temperatura de llenado de los moldes.
- e. El crisol, debe estar caliente al realizar cada carga, a una temperatura color rojo-cereza.
- f. Una vez completada la carga y el aluminio listo para ser colado (llenado) en los lingotes, este aluminio líquido debe ser vertido por completo.
- g. Se evacua del crisol el aluminio lo más rápido posible.
- h. Se utilizan filtros cerámicos para eliminar o minimizar el nivel de inclusiones del aluminio líquido
- i. Después de cada colada, la superficie interna del crisol debe quedar completamente limpia de escoria y óxidos.
- j. Para facilitar la limpieza el crisol, este deberá estar siempre bien caliente.

2.4 Residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario

Como en cualquier proceso de transformación de materiales, el procesamiento de aluminio secundario genera residuos y emisiones. Durante el proceso de segunda fusión a alta temperatura del aluminio, se pueden generar varios tipos de residuos (ver Cuadro 2-3) (Gil, 2006). Además el aluminio puede reaccionar con diferentes gases, como el oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y otros gases presentes en el aire, dando origen a diferentes compuestos metálicos, entre éstos: Oxido de Aluminio (Al_2O_3), Nitruro de Aluminio (AlN) y Carburo de Aluminio (Al_4C_3). Estos compuestos, en contacto con el agua, pueden a su vez generar emisiones gaseosas, tales como Amoniac (NH₃), Metano (CH₄) y Ácido Sulfhídrico (H₂S).

Cuadro 2-3 Residuos generados en el procesamiento de aluminio secundario

Residuo	Origen
Polvos de filtro de molienda	Pre tratamiento de escorias de aluminio
Polvos de filtro gases de horno	Horno de fundición
Espumas	Hornos que no utilizan sal
Escorias salinas	Fundición en horno de fundición

Ref. (Gil, 2006).

2.4.1 Escorias salinas de aluminio secundario

Se generan cuando se usan mezclas de sales como fundente para cubrir el material fundido y prevenir la oxidación, incrementar el rendimiento y aumentar la eficacia térmica. Dependiendo de la mezcla de materia prima y del tipo de horno utilizado, la cantidad de escorias salinas producidas por tonelada de aluminio secundario es muy variable, dependiendo de la pureza de la materia prima y de la cantidad de sales fundentes necesaria. El uso de sal fundente promueve la coalescencia de las gotas de metal suspendidas y ayuda a separar el metal limpio de la contaminación de óxido.

A altas temperaturas de metal fundido, las sales se funden y se vuelven oscuras. La cantidad de escorias salinas generada por tonelada de aluminio secundario producido, varía dependiendo de la chatarra de aluminio que se funde, generalmente oscila entre 200 a 500 kg.

Las escorias tienden a localizarse así:

- Sobre la superficie, flotando. Se tratará de fundentes menos densos que el aluminio y de metales ligeros y de óxidos no cristalinos y porosos que tienden a flotar, por la cantidad de gases que disuelven.
- En el fondo del horno, decantados. Serán metales pesados u óxidos cristalinos grandes y compactos, nucleando a compuestos de alto punto de fusión.
- Junto a las paredes del horno, formando costras.

Las diferentes familias y compuestos que habitualmente se encuentran en las escorias se incluyen en el Cuadro 2-4. La composición típica de las escorias salinas también se muestra en el Cuadro 2-5.

Cuadro 2-4 Familias y compuestos presentes en la escoria salina del procesamiento de aluminio secundario.

Familias	Compuestos Presentes
Metales libres	Al, Fe, Si, Cu, etc.
Óxidos metálicos	Al ₂ O ₃ , Na ₂ O, K ₂ O, SiO ₂ , MgO
Otros derivados	NaI, C ₃ Al ₄ , Al ₂ S ₃ , Si ₃ P ₄
Fundentes	NaCl, KCl, MgCl ₂ , NaF, AlCl ₃ , CaCl ₂ , CuCl ₂ , ZnCl ₂
Otras sales	Na ₂ SO ₄ , Na ₂ S, criolita
Otros elementos	C
Sustancias extrañas	Normalmente se incorporan una vez que la escoria ha salido del horno.

Ref. (Gil, 2006)

Cuadro 2-5 Composición típica de las escorias salinas del procesamiento de aluminio secundario

Compuesto	Composición (%)
Al metal	6 – 8
Al ₂ O ₃	40 – 45
KCl + NaCl	45 – 50
Otros Óxidos	4 – 7

Ref. (Prieto Iglesias, 2003).

2.4.2 Espumas de aluminio

Son los residuos procedentes de la fusión en hornos sin fundentes. Su composición es muy variable porque se generan en diferentes fases del ciclo del aluminio y depende del tipo de residuo que se funde:

- a. Refinerías de Aluminio: donde se funden chatarras y escorias para obtener un lingote y/o tocho de aluminio de la aleación deseada. Son escorias más pobres de aluminio, más contaminadas de hierro (libre y aleado) y otros elementos que reducen el rendimiento metálico de la escoria.
- b. Fundiciones de Aluminio: donde se funde el lingote y el tocho para convertirlo en piezas y materiales de todo tipo. Son escorias más ricas en aluminio, poco contaminadas y de alto rendimiento metálico. Son las que se pueden refundir en horno rotatorio con mayor aceptación.

2.4.3 Polvo de aluminio

Residuo procedente de la aspiración de las instalaciones de la fabricación y transformación de aluminio, así como de las instalaciones de molienda de las escorias, que son recolectados en los ciclones de alta eficacia y filtros de mangas que deben existir en todas las fábricas de este tipo. Es un polvo impalpable, menor de 100 micras. Su composición típica es bastante homogénea y se presenta en el Cuadro 2-6.

Cuadro 2-6 Composición típica de los polvos de aluminio generados por el procesamiento de aluminio secundario

Compuesto	Composición (%)
Al metal	9 – 14
Al ₂ O ₃	65 – 72
KCl + NaCl + KF	5 – 7
AlN	3 – 5
Otros Óxidos	4 – 7

Ref. (Prieto Iglesias, 2003)

2.5 Técnicas de disposición final de escorias salinas de aluminio secundario

En algunos estados miembros de la Unión Europea se lleva a cabo el tratamiento de las escorias salinas procedentes de la segunda fusión del aluminio con objeto de su posible valorización. En España, una empresa fundidora de aluminio, somete las escorias salinas a tratamientos mecánicos y electromagnéticos con los que consigue separar el aluminio y otros metales; el resto del residuo es dispuesto en vertedero controlado. En Alemania, otra empresa fundidora de aluminio, tras reducir el contenido de aluminio y otros metales, deposita el resto de residuo en vertederos de minas de sal (Gil, 2006).

En el proceso de valorización de las escorias salinas se obtienen tres subproductos: aluminio metálico, sales fundentes y óxidos (productos no metálicos). Se sabe que estos óxidos pueden comercializarse en diferentes industrias (cementeras, cerámicas, refractarias y construcción), aunque también hay informes de que, debido a que las características finales del mismo, no presentan una calidad adecuada para que su comercialización sea económicamente rentable, el destino final de este subproducto es su disposición en vertedero.

En las refinerías españolas, que utilizan mayoritariamente hornos rotatorios tradicionales de eje fijo, las escorias salinas generadas tratan de ser valorizadas empleando un tratamiento parecido al proceso Hanse, en el que la separación del aluminio en el flujo de material se realiza mediante trituración y cribado selectivo en la etapa seca. No hay constancia de que las diferentes fracciones que se obtienen, con excepción de la correspondiente al aluminio metálico, tengan un mercado real que haga económicamente viable el proceso de valorización.

En el caso de la empresa fundidora española, con objeto de minimizar la producción de residuos y reducir el impacto ambiental que pudiera producir su proceso, se han implantado las siguientes mejoras tecnológicas:

- a. Tecnología de Oxidación, con lo que reduce los consumos de energía;
- b. Pre tratamiento de materias primas, con lo que consigue la reducción del fundente y de los residuos

- c. Horno Rotatorio Basculante con capacidad para 18 toneladas, que reduce los consumos de sales fundentes y minimiza las cantidades de escorias salinas
- d. Tratamiento de las escorias salinas, separando los metales que contienen por procedimientos electromagnéticos antes de su vertido en depósito autorizado.

Hay que resaltar que estas mejores tecnologías le han permitido reducir en los últimos tres años el residuo generado por cada tonelada reciclada a menos de la mitad, resultados acordes con los principales objetivos marcados por la Unión Europea en materia de medio ambiente que son reducir los consumos de materiales y energía, así como reducir los residuos generados en origen.

En los Estados Unidos de Norteamérica, es a principios de los años noventa, a través de los laboratorios Argonne, Departamento de Energía y diferentes compañías (Alumitech Inc., Virginia Tech., Alcoa), cuando se toma conciencia del importante problema medio ambiental surgido por la acumulación de las escorias salinas generadas en los procesos de segunda fusión del aluminio.

Los estudios realizados por estos laboratorios concluyen que, para que el proceso de valorización de las escorias salinas sea económicamente factible, es necesario que se obtengan al mismo tiempo disoluciones concentradas de sal, reduciéndose el gasto por evaporación y cristalización posterior, y una fracción de productos no metálicos (NMP) relativamente libre de sales y de impurezas (inferior al 2%). Hay que resaltar que la composición de los NMP puede ser muy variable, en función del material reciclado, siendo difícil dar soluciones de recuperación genéricas.

En El Salvador no se ha realizado un estudio por medio del cual se conozca la composición de la escoria salina generada por la industria del aluminio secundario de El Salvador, ni las técnicas de disposición final que se aplican a los residuos generados por esta industria, por lo que es de gran importancia realizar un estudio que ayude a resolver dichas inquietudes y permita el desarrollo de alternativas de gestión apropiadas para las escorias salinas de aluminio secundario, tomando en cuenta las características específicas del residuo generado por la industria del aluminio en El Salvador.

Capítulo 3. Aspectos ambientales y efectos a la salud humana relacionados con la escoria salina de aluminio.

El procesamiento de aluminio secundario tiene gran importancia debido a que se puede llevar a cabo sin pérdida de la calidad del producto final. Además, en comparación con la producción del aluminio primario, en este proceso de reciclaje se consume entre el 5% al 20% de la energía necesaria en el proceso de producción primaria, y la cantidad de residuos producidos es mucho menor (Cuadro 3-1).

Todo ello ha hecho que en el último año se hayan producido en el mundo siete millones de toneladas de aluminio secundario. Sin embargo, los residuos y emisiones generadas, tienen un impacto sobre la salud humana y del medio ambiente, el cual debe ser considerado.

Cuadro 3-1 Comparación de los procesos primario y secundario en la producción de aluminio

Elemento de Comparación	Proceso Primario	Proceso Secundario
Consumo de energía primaria (GJ/t _{Al producido})	174	10
Emisiones a la atmósfera (kg/t _{Al producido})	204	12
Residuos sólidos (kg/t _{Al producido})	2100 – 3650	400
Consumo de agua (kg/t _{Al producido})	57	1.6

Ref. (Gil, 2006)

No obstante, la producción primaria juega un papel principal toda vez que la demanda de aluminio no puede ser satisfecha únicamente mediante producción secundaria. En este sentido, en Europa, el 35 % del aluminio empleado en la industria proviene del reciclaje. Comparando los procesos de producción de aluminio primario y secundario, el proceso secundario provoca un menor impacto ambiental que el primario:

- Consume 17 veces menos energía primaria
- Origina 17 veces menos emisiones a la atmósfera
- Genera entre 9 y 5 veces menos de residuos sólidos
- Consume 35 veces menos de agua

En los dos casos, es la generación de residuos en sus procesos de producción donde se origina una mayor problemática. Comparando la generación de residuos, en el proceso primario se producen los denominados barros rojos procedentes de la fusión alcalina de la bauxita, proceso Bayer¹. La composición y cantidad de residuo generado, así como sus propiedades físico-químicas, dependen del tipo de bauxita empleada, teniendo como componentes mayoritarios óxidos de hierro, aluminio, silicio y titanio, encontrándose también óxidos de zinc, fósforo, níquel y vanadio. La gestión de este residuo se lleva a cabo normalmente mediante vertido controlado, no habiéndose descrito aplicaciones económicamente viables o usos de este residuo (Gil, 2006)

Durante el proceso de segunda fusión del aluminio, se pueden generar varios tipos de residuos, los cuales ya se detallaron en la sección 2.4. De entre ellos, por la cantidad generada, destacan las escorias salinas.

3.1 Emisiones al aire por el procesamiento de aluminio secundario y disposición de residuos generados.

La principal preocupación ambiental de la industria del aluminio está relacionada con la producción de aluminio primario, donde gases de efecto invernadero, incluyendo dos perfluorocarbonos (PFC), CF_4 y C_2F_6 , se generan como consecuencia de la electrólisis. Ambos PFC tienen un potencial de calentamiento global mucho mayor que el CO_2 (PNUMA, 2005).

La producción de aluminio primario es intensiva de la electricidad, por lo tanto, las emisiones de CO_2 de la industria dependen en gran medida del combustible principal para la generación de electricidad. De acuerdo con un estudio de la Agencia Internacional de Energía (AIE), las emisiones totales de gases de efecto invernadero de la industria del aluminio fueron alrededor de 390 Mt de CO_2 equivalente en 1990 y disminuyó en un 7% en 1995, debido principalmente a la reducción de los procesos relacionados con las emisiones de PFC (Zheng & Soria, 2008).

¹Proceso Bayer se describe en la sección 1.5

Los aspectos ambientales relacionados con la producción de aluminio secundario son relativamente menos significativos. Sin embargo, las emisiones al aire consisten en partículas de trazas de metales, cloruros y clorhidratos, así como compuestos orgánicos peligrosos como las dioxinas. El tipo y la calidad de la chatarra tienen gran influencia en las emisiones al aire. Diversas técnicas, por ejemplo, campanas, filtros de mangas, ciclones, etc. se utilizan para capturar las emanaciones de gases y controlar las emisiones al aire para cumplir con las normas.

Para aluminio secundario, las emisiones primarias a la atmósfera se basan en las emisiones de:

- a. La recepción, almacenamiento, mezcla y muestreo de materiales.
- b. Los hornos de fundición, retención y refinado con la transferencia de metal asociada y sistema de manipulación y limpieza de gases calientes.
- c. Los sistemas de enfriamiento y manipulación de escorias y escorias superficiales.

Dentro de las emanaciones gaseosas más importantes, generadas como consecuencia de la mala disposición final de los residuos del procesamiento de aluminio secundario, se tienen el Amoníaco (NH_3), Metano (CH_4) y Ácido Sulfhídrico (H_2S), los efectos nocivos a la salud humana y al medio ambiente se resumen en el Cuadro 3-2.

Cuadro 3-2 Efectos nocivos a la salud humana y medio ambiente de las emanaciones gaseosas generadas por el procesamiento de aluminio secundario

Compuesto gaseoso	Efectos nocivos a la salud y medio ambiente
Amoniaco (NH ₃)	<p>Inhalación: A concentraciones elevadas se produce irritación de garganta, inflamación pulmonar, daño en las vías respiratorias, y ojos. A medida que aumenta la concentración puede llegar a producir edema pulmonar, o producir la muerte cuando supera las 5000 ppm.</p> <p>Contacto con la piel: El amoniaco gaseoso puede producir irritación de la piel, sobre todo si la piel se encuentra húmeda. Se puede llegar a producir quemaduras y ampollas en la piel al cabo de unos pocos segundos de exposición con concentraciones atmosféricas superiores a 300 ppm.</p> <p>Ingestión: Este compuesto es gaseoso en condiciones atmosféricas normales siendo poco probable su ingestión. Sin embargo; de ocurrir ésta, puede causar destrucción de la mucosa gástrica, provocando severas patologías digestivas; pudiendo causar inclusive la muerte.</p>
Metano (CH ₄)	<p>El metano es ampliamente conocido por ser un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global del planeta, ya que aumenta la capacidad de retención del calor por la atmósfera.</p> <p>La exposición crónica incluso a bajos niveles de metano puede causar dolores de cabeza y síntomas como de gripe. Puede desarrollar reacciones respiratorias y alérgicas debido a exposiciones cortas y más graves problemas de salud (por ejemplo, problemas respiratorios, cardiovasculares, reproductivos y cáncer) debido a exposiciones más largas. El metano es inflamable y es un asfixiante.</p>
Ácido Sulfhídrico (H ₂ S)	<p>Es un gas inflamable, incoloro con un olor característico a huevos podridos. Se lo conoce comúnmente como ácido hidrosulfúrico o gas de alcantarilla. La gente puede detectar su olor a niveles muy bajos. Es uno de los principales compuestos causantes de las molestias por malos olores. Es extremadamente nocivo para la salud, bastan 20-50 ppm en el aire para causar un malestar agudo que lleva a la sofocación y la muerte por sobreexposición. Debido a su toxicidad, está ubicado directamente abajo del ácido cianhídrico (HCN).</p>
Dioxinas (PCDF y PCDD)	<p>La exposición breve del ser humano a altas concentraciones de dioxinas puede causar lesiones cutáneas, tales como acné clórico y manchas oscuras, así como alteraciones funcionales hepáticas. La exposición prolongada se ha relacionado con alteraciones inmunitarias, del sistema nervioso en desarrollo, del sistema endocrino y de la función reproductora. La exposición crónica de los animales a las dioxinas ha causado varios tipos de cáncer.</p>

3.2 Consumo de energía en el procesamiento de aluminio secundario

El refinado de alúmina requiere principalmente de energía térmica para la digestión y calcinación de la bauxita, el procesamiento de aluminio secundario requiere sólo del 5% al 20% de la energía usada para fabricar aluminio a partir de su mineral principal Bauxita. Por este motivo, aproximadamente el 31% de todo el aluminio producido en los Estados Unidos proviene de chatarra reciclada y el 75% de todo el aluminio producido desde 1888 está todavía en uso hoy en día (Zheng & Soria, 2008).

El proceso de reducción de alúmina en aluminio es intensivo de la electricidad. La eficiencia de la mayoría de las fundiciones en la actualidad oscila entre 13 y 16 MWh por tonelada de aluminio, lo que ha mejorado en casi un 100% desde 1945 (20-25MWh/Ton). Como ejemplo, la Figura 3-1 se muestra un desglose estimado del consumo de energía en los EE.UU. por tonelada de aluminio.

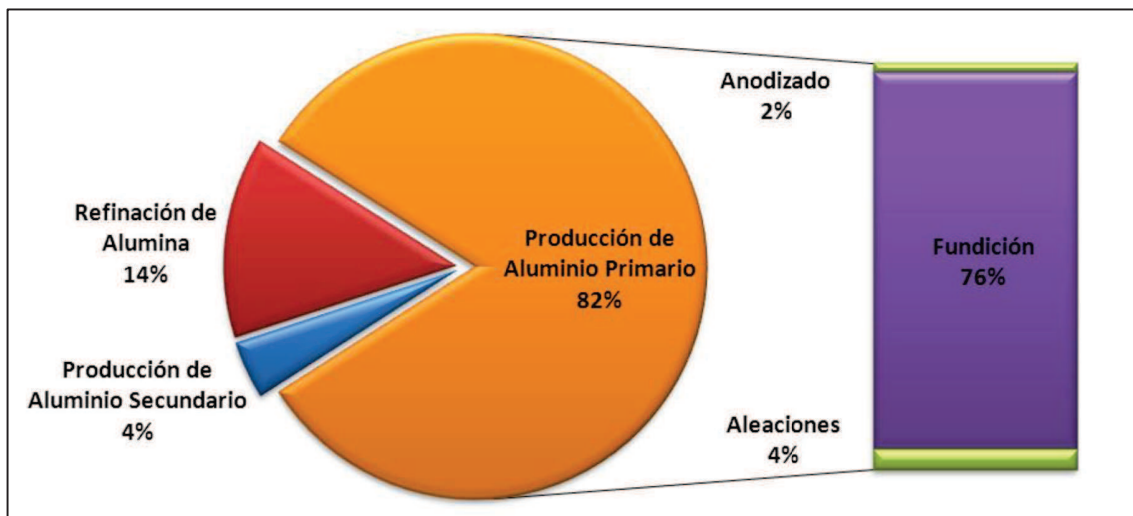


Figura 3-1 Uso de energía por el procesamiento de aluminio (Zheng & Soria, 2008).

En el año 2001 el consumo mundial total de energía de todas las fundidoras primarias fue de 350GWh, de los cuales el 28% fue auto-generada, sin embargo, el porcentaje osciló entre el 0% en África y 95% en el sureste de Asia. Las fuentes de electricidad para los miembros del Instituto Internacional del Aluminio (IAI), que en total representan más del 70% de la producción primaria del mundo, se ilustra en la Figura 3-2.

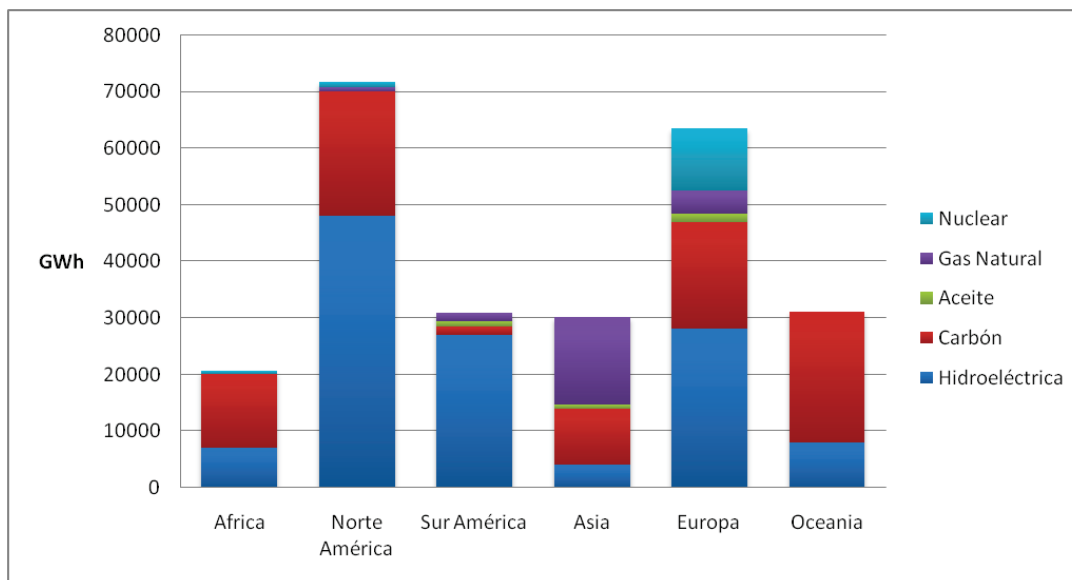


Figura 3-2 Fuentes y uso de electricidad para producción primaria de aluminio (Zheng & Soria, 2008)

3.3 Contaminantes en los vertidos líquidos por el procesamiento de aluminio secundario y disposición de residuos generados.

Para aluminio primario y secundario, las emisiones totales al agua se basan en:

- a. La producción de alúmina.
- b. El sistema de almacenamiento del material.
- c. El sistema de lavado si se utiliza.
- d. El sistema de tratamiento de aguas residuales y el agua de circulación.

El uso de agua es mínimo, ya que los procesos son esencialmente secos aparte de los sistemas de lavado húmedo.

El tipo de disposición final de los residuos generados determina el aspecto ambiental que sufrirá mayores efectos nocivos. Para el caso del agua, los efectos nocivos más importantes corresponden a:

- a. Contaminación de mantos acuíferos subterráneos, por lixiviación de escorias salinas vertidas a cielo abierto.

- b. Contaminación de aguas superficiales, por presencia de metales utilizados en el proceso productivo, como aluminio, cobre, cinc, níquel, hierro, manganeso, y otros.
- c. Contaminación de mantos acuíferos, por presencia de compuestos como azufre en forma de sulfato o sulfito, nitrógeno amoniacal, flúor y Demanda Bioquímica de Oxígeno, por mencionar algunos.

Además, de los efectos nocivos al medio ambiente, se suman los efectos nocivos a la salud humana, resultados de la presencia en exceso de estos compuestos en el agua, dentro de los cuales se pueden mencionar Alzheimer, ceguera, amnesia, raquitismo, miastenia o hasta la muerte.

3.4 Efectos nocivos sobre los suelos por la disposición de residuos del procesamiento de aluminio secundario.

A menudo, la disposición final de los residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario, consiste en su vertido a cielo abierto. El residuo más importante de este proceso son las escorias salinas, las cuales, como se detalló en la sección 2.4.1, se componen de una gran cantidad de sales.

El exceso de sales en los suelos tiene efectos nocivos sobre los cultivos. La concentración de sales eleva la presión osmótica del suelo y, en consecuencia, el agua menos concentrada contenida en los jugos celulares de las plantas tiende a salir hacia la solución del suelo para igualar ambas concentraciones. Como resultado, las plantas sufren estrés hídrico, se secan a pesar de que el suelo contenga agua y terminan muriendo. En otras ocasiones, las plantas realizan una adaptación osmótica que les permite seguir absorbiendo agua pero que requiere un consumo energético que se realiza a costa de un menor crecimiento.

Otros atribuyen la inhibición del crecimiento a que las sales afectan la división celular y producen un engrosamiento de las paredes celulares, impidiendo el crecimiento de forma irreversible aunque se produzca el ajuste osmótico o disminuya la salinidad del suelo.

En cualquier caso, el proceso de salinización aumenta la concentración de algunos iones que pueden resultar tóxicos para las plantas o que pueden provocar desequilibrios en el metabolismo de nutrientes. Además, en suelos sódicos la destrucción de la estructura puede favorecer el sellado y encostramiento del suelo y la disminución de la conductividad hidráulica.

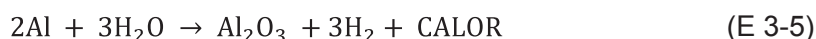
3.5 Reacciones químicas relacionadas con la disposición en vertedero de la escoria salina.

La eliminación de escorias salinas es un problema mundial. En el caso de la eliminación inadecuada, la lixiviación de los iones metálicos tóxicos en el agua subterránea podría causar serios problemas de contaminación. El problema principal es su lixiviación y su alta reactividad con agua o humedad, incluso en el aire, que conduce a la formación de gases tóxicos, nocivos, explosivos, venenosos olorosos y desagradables, tales como NH₃, CH₄, PH₃, H₂ y H₂S. Las emisiones gaseosas de la escoria salina que se derivan de contacto con el agua son de gran preocupación para el medio ambiente. Los efectos sobre la salud humana y el medio ambiente se describen en las secciones 3.1, 3.3 y 3.4.

El gas de amoníaco se produce a partir de la hidrólisis de nitruros (aumento del pH) presentes en la escoria salina (Tsakiridis, 2012).

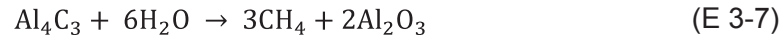


El amoníaco es fácilmente soluble en agua, aumentando simultáneamente su valor de pH de hasta 9 o más. El olor a gas amoníaco (NH₃), cerca de un vertedero es evidencia de la problemática que el ambiente es alcalino. El pH elevado disuelve la película de alúmina sobre la superficie de las partículas de aluminio no recuperado y el hidrógeno se genera a partir de la hidrólisis de aluminio metálico.

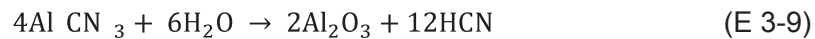
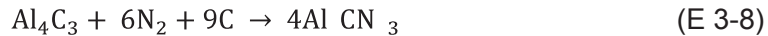




El metano se genera a través de la reacción de Al_4C_3 con agua. La cantidad de metano evolucionado a partir de la escoria salina, es un indicador cuantitativo para su contenido de carburo de aluminio.



En los casos de aumento de la presión y la temperatura (dentro de los vertederos) se puede producir cianuro de aluminio, debido a la presencia de carburos de aluminio. La hidrólisis de cianuro de aluminio podría dar lugar a la generación de HCN.



Finalmente, con la excepción de carburo de aluminio y nitruros, el fosfuro de aluminio y sulfuro rápidamente puede reaccionar con el agua, incluso con la humedad del aire.



Como resultado, cuando la escoria salina de aluminio es dispuesta en vertederos de residuos peligrosos, la contaminación del agua subterránea (por ejemplo: F^- , Cl^- , NH_4^+ , CN^- , pH alto) y el aire (por ejemplo: CH_4 , H_2 , NH_3) puede ser observado.

Capítulo 4. Marco legal sobre la disposición de residuos del procesamiento de aluminio secundario

Las normativas de El Salvador no incluyen una legislación específica aplicable a los residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario. Sin embargo, existe un **Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos** en el que se instituyen disposiciones generales para regular la Ley del Medio Ambiente, en lo que se refiere a las actividades relacionadas con este tipo de materiales, y en cuyo artículo 17 establece que “Los generadores de residuos peligrosos, así como las personas naturales o jurídicas que usen, generen, recolecten, almacenen, reutilicen, reciclen, comercialicen, transporten o realicen tratamiento de dichos residuos, serán responsables del cumplimiento de las disposiciones de la Ley, de este Reglamento y de las reglas técnicas que de él se deriven, estando obligados a determinar su peligrosidad y a registrarse en el Consejo, así como a mantenerse actualizados en dicho Registro.”

En esta sección se presenta el régimen jurídico aplicable a la gestión de los residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario, específicamente a la escoria salina de aluminio.

Hasta el año 2012, no se conocen los procedimientos de tratamiento o disposición final de los residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario, aplicados en El Salvador, no obstante se tiene información sobre estudios realizados en otros países, que indican los lineamientos generales internacionales aplicables a la gestión de estos residuos. Además se tienen convenios internacionales relacionados en la materia, ratificados por El Salvador, los cuales deben considerarse dentro del marco legal en cuestión.

El Cuadro 4-1 muestra un resumen del marco legal aplicable al proyecto, haciendo mención de la legislación y articulado aplicable.

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos Y Desechos Peligrosos	MARN	<p>Todo el documento</p> <p>Decreto N° 41 Art. 3: “Un Residuo Peligroso es aquel Material que reviste características peligrosas, que después de servir a un propósito específico todavía conserva propiedades físicas y químicas útiles, y por lo tanto puede ser reusado, reciclado, regenerado o aprovechado con el mismo propósito u otro diferente”.</p>	<p>Las disposiciones del reglamento tienen por objeto regular la Ley del Medio Ambiente, en lo que se refiere a las actividades relacionadas con sustancias, residuos y desechos peligrosos, regular la introducción, tránsito, distribución y almacenamiento de sustancias peligrosas, y dictar medidas que minimicen los riesgos de la contaminación por sustancias, residuos y desechos peligrosos. Por lo que todo el documento tiene aplicación al proyecto en cuestión.</p> <p>La escoria salina es un residuo que conserva propiedades físicas y químicas útiles, sin embargo, el procesamiento para ser reusado, reciclado, regenerado o aprovechado, genera subproductos con características peligrosas como lo es el polvo de aluminio, por esta razón se considera un residuo peligroso. Además la escoria salina, por su alto contenido de sales puede ser lixiviada por agentes atmosféricos y contaminar suelos y mantos acuíferos, representado un peligro para la salud del medio ambiente.</p>

MARN: Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos Y Desechos Peligrosos	MARN	Decreto N° 41, Art. 21: “Los generadores de residuos peligrosos deberán fomentar su minimización en el sector productivo, como política aplicable a sus actividades, a través del uso de tecnologías que reduzcan la generación de residuos peligrosos, así como a través del desarrollo de actividades y procedimientos que conduzcan a una gestión sostenible de los residuos mencionados y a la difusión de tales actividades”.	Como parte de la responsabilidad social y ambiental, todo generador de residuos debe buscar las mejores técnicas disponibles para aplicar a su proceso productivo en la medida de lo posible, buscando la minimización de la generación de residuos en la fuente. Como parte de este trabajo de investigación se describen las mejores técnicas disponibles para el procesamiento de aluminio secundario en la sección 2.2.
Convenio de Estocolmo	MARN	Todo el documento	El convenio de Estocolmo es un tratado destinado a restringir y, eliminar la producción, utilización, emisión y almacenamiento de una clase de sustancias en particular, denominadas Contaminantes Orgánicos Persistentes (COP). Entre los COP, el convenio abarca dos familias de subproductos químicos no deliberados, las dioxinas policloradas y los furanos, Los cuales resultan de la combustión y de los procesos industriales tales como la elaboración sustancias cloradas.

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Convenio de Estocolmo	MARN	Anexo C, Parte II	Hace referencia específica al procesamiento de aluminio secundario, catalogándolo como fuente no intencional de COP, a partir de procesos térmicos que comprenden materia orgánica y cloro, como resultado de una combustión incompleta o de reacciones químicas, haciendo mención de su potencial de formación y liberación relativamente elevada de estos productos químicos al medio ambiente.
Convenio de Basilea	MARN	Todo el documento	El Convenio de Basilea es el tratado mundial de medio ambiente de los desechos peligrosos y otros desechos, que se usa más exhaustivamente. Su objetivo es proteger el medio ambiente y la salud humana contra los efectos nocivos derivados de la generación, manejo, movimientos transfronterizos y eliminación de los desechos peligrosos y otros desechos, de acuerdo con este, las “operaciones de eliminación” abarcan tanto operaciones que tienen como resultado la eliminación final como las que dan lugar a la recuperación, reciclado, regeneración y reutilización.

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
<p>Convenio de Basilea</p>	<p>MARN</p>	<p>Artículo 1 Serán “desechos peligrosos”, los desechos que sean objeto de movimientos transfronterizos, que pertenezcan a cualquiera de las categorías enumeradas en el Anexo I (Categorías de desechos que hay que controlar), a menos que no tengan ninguna de las características descritas en el Anexo III (Lista de características peligrosas); y los desechos no incluidos, pero definidos o considerados peligrosos por la legislación interna de la Parte que sea Estado de exportación, de importación o de tránsito.</p>	<p>En el Cuadro 4-2 se resume el Listado de Características Peligrosas consideradas en el Convenio de Basilea, que presenta el residuo en estudio.</p>

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Convenio de Basilea	MARN	Artículo 4	Los generadores de desechos peligrosos deberán fomentar su minimización en el sector productivo, como política aplicable a sus actividades, a través del uso de tecnologías que reduzcan la generación de desechos peligrosos, así como a través del desarrollo de actividades y procedimientos que conduzcan a una gestión sostenible de los desechos mencionados y a la difusión de tales actividades.
Lista Europea de Residuos	LER	Todo el documento	Dentro de los lineamientos internacionales relacionados con los residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario se tienen la Lista Europea de Residuos (LER), según ésta, las escorias de la producción primaria y las escorias salinas de la producción secundaria, se encuentran catalogadas como residuos peligrosos, por lo que no pueden ser vertidas directamente debido a su alta reactividad con el agua, a que se emiten gases y al peligro de que las sustancias tóxicas se lixivien, por lo que tienen que ser tratadas.

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Ley de Seguridad Ocupacional	MTPS	<p>Todo el documento en cuanto sea aplicable.</p> <p>Art. 17.- Todo proceso industrial que dé origen a polvos, gases, vapores, humos o emanaciones nocivas de cualquier género, debe contar con dispositivos destinados a evitar que dichos polvos, vapores, humos, emanaciones o gases, contaminen o vicién el aire y a disponer de ellos en tal forma, que no constituyan un peligro para la salud de los obreros o para la higiene de las habitaciones o poblaciones vecinas.</p>	<p>El objeto de este Reglamento es establecer los requisitos mínimos de seguridad e higiene en que deben desarrollarse las labores en los centros de trabajo, por lo que deben tomarse en cuenta cada una de las disposiciones establecidas en el reglamento.</p> <p>Durante el proceso de segunda fundición del aluminio, se generan emanaciones gaseosas al aire, las cuales se detallan en la sección 3.1.</p>

MTPS: Ministerio de Trabajo y Previsión Social

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Ley de Seguridad Ocupacional	MTPS	Art. 19.- La temperatura y humedad relativa de los locales cerrados de trabajo, deberán ser mantenidas entre límites que no causen perjuicio o molestias a la salud de los trabajadores. Es obligatorio proveer a los trabajadores de los medios de protección necesarios contra la radiación excesiva de cualquier fuente de calor. Deberá proveerse asimismo al trabajador, del equipo de protección personal contra las bajas temperaturas.	Tal como se describe en la sección 2.2 y 2.3, el procesamiento de aluminio secundario involucra la fundición de materiales de aluminio en hornos a altas temperaturas, por lo que el personal encargado de ejecutar las operaciones de fundición debe tener a su disposición todo el equipo de protección personal que permita ejecutar dichas actividades con la mayor seguridad posible.

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Ley de Seguridad Ocupacional	MTPS	<p>Art. 51.- En ningún caso podrán incorporarse en los subsuelos o arrojados en los canales de regadío, acueductos, ríos, esteros, quebradas, lagos, lagunas o embalses, o en masas o en cursos de agua en general, las aguas servidas de origen doméstico, los residuos, o relaves industriales o las aguas contaminadas resultantes de manipulaciones químicas de otra naturaleza, sin ser previamente sometidas a los tratamientos de neutralización o depuración que prescriben en cada caso los Reglamentos sanitarios vigentes o que se dicten en el futuro.</p> <p>Art. 66.- Los trabajadores que tengan que laborar con metales sometidos a altas temperaturas deben usar obligatoriamente guantes y mandiles de cuero cromado o asbesto y anteojos o pantallas adecuadas.</p>	<p>Sobre la disposición de residuos generados por el procesamiento de aluminio secundario, no deben depositarse en ninguno de los términos mencionados en el artículo 51 de la Ley de Seguridad Ocupacional, especialmente cuando se refiere a un residuo que representa un alto riesgo a la salud humana y del medio ambiente.</p> <p>De esta manera los artículos 52 y 53 de este reglamento limitan el vertido de residuos sólidos en mantos acuíferos.</p> <p>Complementando lo dispuesto en el artículo 19 de este reglamento, se hace referencia específicamente al equipo de protección personal indicado para las labores relacionadas con metales sometidos a altas temperaturas.</p>

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Ley del Medio Ambiente	MARN	<p>Todo el documento.</p> <p>Art. 1.- La presente ley tiene por objeto desarrollar las disposiciones de la Constitución de la República, que se refiere a la protección, conservación y recuperación del medio ambiente; el uso sostenible de los recursos naturales que permitan mejorar la calidad de vida de las presentes y futuras generaciones; así como también, normar la gestión ambiental, pública y privada y la protección ambiental como obligación básica del Estado, los municipios y los habitantes en general; y asegurar la aplicación de los tratados o convenios internacionales celebrados por El Salvador en esta materia.</p>	<p>Dado a que el enfoque del documento tiene como premisa el desarrollo sostenible, todas las disposiciones establecidas en este reglamento deben ser consideradas para el procesamiento de aluminio secundario y la consecuente generación de residuos.</p>

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
Ley del Medio Ambiente	MARN	<p>Art. 21.- Toda persona natural o jurídica deberá presentar el correspondiente Estudio de Impacto Ambiental para ejecutar las siguientes actividades, obras o proyectos:</p> <p>d) Sistemas de tratamiento, confinamiento y eliminación, instalaciones de almacenamiento y disposición final de residuos sólidos y desechos peligrosos;</p> <p>o) Cualquier otra que pueda tener impactos considerables o irreversibles en el ambiente, la salud y el bienestar humano o los ecosistemas.</p>	<p>Las actividades que se realizan para el procesamiento de aluminio secundario, así como aquellas empleadas para la disposición final de los residuos generados por este procesamiento, deben ser analizadas a través de un estudio de impacto ambiental, que permita identificar de una forma más específica los riesgos e impactos ambientales generados por dichas actividades.</p>

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
<p>Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos</p>	<p>MARN</p>	<p>Art. 6. - Los contenedores para el almacenamiento temporal de desechos sólidos, deberán cumplir los siguientes requisitos mínimos:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Estar adecuadamente ubicados y cubiertos; b. Tener adecuada capacidad para almacenar el volumen de desechos sólidos generados; c. Estar contruidos con materiales impermeables y con la resistencia necesaria para el uso al que están destinados; d. Tener un adecuado mantenimiento; y e. Tener la identificación relativa al uso y tipos de desechos. 	<p>Para el Almacenamiento temporal de la escoria salina de aluminio, es necesario seleccionar los contenedores más adecuados, que permitan un almacenamiento seguro, sin perjuicio de sus características físicas y químicas del residuo, pero sobre todo, evite cualquier tipo de contaminación al medio ambiente. Además de la selección del tipo de contenedor más adecuado se deben establecer las condiciones mínimas de seguridad del lugar donde será almacenado el residuo en estudio, atendiendo todos los parámetros establecidos en la ley.</p>

Sigue...

Cuadro 4-1. Resumen sobre marco legal aplicable al proyecto.

Legislación aplicable	Ente rector	Sección y/o articulado del reglamento aplicable	Análisis
<p>Reglamento Especial sobre el Manejo Integral de los Desechos Sólidos</p>	<p>MARN</p>	<p>Art. 9.- Los equipos de transporte pesado de desechos sólidos, desde la estación de transferencia, si la hubiere, hacia el sitio de disposición final, deberán estar debidamente identificados. En su recorrido, se respetará una ruta única y previamente establecida, la que no será alterada sin previa autorización.</p>	<p>Se deben tener en cuenta las disposiciones legales establecidas para el transporte de residuos peligrosos, para el traslado del residuo en estudio, ya sea, hacia el lugar de disposición final, o para su exportación.</p>
		<p>Art.11.- La utilización del Sistema de Tratamientos de Desechos Sólidos en el país dependerá fundamentalmente de la naturaleza y la composición de los desechos.</p> <p>Art. 13.- La ubicación de terrenos utilizados como sitios de disposición final deberán cumplir con los criterios establecidos en el anexo de este reglamento.</p>	<p>En función de lo establecido en este artículo es necesario realizar la caracterización de la Escoria Salina de Aluminio para diseñar el sistema de tratamiento de desechos sólidos más conveniente para el medio ambiente y generadores.</p> <p>Luego de la caracterización del residuo en estudio, y la determinación de su composición se procede a evaluar las alternativas de gestión ambiental aplicables, para lo cual también se consideran las disposiciones legales establecidas en los reglamentos de El Salvador, así como también en los tratados y convenios ratificados por El Salvador.</p>

Cuadro 4-2 Listado de características peligrosas consideradas en el Convenio de Basilea

Clase de las Naciones Unidas	No. De Código	Características
9	H10	<p>Liberación de gases tóxicos en contacto con el aire o el agua Sustancias o desechos que, por reacción con el aire o el agua, pueden emitir gases tóxicos en cantidades peligrosas.</p>
9	H13	<p>Sustancias que pueden, por algún medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia, por ejemplo, un producto de lixiviación, que posee alguna de las características arriba expuestas.</p>

Debido a las propiedades de las escorias salinas de la producción de aluminio secundario, estas clasifican como residuos tóxicos y peligrosos, según el Catálogo Europeo de Residuos Peligrosos, se consideran como:

- a. **"Dañina"**: H5: sustancias y preparados que, si se inhalan o se ingieren o si penetran en la piel, implican un riesgo de salud limitado.
- b. **"Lixiviables"**: H13: las sustancias y preparados susceptibles, por cualquier medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia.

Capítulo 5. Caracterización de la escoria salina de aluminio secundario

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos en esta investigación, es importante y necesario conocer la composición de la escoria salina, ya que de ésta, dependerán las alternativas de tratamiento a proponer para este residuo. Así por ejemplo, de la composición de este residuo, depende la posibilidad de recuperar algunos de los elementos compuestos presentes, o para evaluar la alternativa de que su disposición final sea en vertederos controlados, es de vital importancia conocer lo que se deposita en el medio ambiente para evaluar el impacto generado. Si se pretende recuperar el aluminio, es deseable conocer el contenido de aluminio, sobre todo para cuantificar la eficiencia del proceso, o para hacer una comparación con otros procesos.

La determinación de la composición de la escoria salina no es una tarea fácil, pocos estudios existen sobre este tema. En El Salvador no se ha realizado un estudio que permita conocer la composición de la escoria salina generada por la industria del aluminio secundario de El Salvador. La mayoría de las investigaciones realizadas (en otros países) al respecto, encontradas en la literatura, que presentan valores de la composición de este residuo, no explican a detalle el procedimiento experimental utilizado para la realización de esta determinación. El Cuadro 5-1 muestra un resumen de las composiciones químicas de la escoria salina encontradas en la literatura consultada.

Para la determinación de la composición química de las escorias salinas de aluminio secundario en esta investigación, se realiza un procedimiento experimental basado en los estándares establecidos en la norma ASTM y se aplican diferentes técnicas instrumentales de análisis químico (Difracción de rayos X, espectrofotometría de absorción atómica y fotometría), cuyos resultados son utilizados de forma combinada para efectuar balances de masa.

Cuadro 5-1 Resumen de composiciones de escorias salinas de aluminio secundario reportadas en la literatura consultada.

Método utilizado	Composición reportada	Referencia	
Análisis granulométrico del tamaño de partícula, análisis químico y microscopía	Producto +9521 µm	Mah, Toguri & Smith 1986	
	Aluminio		95 %
	Óxidos		5 %
	Producto -9521 µm, +1700 µm		
	Aluminio		70 %
	Óxidos		30 %
	Producto -1700 µm, +150µm		
Aluminio	25 %		
Óxidos	75 %		
Fluorescencia de rayos X	Producto -150µm	Kemeny, Sosinsky & Srhmith 1991	
	Aluminio		2 %
	Óxidos		98 %
	CaO		0.44 %
	Al ₂ O ₃		76.40 %
	SiO ₂		4.77 %
	Na		2.02 %
Cl	0.25 %		
MgO	11.85 %		
K ₂ O	0.65 %		
C	1.90 %		
S	0.26 %		
Al	4.00 %		
No Disponible	Al ₂ O ₃	53 – 63 %	Breault 1994
	MgAl ₂ O ₄	5 – 12 %	
	AlN	9 – 18 %	
	Al metálico	5 – 10 %	
	Na ₃ AlF ₆	0 – 4 %	
	NaCl	0 – 3 %	
	SiO ₂	1 – 2 %	
	CaF ₂	0.5 – 1.5 %	
	Fe ₂ O ₃	0.5 – 2.0 %	
	MnO	0 – 1 %	
Difracción de rayos X	Al	44.80 %	El-Katatny(2003)
	N	6.00 %	
	C	2.00 %	
	Mg	1.50 %	
	Si	1.10 %	
	Fe	1.20 %	
	Na	0.70 %	
	F	0.30 %	
	Ti	0.03 %	
	V	0.02 %	
	Mn	0.20 %	

Cuadro 5-1 Resumen de composiciones de escorias salinas de aluminio secundario reportadas en la literatura consultada.

Método utilizado	Composición reportada	Referencia
No Disponible	Na 21.89 % K 7.47 % Si 3.69 % Mg 2,83 % Ca 1,07 % N 0,71 % C 0.60 % Fe 0,50 % S 0,13 %	López, Sainz y Formoso (1994)
Difracción de rayos X	Aluminio (Al) Nitruro de Aluminio (AlN), Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃), Óxido de Nitruro de Aluminio (Al ₅ O ₆ N), Bayerita Al(OH) ₃ , Corindón (Al ₂ O ₃), Criolita (Na ₃ AlF ₆), Halita (NaCl) Silvita (KCl).	Bruckard y Woodcock

En términos generales la composición de las Escorias Salinas varía de acuerdo con sus orígenes, comprendiendo, en porcentaje en peso, aluminio 5-7%, sales 10-50%, y residuos de óxido 50-85%, que se componen principalmente de óxido de aluminio con cantidades menores de criolita, óxido de magnesio, aluminato de magnesio, y otros contaminantes en cantidades mínimas, así como carburos, sulfuros y trazas de dibenzo - dioxinas y dibenzofuranos policlorados (PCDD y PCDF) (Tsakiridis, 2012).

Dependiendo de la cantidad de flujo de sal empleado por tonelada de chatarra, típicamente las escorias salinas contienen 30-60% en peso de componentes no metálicos, con el contenido medio siguientes: 7.8% Al₄C₃, 1% AlN, y aproximadamente 0,1% AlP. El contenido de AlN puede alcanzar hasta un 5%, si se funden mayores cantidades de escoria con la chatarra. Las fases anteriores, son equiparadas con las emisiones de gases de: 9.5 m³ a 10.5 m³ de CH₄, 1.5 m³ a 13.5 m³ de NH₃ y 0.1 m₃ de PH₃ por tonelada de componentes no metálicos en las escorias salinas (Tsakiridis, 2012).

Bruckard y Woodcock presentaron los resultados de análisis químico y mineralógico, de dos muestras de escoria salina, obtenidas a partir de dos compañías australianas de fundición de aluminio. Los resultados de la caracterización mostraron que la escoria salina contiene al menos 12 metales mayoritarios presentes en 19 fases identificables. Los elementos mayoritarios (mayores que 1%) difieren para cada muestra, pero también se presentan algunas similitudes. El contenido de aluminio fue similar en, aproximadamente el 37% de Al, el contenido de flúor en 5% F, y el contenido de potasio en un 3-4% K. Sin embargo, el contenido de nitrógeno, que estaba presente como nitruro de aluminio, oscila entre 2% a 7%. Los elementos intermedios, calcio y carbono, estaban presentes en cantidades similares, pero otros elementos (hierro, magnesio y titanio) fueron variables. Los elementos minoritarios son muy variables, estas variaciones son difíciles de interpretar, pero se supone que son el resultado de diferentes materiales de alimentación, y diferencias en las prácticas de operación (Tsakiridis, 2012). Las fases identificadas en las dos muestras de escoria salina por análisis cualitativo de difracción de rayos X se presentan en el Cuadro 5-1.

De acuerdo con López et al., la escoria salina contiene aproximadamente el 25% de Aluminio, pero con sólo 7,25% presente en su forma metálica. Aproximadamente el 50% de las escorias salinas se componen de minerales solubles en agua, estando presentes: halita (NaCl), Silvita (KCl), un pequeño contenido de nitruro de aluminio (AlN), carburo de aluminio (Al_4C_3) y sulfuro de aluminio (Al_2S_3). La parte restante de las escorias salinas contiene principalmente óxidos no solubles (Al, Mg, Ca y Si), incluyendo corindón (Al_2O_3), espinela ($MgO \cdot Al_2O_3$), cuarzo (SiO_2) y silicato de calcio ($\beta-CaOSiO_2$) (Lopez, Sainz, & Formoso, 1994).

Según Pereira et. al., de acuerdo con los resultados del análisis de una escoria salina, proveniente de una industria portuguesa de aleaciones de aluminio, la escoria salina se compone de una masa heterogénea, en la que se encuentran principalmente dos grupos de minerales:

1. Compuestos solubles en agua, mayormente sales alcalinas (NaCl y KCl), pero también trazas de AlN, AlC_3 y Al_2S_3 ;
2. Compuestos no solubles en agua, como corindón ($\alpha-Al_2O_3$), Al_2S , espinela del sistema $MgO-Al_2O_3$, cuarzo y $\beta-CaOSiO_2$.

5.1 Procedimiento experimental para la caracterización de la escoria salina de aluminio secundario.

La escoria salina de aluminio secundario presenta diferentes características dependiendo de las operaciones inmediatas que se realicen al retirarlas del horno de fundición, de acuerdo a esto se establecen dos tipos de escoria salina, suelta y compacta, sin embargo, en cualquiera de los casos, la escoria salina consiste en un material sólido, duro y amorfo por lo que es un material de difícil mecanizado.

- a. **Escoria salina suelta:** Este tipo de escoria salina es el resultado de retirar la escoria de la mezcla de fundición por simple vertido en el suelo, y luego expandirla para su enfriado mediante un rastrillo. Este tipo de escoria es bastante heterogénea (ver Figura 5-1), y adquiere contaminantes que estén presentes en el suelo, además de que se aumenta la cantidad de área superficial expuesta al ambiente, aumentando de igual manera la superficie que reacciona con los gases presentes en el aire, oxidando el aluminio metálico y formando otros compuestos.
- b. **Escoria Salina Compacta:** Este tipo de escoria salina corresponde a aquella que al ser retirada de la mezcla de fundición, se vierte en moldes diseñados especialmente para esta operación, la escoria adquiere la forma del molde (Ver Figura 5-2). De esta manera se minimiza el contacto con el ambiente y otros materiales.



Figura 5-1 Escoria salina suelta de aluminio secundario



Figura 5-2 Escoria salina compacta de aluminio secundario

El procedimiento experimental desarrollado en este proyecto de investigación para la caracterización de la escoria salina se muestra en la Figura 5-3. El material y equipo de laboratorio se lista en el anexo A.

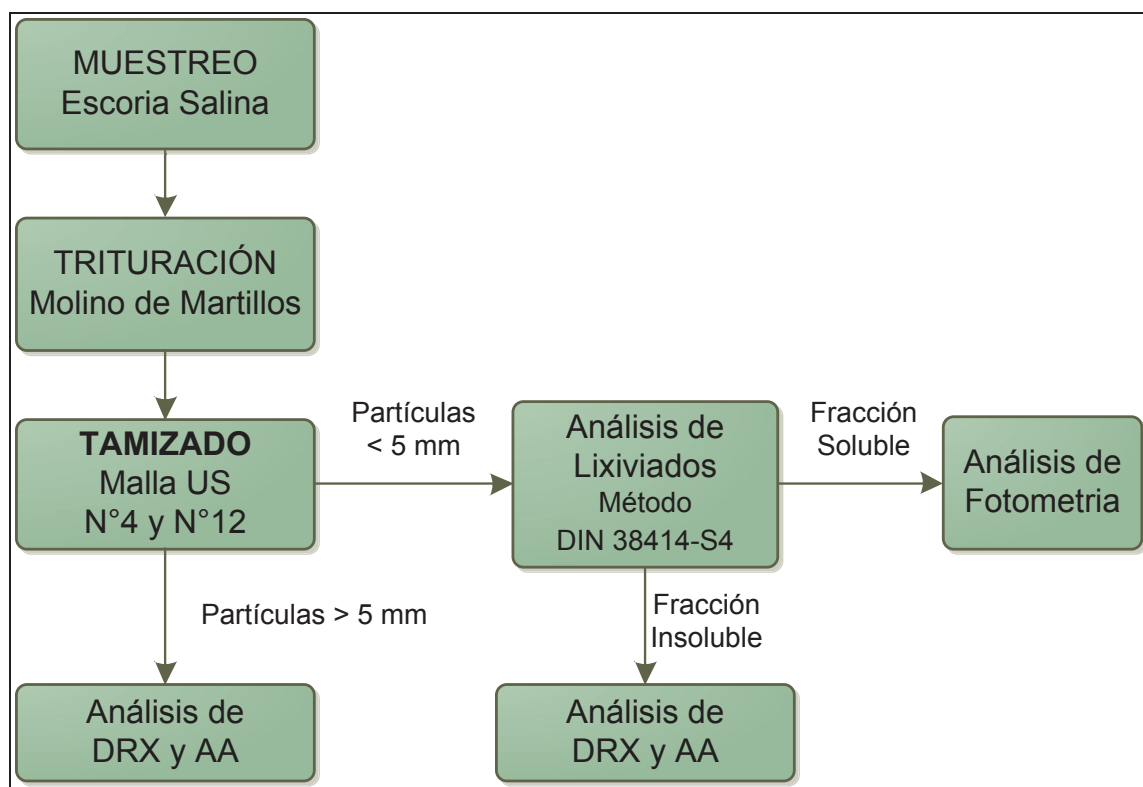


Figura 5-3 Diagrama de proceso experimental para caracterización de escoria salina de aluminio secundario (DRX: Difracción de rayos X; AA: Absorción Atómica)

5.1.1 Muestreo de escoria salina de aluminio secundario

La escoria salina es un residuo de composición química variable. Dado a la gran heterogeneidad en este tipo de residuos, hacer un muestreo representativo es sumamente importante. Dicho muestreo se realizará in situ y de forma aleatoria, en las instalaciones de una empresa a la que, para efectos de este estudio, llamaremos “Empresa A”, la cual ha puesto a disposición los materiales y equipos disponibles en sus instalaciones para llevar a cabo la experimentación.

Para la realización de un muestreo representativo se sigue el estándar ASTM E 88-91R01. Esta práctica cubre la toma de muestra para la determinación de la composición química de metales no ferrosos y aleaciones en forma fundida para la refundición o mecanización. La selección de las porciones correctas de material y la preparación de una muestra representativa de tales porciones, son requisitos previos necesarios para todos los análisis, los cuales no tienen valor alguno a menos que la muestra represente en realidad la composición promedio del material del cual fue seleccionado. El tamaño de muestra a procesar es de 1.2 kg.²

- a. **Escoria salina suelta:** Para el muestreo de este tipo de escoria, se homogeniza el total del material mediante el uso de una pala, luego se forma un bulto cónico de donde se extrae 1.2 kg de muestra de escoria salina suelta, la cual se tritura en un molino de martillos hasta un tamaño de partícula que pase la malla 14 (5 mm).
- b. **Escoria salina compacta:** Para el caso de la escoria compacta, el muestreo se realiza mediante la perforación de agujeros de 1,27 cm (1/2 pulgada) de diámetro en puntos equidistantes entre los extremos de las piezas a lo largo de una línea diagonal, ver **Figura 5-11**. La perforación se realiza a través del espesor total y, si es necesario, perforados en ambas direcciones, arriba y abajo.

5.1.2 Trituración y tamizado de escoria salina de aluminio secundario

Para la preparación de la muestra, de acuerdo a la norma ASTM E 88-91R01, el material se reduce de tamaño pasando a través de una trituradora de mandíbulas o rodillo para un tamaño de partícula que menor a un Tamiz N° 14 (5 mm). Al realizar el proceso de trituración de la muestra se obtiene una distribución de partículas bastante amplia, sin embargo se pretende separar la muestra en dos fracciones de interés, las cuales corresponden a la fracción de tamaño de partícula menor a 5 mm y a la fracción de tamaño de partícula mayor a 5 mm. Esta operación es realizada utilizando un molino de martillos, el cual se muestra en la Figura 5-4.

²El tamaño de muestra y el procedimiento de muestreo se realiza en base a la Norma ASTM E 88-91.



Figura 5-4 Molino de martillos utilizado para la trituración de la muestra de escoria salina de aluminio propiedad de empresa A.

El tamizado se realiza con el objetivo de separar las fracciones obtenidas de la trituración, observar la distribución de partículas y seleccionar la muestra para el análisis de lixiviados DIN 38414-S4. Para ello se utilizan los tamices US N°12 y US N°4. Dicho procedimiento de tamizado se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de El Salvador.



Figura 5-5 Tamiz US N°12



Figura 5-6 Tamiz US N°4

5.1.3 Análisis de lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario (Método DIN 38414-S4)

Este método proporciona información sobre los efectos adversos que pueden generar los residuos sólidos sobre las aguas superficiales y subterráneas, de forma tal que al entrar en contacto con el agua se produce una solución lixiviada (Huillcañahui, 2007).

Éste método de análisis establece que material de la muestra, en este caso la escoria salina de aluminio secundario, se lixivia con agua en condiciones definidas. Luego los componentes no disueltos son separados mediante un proceso de filtración. En el filtrado se miden las concentraciones de los componentes mediante un método de análisis de agua. El procedimiento se muestra en la Figura 5-7.

Mediante la aplicación de éste método de análisis de lixiviados, se pretende conocer cuales de los elementos presentes en la composición química de la escoria salina de aluminio secundario, se lixivia con agua y además conocer las proporciones en las que éstos se lixivian. Estos elementos podrían causar problemas de contaminación de suelos y mantos acuíferos, con los resultados obtenidos es posible determinar que tipo de contaminación se podría generar.

Para la determinación de la humedad, la muestra se seca en un horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$, hasta que se alcanza una masa constante; la pérdida de masa debido al secado se considera que está constituida por agua, el contenido de agua se calcula como la relación a partir de la masa de agua y de la masa de la muestra seca, aplicando la norma ASTM D2216.

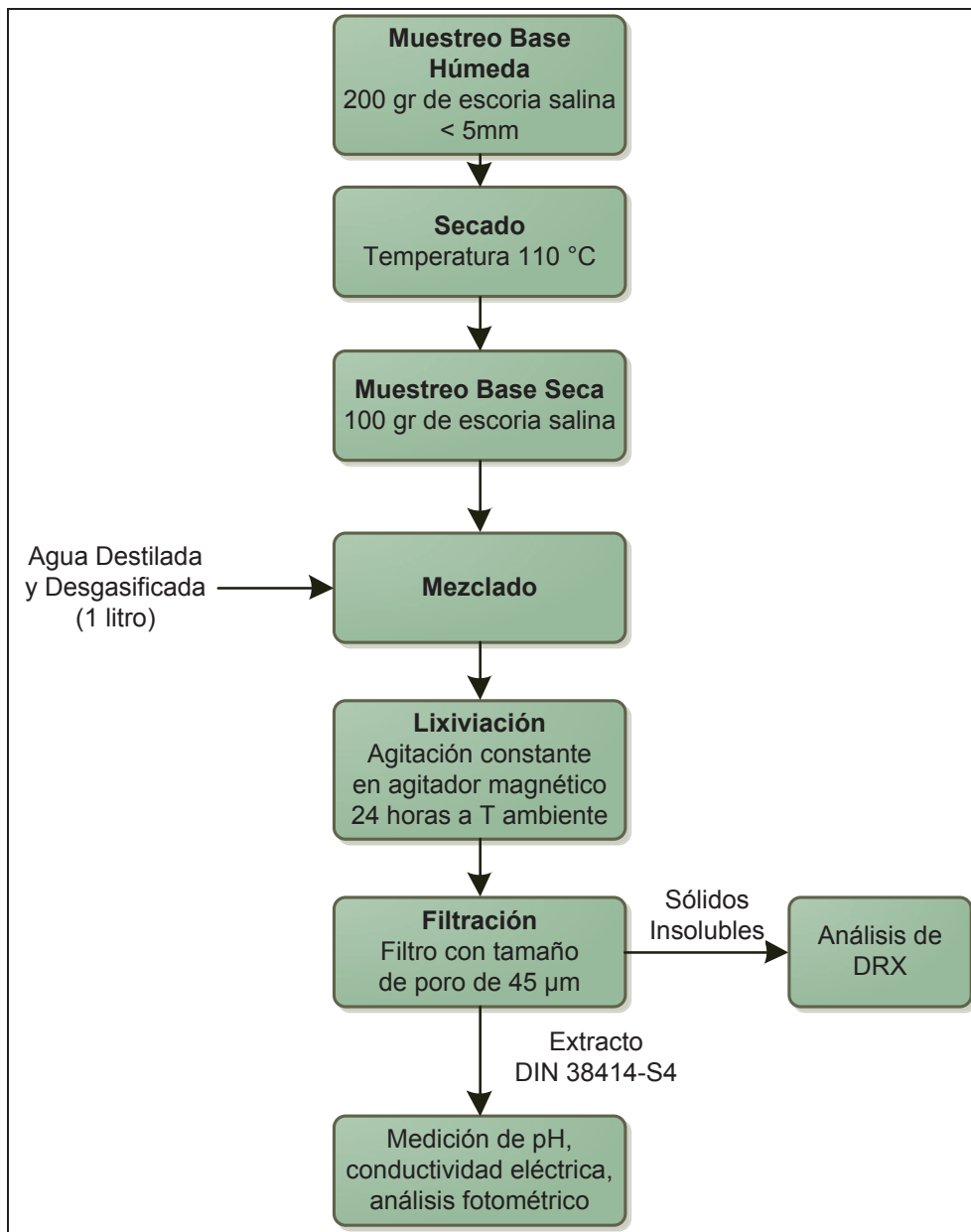


Figura 5-7 Diagrama de proceso de análisis de lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario, norma DIN 38414-S4

5.1.4 Análisis químico instrumental de muestras de escorias salinas de aluminio secundario

Para la caracterización de las escorias salinas de aluminio secundario se hace necesaria la aplicación de técnicas de análisis fisicoquímico instrumental, que permitan identificar los compuestos presentes en las diferentes fracciones de escoria salina, así como también permitan cuantificar la composición química. Para ello se utilizan las técnicas de:

- a. Difracción de Rayos X
- b. Espectrofotometría de Absorción Atómica
- c. Fotometría

Los análisis de Difracción de Rayos X y Espectrofotometría de Absorción Atómica, se realizan en el Laboratorio Geoquímico de La Geo El Salvador, dicho laboratorio ha sido acreditado ante el CONACYT bajo la norma NSR ISO 17025. Los análisis de fotometría son realizados en el Laboratorio de Aguas de la Universidad de El Salvador.

a. Difracción de Rayos X

La difracción de rayos x es una de las técnicas más utilizadas para realizar la composición química de la materia, el análisis químico convencional permite conocer los elementos contenidos en un material y la principal ventaja del método de difracción es la capacidad para determinar las fases presentes en un material, así como la cuantificación de los mismos (Smith, 1998).

La difracción es un fenómeno característico de las ondas, que consiste en la dispersión de las ondas cuando se interaccionan con un objeto ordenado. Ocurre en todo tipo de ondas, desde las sonoras, hasta las ondas electromagnéticas como la luz, y también los rayos X.

El proceso experimental para la determinación de la estructura molecular de un compuesto comienza con la preparación de un cristal, una forma ordenada a nivel microscópico de dicha sustancia. Un experimento de difracción consiste en la irradiación con rayos X de estos pequeños cristales, que actúan dispersándolos sólo en unas direcciones determinadas, con intensidades que dependen de cómo se ordenan los átomos a nivel microscópico.

Con esta información, dirección e intensidad de cada rayo, es posible obtener la estructura molecular. La realización de esta prueba de difracción de rayos X permitirá la identificación de los compuestos presentes en la escoria salina.

b. Espectroscopia de Absorción Atómica

La Espectroscopia Atómica es un método instrumental que se basa en la absorción, emisión y fluorescencia de radiación electromagnética por partículas atómicas. Se emplean principalmente radiaciones del espectro ultravioleta (UV) y visible, y rayos X. Para obtener un espectro de radiaciones de longitudes de ondas específicas, o rangos pequeños en lugar de bandas, es necesario que las partículas de la muestra se descompongan en partículas elementales gaseosas, proceso conocido como atomización.

Entre las ventajas de este método se cuentan: gran especificidad, amplio campo de aplicación en la química analítica, excelente sensibilidad a pequeñas concentraciones del orden de 1ppm y 1000ppm, rapidez en la determinación y gran selectividad. La Absorción atómica es una técnica capaz de detectar y determinar cuantitativamente la mayoría de los elementos del sistema periódico. Sus campos de aplicación son por tanto muy diversos. Con la aplicación de este análisis instrumental se conseguirá identificar y cuantificar el contenido por especies atómicas en las muestras.

5.2 Resultados de análisis químico de escorias salinas de aluminio secundario

En esta sección se presentan las observaciones y análisis de resultados obtenidos luego de realizar el procedimiento experimental, para la caracterización de la escoria salina de aluminio secundario.

5.2.1 Muestreo de escoria salina de aluminio secundario

El muestreo de la escoria salina, sigue los lineamientos establecidos en el estándar ASTM correspondiente (ver sección 5.1.1), y se realiza de dos maneras diferentes, dependiendo del tipo de escoria salina en cuestión. Las muestras de escoria salina seleccionadas se muestran en las Figura 5-8 y Figura 5-9.



Figura 5-8 Muestra de escoria salina suelta



Figura 5-9 Muestra de escoria salina compacta

En la Figura 5-8 y Figura 5-9, se observan las características de forma que presenta cada uno de los tipos de muestra de escoria salina. En la escoria salina suelta se observa amorfa, con una gran cantidad de espacios intersticiales y orificios que propician, el desgaste del material por fricción, y la oxidación de los elementos presentes en la escoria por reacción de éstos con el oxígeno del ambiente.

La escoria salina compacta fue extraída de los lingotes de escoria salina perforando los lingotes de escoria usando un taladro, como se muestra en la Figura 5-11. Al realizar la perforación de los lingotes se observa el desprendimiento de polvos finos al ambiente. De ambos tipos de muestra se obtuvo 1.2 kg de muestra.



Figura 5-10 Lingotes de escoria salina compacta



Figura 5-11 Extracción de muestra de escoria salina compacta

5.2.2 Trituración y Tamizado de muestras de escoria salina de aluminio secundario

Las muestras de escoria salina suelta y compacta, son sometidas a trituración y molienda, como se describe en la sección 5.1.2. Inicialmente se trituran 1.2 kg de muestra de escoria salina suelta para realizar una trituración de prueba, durante la trituración de prueba se observa generación de grandes cantidades de polvos finos, que se desprenden al ambiente. Luego de la trituración de prueba se procede a triturar las muestras de escoria salina suelta y compacta.

De la trituración de la escoria salina suelta se observa abundante generación de polvos finos que se desprenden al ambiente, a diferencia de la muestra de escoria salina compacta en la que se aprecia una cantidad mucho menor de generación de polvos finos

al ambiente y en la distribución de partículas generadas se observan partículas de una granulometría mayor, lo que se aprecia de una forma más evidente durante el tamizado.

Las muestras trituradas se hacen pasar por tamices con el objetivo de observar de una mejor manera la distribución de partículas y separar la muestra de escoria salina para realizar el análisis de lixiviados DIN 38414-S4. Se utilizan los tamices US N°12 y US N°4 (Ver Figura 5-5 y Figura 5-6). Los resultados del tamizado de las muestras se presentan en el Cuadro 5-2.

Cuadro 5-2 Distribución de partículas de tamizado de muestras de escoria salina

Fracción	Escoria salina suelta		Escoria salina compacta	
	Peso (g)	%	Peso (g)	%
Malla 4	434,9	36,24	400,9	33,41
Malla 12	297,4	24,78	347,5	28,96
Fondo	325,2	27,10	384,0	32,00
Pérdidas	142,5	11,88	67,6	5,63
Total	1200	100	1200	100

De la distribución de partículas obtenida se observa que se tiene mayor cantidad de pérdidas de material en el caso de la muestra de escoria salina suelta, esto concuerda con la observación de mayor generación de polvos finos durante la trituración de dicha muestra. En la Figura 5-12 se observa de una forma más ilustrativa la distribución de partículas obtenida luego del tamizado de las muestras de escoria salina suelta y compacta.

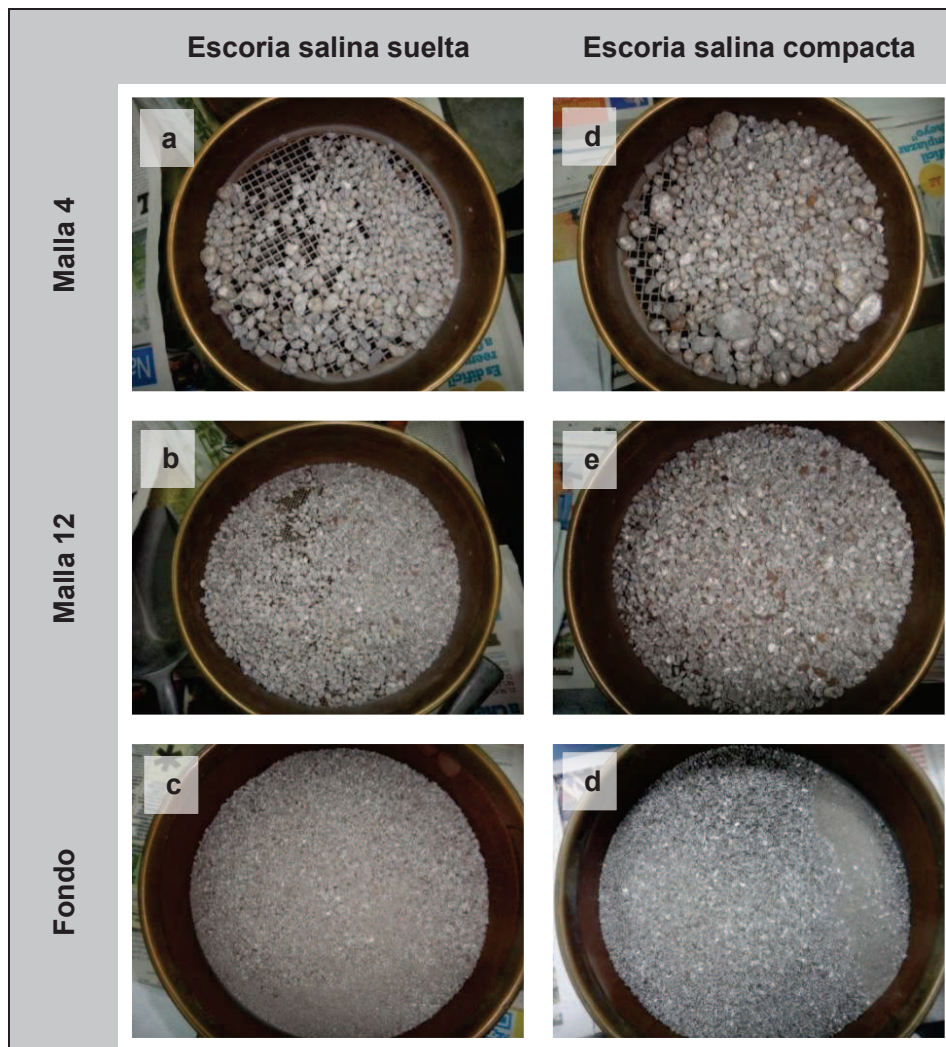


Figura 5-12 Distribución de partículas por malla de muestras de escoria salina de aluminio secundario tamizada.

- Fracción de escoria salina suelta con tamaño de partícula mayor a 5 mm
- Fracción de escoria salina suelta con tamaño de partícula entre 5 mm y 1.7 mm
- Fracción de escoria salina suelta con tamaño de partícula menor a 1.7 mm
- Fracción de escoria salina compacta con tamaño de partícula mayor a 5 mm
- Fracción de escoria salina compacta con tamaño de partícula entre 5 mm y 1.7 mm
- Fracción de escoria salina compacta con tamaño de partícula menor a 1.7 mm

Al comparar los pesos reportados del cuadro Cuadro 5-2 con la Figura 5-12 se observa que:

- El volumen de escoria salina compacta retenido en malla 4 es mayor que el volumen de escoria salina suelta retenido en la misma malla, sin embargo el peso medido de la fracción mostrada en la Figura 5-12b es mayor respecto al medido de

la fracción mostrada en la Figura 5-12a, lo que nos indica que en ésta última existe un mayor contenido de aluminio metálico.

- b. Al comparar el peso de las fracciones retenidas en la malla 12, se observa que éste es mayor para el caso de la escoria salina compacta, lo cual se atribuye a diferentes factores, entre ellos, menor cantidad de pérdidas al momento de trituración de este tipo de escoria, y mayor contenido de productos no metálicos en esta fracción de muestra.
- c. En todas las fracciones obtenidas para la muestra de escoria salina compacta se observa mayor brillo metálico con respecto a lo observado en la escoria salina suelta.

5.2.3 Análisis de lixiviados de escoria salina de aluminio secundario

De acuerdo con el procedimiento experimental descrito en la sección 0, se toman 200 gramos de muestra de escoria, con una granulometría menor a 5 mm. Para seleccionar la muestra, se homogeniza el material por mezcla y se divide en cuatro secciones de las que se obtiene la muestra representativa (ver Figura 5-13 y Figura 5-14).



Figura 5-13 Selección de muestra para análisis de lixiviado de Escoria Salina



Figura 5-14 Medición de masa de muestras de escoria salina

El proceso de secado a 110°C se lleva a cabo en un horno de temperatura ajustable (ver Figura 5-15). La masa de las muestras de escoria salina de aluminio, es monitoreada hasta alcanzar un valor constante, los valores medidos se presentan en el Cuadro 5-3.



Figura 5-15 Horno de secado



Figura 5-16 Secado de muestras de escoria salina de aluminio secundario

Cuadro 5-3 Mediciones de masa de muestras de escoria salina durante el secado

Tiempo	Masa de muestra de escoria salina de aluminio secundario	
	Suelta (g)	Compacta (g)
0 min	150.0	150.0
15 min	148.6	148.4
45 min	146.2	146.2
75 min	145.7	145.5
105 min	144.6	144.5
135 min	144.6	144.5
165 min	144.6	144.5

De las muestras secas, se extraen 100 gramos de muestra para proceder al mezclado en agitación constante, con agua destilada y desgasificada. Al adicionar los 100 gramos de muestra al agua, se observa que hay generación de vapores, y efervescencia. Las muestras se mantienen en agitación constante durante 24 horas y posteriormente son filtradas, obteniendo un líquido transparente (lixiviado).

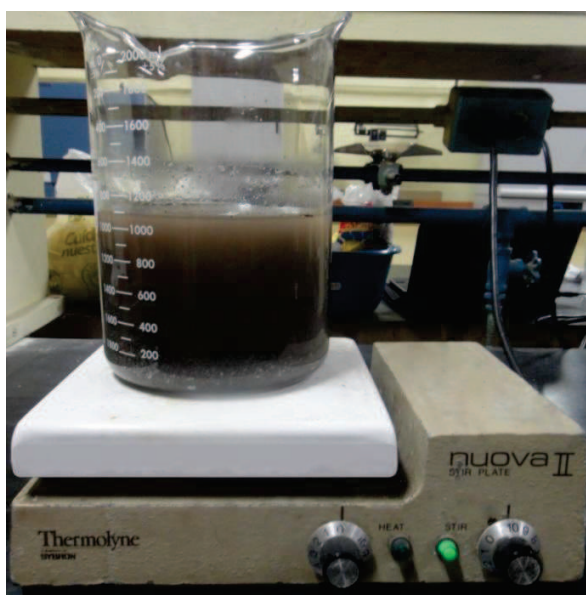


Figura 5-17 Agitación de lixiviados de escoria salina de aluminio secundario

Durante el tiempo de agitación se realizaron mediciones de Total de Sólidos Disueltos, Conductividad y pH, los resultados de las mediciones se muestran en el Cuadro 5-4.

Cuadro 5-4 Mediciones de parámetros fisicoquímicos de lixiviado de Escoria Salina de aluminio secundario

Tiempo	Escoria salina suelta			Escoria salina compacta		
	TSD (ppm)	Conductividad (μ s)	pH	TSD (ppm)	Conductividad (μ s)	pH
Agua	1,5	2,4	7.0	1,7	2,3	7.0
Inicial	392	791	7.0	530	1020	7.0
0 min	1250	2350	8.0	1460	2930	8.0
15 min	1400	2700	9.0	1660	3400	9.0
30 min	1430	2760	9.0	1760	3580	9.0
45 min	1490	2900	9.0	1790	3630	9.0
60 min	1500	2970	9.0	1860	3700	9.0
90 min	1530	3000	9.0	1880	3770	9.0
120 min	1550	3130	9.0	1910	3820	9.0
150 min	1560	3140	9.0	1940	3850	9.0
22 hr	1630	3240	9.0	2080	4150	9.0
23 hr	1590	3190	9.0	1980	3910	9.0
24 hr	1670	3320	9.0	2030	4010	9.0

Observaciones:

- a. El pH alcanza un valor constante de 9 para ambos tipos de muestra luego de cumplir con 15 minutos de agitación constante.
- b. El total de sólidos disueltos final es menor para el caso de la escoria salina suelta, y se observa esa tendencia en todas las mediciones realizadas, esto se atribuye a que se tuvo mayor porcentaje de pérdidas al momento de triturar este tipo de escoria, ya que en el proceso de fundición se utilizó la misma cantidad de sales fundentes en todos los casos

5.2.4 Análisis de lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario

El lixiviado filtrado luego de realizado el procedimiento experimental, es enviado al Laboratorio Físicoquímico de Aguas, de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador, donde se analizan las concentraciones de diferentes elementos químicos presentes en las muestras, por métodos fotométricos y volumétricos, los resultados obtenidos se muestran en el Cuadro 5-5.

Cuadro 5-5 Concentraciones de elementos químicos en lixiviado de escoria salina de aluminio secundario.

Parámetros	Muestra de escoria salina de aluminio secundario		Norma CONACYT Agua, residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
	Suelta	Compacta	
Aluminio	3.5	4.0	5
Calcio	No detectado	No detectado	No normado
Cloruros	2000	2450	No normado
Cromo hexavalente	0.03	0.03	0.1
Fluoruros	2	2	5
Magnesio	39.85	27.22	No normado
Manganeso	0.03	0.11	2.0
Níquel	0.03	0.10	0.2
Nitrógeno Amónico	No detectado	No detectado	No normado
Potasio	30.80	31.60	No normado
Sílice	1.03	0.82	No normado
Sodio	32.89	40.00	No normado
Zinc	122.4	91.8	5

Ref. CENSALUD – UES, Laboratorio de Aguas de la Facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador. Ver anexo E.

Observaciones:

- a. En general, se observa que las concentraciones detectadas de los elementos analizados, en las muestras de escoria salina, es mayor en la muestra de escoria salina compacta que en la muestra de escoria salina suelta.
- b. La concentración de aluminio detectada en la muestra de escoria salina compacta es mayor que la concentración detectada en la muestra de escoria salina suelta.
- c. Las concentraciones de los elementos analizados, no exceden los valores establecidos en la Norma CONACYT de Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor, con excepción de la concentración de Zinc, que excede el valor establecido en la norma en aproximadamente un 90% en el caso de la escoria salina suelta y en un 75% en el caso de la escoria salina compacta.
- d. La concentración de cloruros (sales) detectada en ambas muestras es alta, y es aún mayor en la muestra de escoria salina compacta.

5.2.5 Análisis químico instrumental de Difracción de Rayos X de muestras de escorias salinas de aluminio secundario

Muestras de la fracción insoluble resultante del proceso de lixiviación, junto con muestras de las fracciones con tamaño de partícula mayor a 5 mm, para ambos tipos de escoria salina de aluminio secundario, son enviadas al Laboratorio Geoquímico de La Geo El Salvador, para la realización de análisis de Difracción de Rayos X. Los resultados se muestran en el Cuadro 5-6.

Cuadro 5-6 Resultados de análisis de difracción de rayos X de muestras de escorias salinas de aluminio secundario.

Muestra	Descripción	Composición Mineralógica			
		Nombre del elemento	Fórmula Química	Presencia	
Escoria Salina Compacta	Fracción insoluble de lixiviación	La muestra está compuesta por partículas de diferentes tamaños y formas, color gris-café. Se observa partículas metálicas redondeadas gris (60%) en su mayoría y fragmentos rojizos y blancos. Los fragmentos blancos no reaccionaron con el ácido clorhídrico.	Aluminio Chabazita Bayerita Cuarzo	Al CaAl ₂ Si ₂ O ₈ Cl ₂ Al(OH) ₃ SiO ₂	50% 18% 18% 14%
	Fracción con tamaño de partícula mayor a 5 mm	La muestra está compuesta por partículas metálicas redondeadas de color gris metálico (95%), algunas porosas, cubiertas de partículas terrosas y finas de color café-claro. Dureza alta.	Parte terrosa: Aluminio Chabazita Bayerita Gibbsita Silvita Parte metálica: Aluminio	Al CaAl ₂ Si ₂ O ₈ Cl ₂ Al(OH) ₃ Al(OH) ₃ KCl Al	26% 25% 18% 17% 14% 100%
Escoria Salina Suelta	Fracción insoluble de lixiviación	La muestra está compuesta por partículas metálicas redondeadas (60%) y partículas terrosas de diferentes tamaños de color gris-café, se observa menor cantidad de partículas rojizas	Aluminio Silicatos Gibbsita Silvita	Al Ca _{1.95} Al _{3.9} Si _{8.1} O ₂₄ Al(OH) ₃ KCl	36% 31% 16% 17%
	Fracción con tamaño de partícula mayor a 5 mm	La muestra está compuesta por partículas redondeadas metálicas de color gris metálico (95%), cubierta de partículas terrosas y finas de color café-claro. Dureza alta.	Parte terrosa: Aluminio Chabazita Bayerita Gibbsita Silvita Gahnita Parte metálica: Aluminio	Al CaAl ₂ Si ₂ O ₈ Cl ₂ Al(OH) ₃ Al(OH) ₃ KCl ZnAl ₂ O ₄ Al	26% 22% 15% 10% 10% 17% 100%

Ref. Laboratorio Geoquímico de La Geo El Salvador, Ver anexo E.

5.2.6 Análisis químico instrumental de Espectrofotometría de Absorción Atómica de muestras de escorias salinas de aluminio secundario

Muestras de la fracción insoluble resultante del proceso de lixiviación, junto con muestras de las fracciones con tamaño de partícula mayor a 5 mm (fracción retenida en malla 4), para ambos tipos de escoria salina, son enviadas al Laboratorio Geoquímico de La Geo El Salvador, para la realización de análisis de Espectrofotometría de Absorción Atómica. Los resultados se muestran en el Cuadro 5-7.

Cuadro 5-7 Resultados de análisis de AA a muestras de escorias salinas de aluminio secundario

Elemento analizado	Escoria salina suelta		Escoria salina compacta	
	lodos de lixiviados	retenida malla 4	lodos de lixiviados	retenida malla 4
Na	10,048.20	2,858.40	14,614.60	9,859.40
K	2,823.50	114.30	2,120.20	2,666.90
Ca	20,428.50	1,694.50	37,483.00	<5.0
Mg	38,315.90	4,241.90	47,607.10	1,293.00
Si	109,699.40	114,452.30	71,406.90	84,936.20
Al	381,290.50	355,099.50	437,604.10	308,816.90
Zn	735.80	708.90	495.20	501.10

AA : Espectrofotometría de Absorción Atómica

Ref. Laboratorio Geoquímico de La Geo El Salvador, ver anexo E.

Cuadro 5-8 Resumen de resultados de análisis instrumental de muestras de escoria salina de aluminio

Elemento analizado	Escoria salina suelta			Escoria salina compacta		
	Lixiviados (mg/lit)	Lodos de lixiviados (mg/kg)	Retenida malla 4 (mg/kg)	Lixiviados (mg/lit)	Lodos de lixiviados (mg/kg)	Retenida malla 4 (mg/kg)
Na	3.50	10,048.20	2,858.40	4.00	14,614.60	9,859.40
K	30.80	2,823.50	114.30	31.60	2,120.20	2,666.90
Ca	32.89	20,428.50	1,694.50	40.00	37,483.00	<5.0
Mg	-	38,315.90	4,241.90	-	47,607.10	1,293.00
Si	39.85	109,699.40	114,452.30	27.22	71,406.90	84,936.20
Al	1.03	381,290.50	355,099.50	0.82	437,604.10	308,816.90
Zn	122.40	735.80	708.90	91.80	495.20	501.10

5.2.7 Balance de masa para determinación de composición química de escorias salinas de aluminio secundario

Para la determinación de la composición química de la escoria salina se realizan balances de masa combinando los resultados obtenidos de los análisis de fometría y AA, como se muestra a continuación.

Para el proceso de lixiviación de la Escoria Salina Suelta se tiene que:

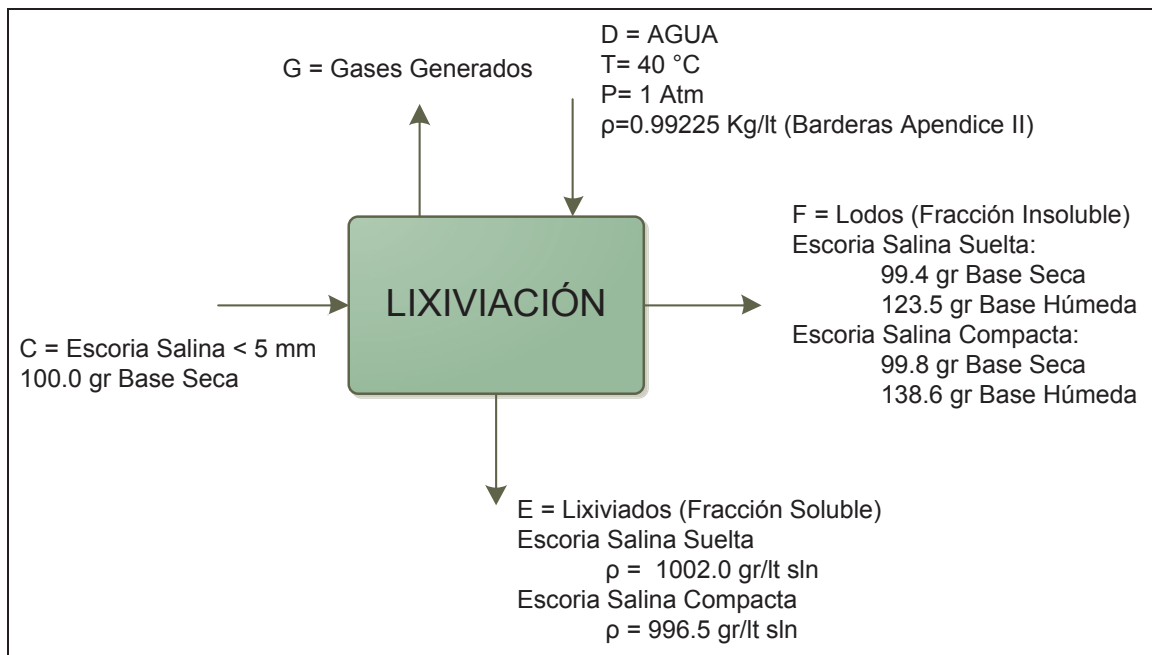


Figura 5-18 Diagrama de proceso de lixiviación de escorias salinas de aluminio secundario para balance de masa

Balance de Corrientes:

$$C + D = E + F + G \quad \text{E. 5.1}$$

La corriente G se considera despreciable, ya que la cantidad de gases generados es mínima.

$$G = 0$$

De acuerdo con la densidad del Agua a las condiciones expresadas en la figura 5-23 para la corriente D la masa de agua que se emplea para la lixiviación de la escoria corresponde a:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{P=1 \text{ atm}}_{T=40 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.99225 \frac{\text{kg}}{\text{lt}}; \text{ Valiente Bardenas Apéndice II}$$

$$D = \frac{0.99225 \text{ kg}}{\text{lt}} \times 1\text{lt} \times \frac{100 \text{ gr}}{1 \text{ kg}}$$

$$\mathbf{D = 992.25 \text{ gr}}$$

Al resolver E. 5.1 para la corriente E para el caso de la escoria salina suelta se tiene que:

$$C + D = E + F + G$$

$$100.0 \text{ gr} + 992.25 \text{ gr} = E + 123.5 \text{ gr} + 0$$

$$E = 100.0 \text{ gr} + 992.25 \text{ gr} - 123.5 \text{ gr}$$

$$\mathbf{E = 968.75 \text{ gr}}$$

Para conocer la cantidad en masa de las especies atómicas contenidas en la corriente E (fracción soluble del proceso de lixiviación de escoria salina suelta) se realiza un balance por cada especie atómica, a continuación se muestra el ejemplo de cálculo realizado para el Aluminio.

$$M_{\text{Al}}^E = X_{\text{Al}}^E \times E \quad \text{E. 5.2}$$

Donde:

M_{Al}^E = Masa de Aluminio en la Corriente E

X_{Al}^E = Concentración de Aluminio en la Corriente E;
conocida del análisis de Fometría de Lixiviados de escoria salina suelta

Resolviendo la ecuación 5.2 se tiene que:

$$M_{\text{Al}}^E = \frac{3.5 \text{ mg Al}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{Al}}^E = 3.384 \text{ mg} = 0.003384 \text{ gr}}$$

El Cuadro 5-9 muestra los valores obtenidos de realizar los cálculos anteriores a cada una de las concentraciones de las especies atómicas del lixiviado de escoria Salina Suelta. Para el caso de la escoria salina compacta, los resultados se muestran en el Cuadro 5-10.

Cuadro 5-9. Cuadro resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lixiviado de escoria salina suelta de aluminio secundario

Especie atómica	Concentración detectada por fotometría de lixiviados de escoria salina suelta mg lt sln	Cálculo de masa de especie atómica contenida en el lixiviado de escoria salina suelta gr
Al	3.50	0.003384
Cl	2000.00	1.933633
Mg	39.85	0.038528
K	30.80	0.029778
Si	1.03	0.000996
Na	32.89	0.031799
Zn	122.40	0.118338

Cuadro 5-10. Cuadro resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lixiviado de escoria salina compacta de aluminio secundario

Especie atómica	Concentración detectada por fotometría de lixiviados de escoria salina compacta mg lt sln	Cálculo de masa de especie atómica contenida en el lixiviado de escoria salina compacta gr
Al	4.00	0.00383
Cl	2450.00	2.34465
Mg	27.22	0.02605
K	31.60	0.03024
Si	0.82	0.00078
Na	40.00	0.03828
Zn	91.80	0.08785

Para conocer la masa de las especies atómicas contenidas en la corriente F (Fracción Insoluble de lixiviados de Escoria Salina Suelta) se realizan los siguientes balances por especie atómica:

$$M_{Al}^F = X_{Al}^F \times F \quad E. 5.3$$

Donde:

M_{Al}^F = Masa de Aluminio en la Corriente F

X_{Al}^F = Concentración de Aluminio en la Corriente F;
conocida del análisis de AA de escoria salina suelta

Resolviendo la ecuación 5.3 se tiene que:

$$M_{Al}^F = \frac{381,290.50 \text{ mg Al}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$M_{Al}^F = 37900.80 \text{ mg} = 37.90 \text{ gr}$$

El Cuadro 5-11 muestra los valores obtenidos de realizar los cálculos anteriores a cada una de las concentraciones de las especies atómicas de los lodos del lixiviado de escoria Salina Suelta. Para el caso de la escoria salina compacta, los resultados se muestran en el Cuadro 5-12.

Cuadro 5-11. Cuadro Resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lodo de lixiviado de escoria salina suelta de aluminio secundario

Especie atómica	Concentración detectada por AA de lodos de lixiviados de escoria salina suelta $\frac{\text{mg}}{\text{kg Lodo}}$	Cálculo de masa de especie atómica contenida en el lodo de lixiviado de escoria salina suelta gr
Al	381290.5	37.900
Ca	20428.5	2.031
Mg	38315.9	3.809
K	2823.5	0.281
Si	109699.4	10.904
Na	10048.2	0.999
Zn	735.8	0.073

Cuadro 5-12. Cuadro resumen de masas de especies atómicas contenidas en el lodo de lixiviado de escoria salina compacta

Especie atómica	Concentración detectada por AA de lodos de lixiviados de escoria salina compacta $\frac{\text{mg}}{\text{kg Lodo}}$	Cálculo de masa de especie atómica contenida en el lodo de lixiviado de escoria salina compacta gr
Al	437604.1	43.673
Ca	37483	3.741
Mg	47604.1	4.751
K	2120.2	0.212
Si	71406.9	7.126
Na	14614.6	1.459
Zn	495.2	0.049

Luego se calculan las fracciones en peso de las especies atómicas en la corriente C, que corresponde a la escoria salina con tamaño de partícula menor a 5 mm. La masa de Aluminio en la corriente C se calcula como la suma de las masas de aluminio contenidas en ambas fracciones de lixiviado, tanto la parte soluble como la parte no soluble, se muestra el ejemplo de cálculo para el caso de la escoria salina suelta:

$$M_{Al}^C = M_{Al}^F + M_{Al}^E$$

$$M_{Al}^C = 37.9 \text{ gr} + 0.00338 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Al}^C = 37.904 \text{ gr}}$$

La masa de agua que permanece en el lixiviado se calcula mediante el siguiente Balance de Agua en Lixiviados E

$$E = M_{Agua}^E + M_{Especies}^E$$

$$M_{Agua}^E = E - M_{Especies}^E$$

$$M_{Agua}^E = 968.75 \text{ gr} - 2.15645 \text{ gr}$$

$$M_{Agua}^E = 966.5935 \text{ gr}$$

Las masas de las especies atómicas obtenidas para la corriente C se muestran en el Cuadro 5-13 para ambos tipos de escoria salina. Con los datos obtenidos es posible determinar la composición en peso de las especies atómicas contenidas en la corriente C, es decir la composición en peso de las especies atómicas de la escoria salina con tamaño de partícula menor a 5 mm, esta composición se muestra en el Cuadro 5-13 para ambos tipos de escoria.

Cuadro 5-13. Resumen de cálculo de composición química de escoria salina de aluminio secundario con tamaño de partícula menor a 5 mm

Especie Atómica	Escoria Salina Suelta		Escoria Salina Compacta	
	Masa (gr)	Composición %p/p	Masa (gr)	Composición %p/p
Al	37.904	37.90	43.677	43.68
Ca	2.031	2.03	3.741	3.74
Mg	3.847	3.85	4.777	4.78
K	0.310	0.31	0.242	0.24
Si	10.905	10.91	7.127	7.13
Na	1.031	1.03	1.497	1.50
Zn	0.191	0.19	0.137	0.14
Cl	1.934	1.93	2.345	2.34

La forma de cálculo de la composición en peso de la fracción de escoria salina con tamaño de partícula mayor a 5 mm, se muestra a continuación para el caso de la escoria salina suelta:

$$M_{Al}^B = X_{Al}^B \times B$$

$$M_{Al}^B = \frac{355,099.50 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$M_{Al}^B = 154.43 \text{ gr}$$

Las masas de las especies atómicas obtenidas para la corriente B se muestran en el Cuadro 5-14 para ambos tipos de escoria salina. Con los datos obtenidos es posible determinar la composición en peso de las especies atómicas contenidas en la corriente B, es decir la composición en peso de las especies atómicas de la escoria salina con tamaño de partícula mayor a 5 mm, esta composición se muestra en el Cuadro 5-14 para ambos tipos de escoria.

Cuadro 5-14. Resumen de cálculo de composición química de escoria salina de aluminio secundario con tamaño de partícula mayor a 5 mm

Especie Atómica	Escoria Salina Suelta		Escoria Salina Compacta	
	Masa (gr)	Composición %p/p	Masa (gr)	Composición %p/p
Al	154.43	35.51	123.80	28.47
Ca	0.74	0.17	0.00	0.00
Mg	1.84	0.42	0.52	0.12
K	0.05	0.01	1.07	0.25
Si	49.78	11.45	34.05	7.83
Na	1.24	0.29	3.95	0.99
Zn	0.31	0.07	0.20	0.05

Las composiciones en peso de la escoria salina en estudio se muestran en el Cuadro 5-15 para ambos tipos de escoria salina. Todos los cálculos realizados para el balance de masa descrito anteriormente se presentan en el Anexo A de este documento.

Cuadro 5-15. Resumen de composición química en peso de escoria salina suelta y escoria salina compacta de aluminio secundario, por especie atómica

Especie Atómica	Escoria salina suelta		Escoria salina compacta	
	Fracción > 5 mm	Fracción < 5 mm	Fracción > 5 mm	Fracción < 5 mm
Al	35.51%	37.90%	28.47%	43.68%
Ca	0.17%	2.03%	0.00%	3.74%
Mg	0.42%	3.85%	0.12%	4.78%
K	0.01%	0.31%	0.25%	0.24%
Si	11.45%	10.91%	7.83%	7.13%
Na	0.29%	1.03%	0.99%	1.50%
Zn	0.07%	0.19%	0.05%	0.14%

Capítulo 6. Propuestas de gestión de la escoria salina de aluminio secundario

La gestión de residuos es un aspecto importante a considerar en cualquier proceso productivo, y con mayor relevancia si estos residuos son clasificados como peligrosos, o es posible su reciclaje, reúso o recuperación de componentes. Las escorias salinas de aluminio son un residuo clasificado como peligroso, y existen alternativas que permiten una gestión ambientalmente adecuada.

Las propuestas de gestión de la escoria salina de la industria de aluminio de El Salvador, que se presentan en esta sección, han sido desarrolladas con tres lineamientos base, el primero atiende el principio de jerarquía de gestión de residuos que establece que se debe fijar un orden de preferencia para la selección de la alternativa de gestión a aplicar a determinado residuo. Este principio de jerarquía, fomenta que se considere la gestión de los residuos en el orden de preferencia siguiente

- a. Reducción de la generación de Residuos
- b. Reutilización del Residuo
- c. Reciclado del Residuo
- d. Valorización del Residuo
- e. Eliminación del Residuo

En segundo lugar se atiende la composición química de la escoria salina de aluminio generada por la industria de aluminio en El Salvador, y finalmente en tercer lugar, se considera la viabilidad técnica y económica del método de gestión, tomando en cuenta las condiciones tecnológicas, territorio, y otros factores propios de la región.

En este capítulo se presentan las alternativas de gestión de escoria salina, generada por la Industria de Aluminio en El Salvador. Dichas propuestas se aplican a escoria salina con características similares a las detalladas en la sección 5, destacando que éste residuo estudiado es resultado de la segunda fundición de chatarra nueva de aluminio. Tomando como base la composición química característica de cada tipo de escoria salina estudiada, en su forma suelta y compacta, se proponen alternativas de gestión, que se consideran más apropiadas. En la Figura 6-1 y Figura 6-2 se muestra un esquema general de dichas propuestas.

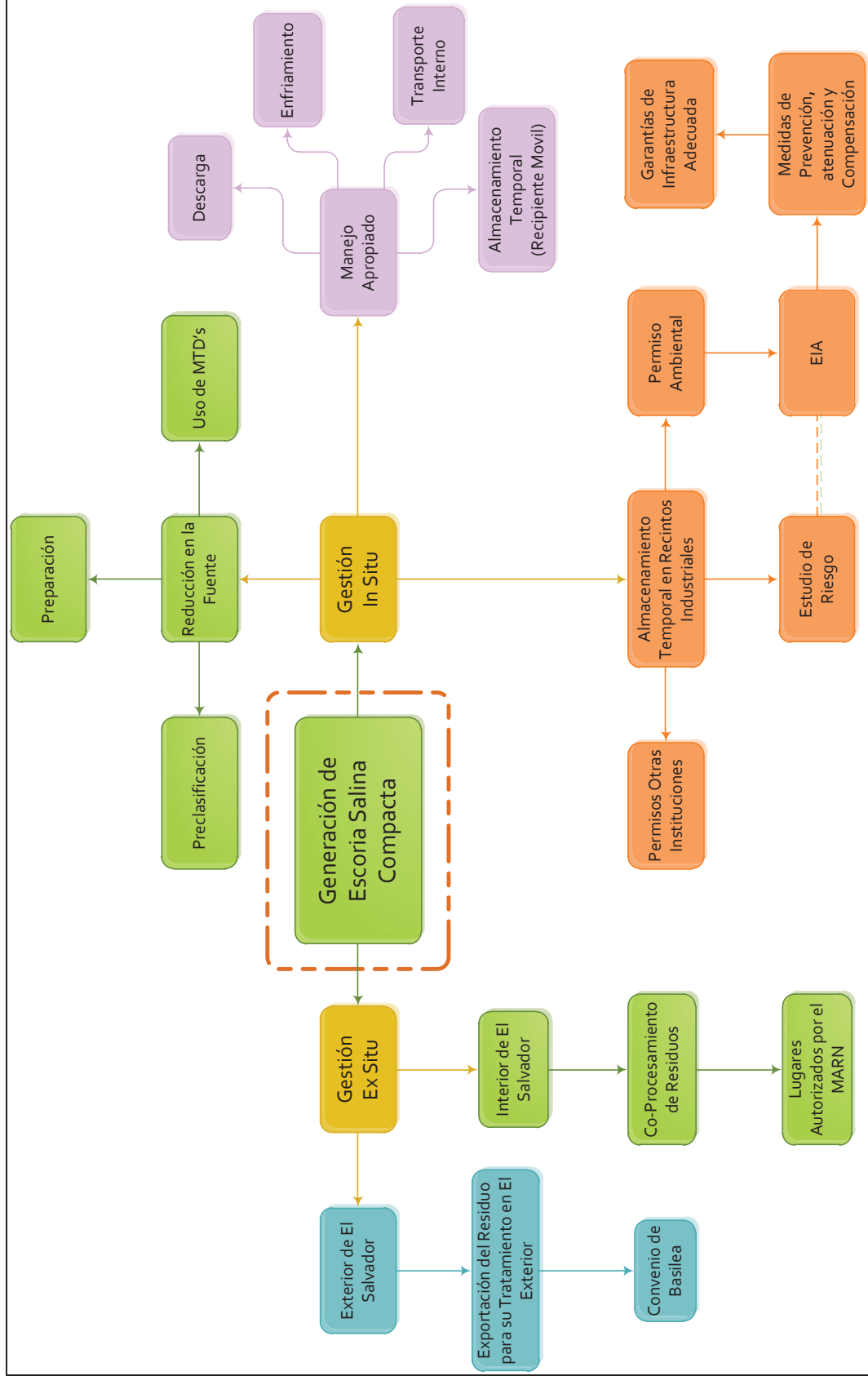


Figura 6-1. Propuesta de alternativas de gestión para escoria salina compacta de aluminio secundario

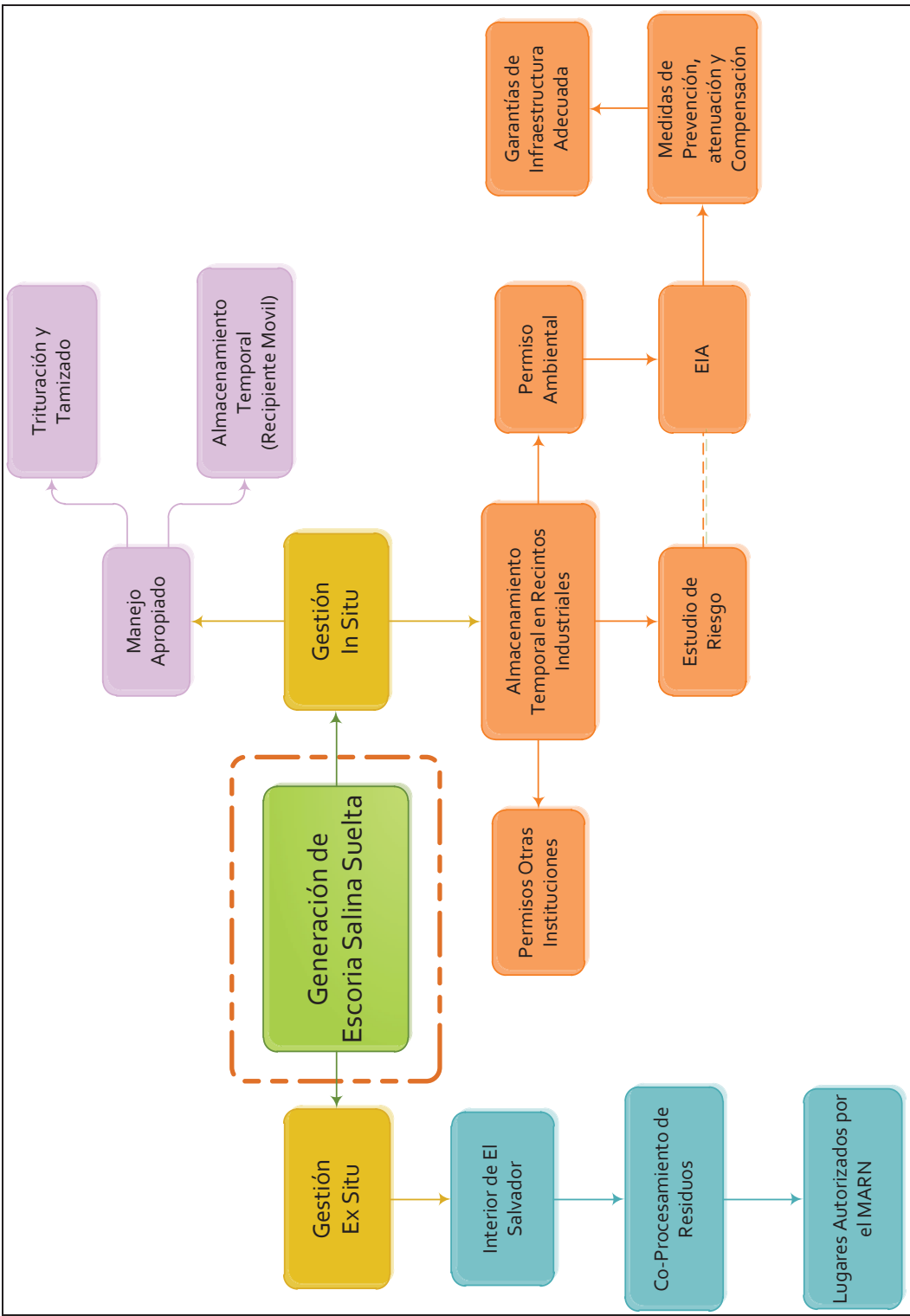


Figura 6-2. Propuesta de alternativas de gestión de la escoria salina suelta de aluminio secundario

6.1 Reducción de generación de escorias salinas de aluminio secundario en la fuente.

Como alternativa principal se propone reducir en la fuente la generación de escoria salina de aluminio, ya que de ésta forma se optimizan los procesos productivos y se minimizan las emisiones de contaminantes al ambiente. La minimización de residuos es considerada la forma más efectiva para aproximarse al tratamiento de los residuos, ya que implica la prevención.

Además de acuerdo con el artículo 21 del Reglamento Especial en Materia de Sustancias Residuos y Desechos Peligrosos establece que “Los generadores de residuos peligrosos deberán fomentar su minimización en el sector productivo, como política aplicable a sus actividades, a través del uso de tecnologías que reduzcan la generación de residuos peligrosos, así como a través del desarrollo de actividades y procedimientos que conduzcan a una gestión sostenible de los residuos mencionados y a la difusión de tales actividades.”

Algunas de las medidas aplicables para la reducción de generación de escorias salinas en la fuente se describen en el Cuadro 6-1. Estas medidas propuestas podrían implicar inversión económica para el generador de los residuos, sin embargo, esta inversión generalmente es compensada con los ahorros que se obtienen de su aplicación, ya que se reducen los costos de gestión del residuo en cuestión, así como el costo de las operaciones asociadas como almacenamiento, transporte, etc. Además de los posibles beneficios económicos, que se puedan tener por la aplicación de técnicas para la reducción de residuos en la fuente, se tienen los beneficios para el medio ambiente.

Cuadro 6-1 Descripción de medidas propuestas para minimización de generación de escorias salinas de aluminio secundario en la fuente.

Medida o acción	Descripción
Preclasificación del material de aluminio a reciclar	Evitar la presencia de aceites, plásticos y compuestos de cloro en el material de alimentación a fin de reducir la generación de PCDDs ³ / PCDFs ⁴ durante la combustión. Esto puede lograrse evitando el uso de sales cloradas, eliminando aceites, plásticos y pinturas en la chatarra a reciclar, y de ser necesario, utilizar técnicas térmicas para eliminar revestimientos.
Preparación del material de aluminio a fundir	Con esta medida se busca reducir al máximo posible, el contacto del material a fundir con el ambiente, ya que el aluminio es altamente reactivo, se oxida con facilidad al estar en contacto con el oxígeno del ambiente, formando una capa de óxido de aluminio en la superficie del material, la cual protege el material de que continúe la oxidación, pero aumenta la cantidad de escoria salina que se genera durante la segunda fundición, por lo que al preparar el material se debe procurar que el área expuesta al ambiente sea la menor posible, es decir evitar abundantes cantidades de piezas pequeñas de material de fundición.
Uso de mejores técnicas disponibles (MTD)	Los procesos de fundición que se consideran como MTD son, el uso de hornos de reverbero, horno rotatorio basculante y el horno rotatorio, según los materiales de alimentación (ver sección 2.2). El uso de las MTD busca, minimizar la generación de residuos, hacer uso de sustancias menos peligrosas a las empleadas en la actualidad, fomentar el desarrollo de técnicas de recuperación y reciclado de sustancias generadas, sustancias utilizadas en el proceso y de los residuos cuando proceda, prevenir o reducir al mínimo el impacto global de las emisiones y de los riesgos en el medio ambiente, así como también prevenir cualquier riesgo de accidente o de reducir las consecuencias para el medio ambiente. El ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra un resumen comparativo de las MTD empleadas actualmente por algunas empresas dedicadas a la producción de aluminio secundario.

Fuente: Centro Nacional de Referencias sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes, Directrices sobre Mejores Técnicas Disponibles (España, 2009).

³Dibenzoparadióxinas Policloradas

⁴Dibenzofuranos Policlorados

6.2 Manejo apropiado de escorias salinas de aluminio secundario

El manejo de la escoria salina de aluminio, desde el momento de su generación determina el grado de recuperación del aluminio metálico contenido en el residuo en cuestión. De acuerdo con los resultados presentados en la sección tal, se estima que la escoria de aluminio compacta es la que permite un mayor aprovechamiento del residuo y sus componentes.

6.2.1 Manejo apropiado de escoria salina compacta de aluminio secundario

El manejo adecuado de la escoria salina de aluminio debe cumplir ciertas condiciones, las cuales, de ser atendidas, conllevan beneficios relacionados con optimización de espacio, reducción de pérdidas, reducción de riesgos, etc. Éstas condiciones y sus correspondientes beneficios se describen en el Cuadro 6-2:

Cuadro 6-2 Condiciones de manejo apropiado de la escoria salina de aluminio secundario y sus beneficios

Condición de manejo optima	Beneficio
1. La descarga de la escoria debe realizarse en caliente y de forma rápida en moldes prediseñados para esta operación.	a. Reducción de contaminación de la escoria con otros materiales, ya que se deposita en moldes limpios. b. Reduce los riesgos de accidentes (como quemaduras). c. La descarga rápida reduce el contenido de residuos en el crisol de fundición de aluminio secundario, haciendo que la limpieza de éste sea más fácil y rápida. d. Se facilita el manejo del material.

Sigue...

Cuadro 6-2 Condiciones de manejo apropiado de la escoria salina de aluminio secundario y sus beneficios

Condición de manejo optima	Beneficio
<p>2. El enfriamiento de la escoria debe ser en los moldes de descarga, hasta que la escoria se encuentre totalmente fría. (Escoria Salina Compacta). Los moldes de descarga deben cumplir las siguientes características:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ser de un material termo conductor. • Tener un sello o tapadera que permita una mejor compactación. 	<p>a. Mayor contenido de aluminio metálico atrapado en el residuo, ya que se reduce el área de contacto con el ambiente (oxígeno del aire) que oxida al aluminio contenido en la escoria.</p> <p>b. Reducción de la generación de polvos finos de escoria salina.</p> <p>c. Se facilita el transporte del material.</p> <p>d. Se propicia el proceso de enfriamiento</p>
<p>3. Utilizar medios de enfriamiento rápido de la escoria compacta</p>	<p>a. Se reduce la energía de reacción del óxido de aluminio por la disminución de temperatura. Reduciendo la formación de óxidos de aluminio.</p> <p>b. Se hace más rápido el flujo del proceso.</p>
<p>4. Al momento de cualquier modo de transporte de los lingotes de escoria salina de aluminio, se debe evitar la fricción de los lingotes.</p>	<p>c. Reducción de la generación de polvos finos de escoria salina.</p> <p>d. Reducción de pérdidas de material.</p>
<p>5. El almacenamiento temporal de los lingotes de escoria salina, debe ser en recipientes plásticos o de fibra de vidrio, lo suficientemente amplios, para que exista la menor fricción posible.</p>	<p>a. Reducción de la generación de polvos finos de escoria salina.</p> <p>b. Reducción de pérdidas de material.</p> <p>c. Reducción de riesgos de contacto con agua y generación de gases tóxicos</p> <p>d. Reducción de riesgos de lixiviación del material por agentes atmosféricos (humedad, lluvia, etc.)</p>
<p>6. El almacenamiento temporal⁵ de los lingotes de escoria debe ser en un espacio dispuesto especialmente para esta actividad y debe cumplir con las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espacio cerrado y techado • Ambiente seco • Espacio debidamente señalizado e identificado 	<p>a. Reducción de riesgos de emisiones al aire</p> <p>b. Reducción de riesgos de contacto con agua y generación de gases tóxicos</p> <p>c. Reducción de riesgos de lixiviación del material por agentes atmosféricos (humedad, lluvia, etc.)</p>

⁵ El almacenamiento apropiado de la escoria salina se describe más ampliamente en la sección 6.3

6.2.2 Manejo apropiado de escoria salina suelta de aluminio secundario

Teniendo en cuenta que la forma de enfriamiento de escorias salinas más inmediata es la de descargar el residuo en el suelo, dando lugar a que las escorias sean de forma amorfa, es necesario proponer alternativas que atiendan a estas características. El Cuadro 6-3 describe algunas condiciones de manejo apropiadas para el residuo en forma suelta.

Cuadro 6-3 Condiciones de manejo recomendadas para la escoria salina suelta de aluminio secundario

Condición de manejo optima	Beneficio
1. Someter a trituración y tamizado la escoria salina	<p>a. Separación de las sales, óxidos y Aluminio metálico contenidos en el residuo, por medio de tamaño de partícula selectivo, para su tratamiento, reciclaje y/o recuperación.</p> <p>b. Se facilita el manejo del residuo.</p>
2. Hacer uso de un filtro de mangas para captación de polvos finos, resultado de la trituración de la escoria salina suelta.	<p>a. Reducción de las emisiones de polvos finos contaminantes al aire.</p> <p>b. Reducción de riesgos a la salud humana.</p> <p>c. Recuperación de polvos finos de aluminio</p>
3. El almacenamiento temporal del residuo triturado y tamizado, debe ser en recipientes plásticos o de fibra de vidrio.	<p>a. Reducción de emisiones al aire de polvos finos de escoria salina.</p> <p>b. Reducción de pérdidas de material.</p> <p>c. Reducción de riesgos de contacto con agua y generación de gases tóxicos</p> <p>d. Reducción de riesgos de lixiviación del material por agentes atmosféricos (humedad, lluvia, etc.)</p>
<p>4. El almacenamiento temporal del residuo previamente triturado y tamizado, debe ser en un espacio dispuesto especialmente para esta actividad y debe cumplir con las siguientes especificaciones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espacio cerrado y techado • Ambiente seco • Espacio debidamente señalado e identificado 	<p>a. Reducción de riesgos de emisiones al aire</p> <p>b. Reducción de riesgos de contacto con agua y generación de gases tóxicos</p> <p>c. Reducción de riesgos de lixiviación del material por agentes atmosféricos (humedad, lluvia, etc.)</p>

Fuente: Elaboración Propia.

6.3 Almacenamiento adecuado de escorias salinas de aluminio secundario en recintos industriales, bodegas y recintos aduanales

Las escorias salinas son necesariamente transportadas y almacenadas bajo parámetros específicos con el propósito de brindar las mejores condiciones para su estabilidad. A nivel mundial, la escoria salina de aluminio es clasificada por su peligrosidad, considerando aspectos para la salud humana y del medio ambiente debido a sus características tóxicas, corrosivas y oxidantes, para lo cual se establecen medidas adecuadas en cuanto al manejo y almacenamiento de este residuo.

Bajo la normativa nacional, y cumplimiento de las Leyes y reglamentos del Medio Ambiente, al iniciar actividades de almacenamiento de materiales peligrosos, se requiere obtener un Permiso Ambiental, y contar con las medidas de prevención, atenuación o compensación, las cuales son evaluadas ambientalmente por el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Para obtener dicho permiso, de acuerdo con el Art. 21 literal d) de la Ley del Medio Ambiente se exige la presentación de un Estudio de Impacto Ambiental para las instalaciones de almacenamiento de materiales peligrosos que al mismo adicionarán un Estudio de Riesgo y Manejo Ambiental. Por otra parte, con el propósito de controlar la generación de residuos o desechos en el país, se han firmado y ratificado convenios internacionales respecto al manejo ambientalmente racional, tales como el Convenio de Basilea y Convenio de Estocolmo, a los cuales se hace referencia en el Capítulo 4 de este documento.

Para el desarrollo de esta alternativa de gestión de las escorias salinas se toma como base los lineamientos descritos en el “Manual de Higiene y Seguridad Ocupacional para el Manejo de Productos Químicos en Instalaciones Industriales y Bodegas en General” desarrollado por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales.

6.3.1 Consideraciones para el almacenamiento de la escoria salina de aluminio secundario

El propósito general del almacenamiento de las escorias salinas de aluminio es guardar el residuo de forma tal que no cause daños a la salud humana y del medio ambiente. El tiempo de almacenamiento debería corresponder al mínimo posible, sólo como un paso

previo a su tratamiento y disposición final ambientalmente adecuada, como máximo se recomienda un tiempo de almacenamiento de 6 meses.

En términos generales los requisitos que debe tener el lugar seleccionado para almacenar las sustancias peligrosas son:

- a. Control y vigilancia de la temperatura, humedad, ventilación y movimiento de sustancias que entran y salen del almacén.
- b. Colocación en un lugar visible de avisos y prohibiciones de seguridad como “peligro”, “corrosivo” “prohibido fumar”, salidas de emergencias, etc.
- c. Etiquetado de los contenedores y sus zonas de almacenaje. Las etiquetas utilizadas deben ser resistentes a las condiciones de almacenamiento.
- d. Normas e instrucciones para la entrada y movimiento del personal en la zona de almacenaje.
- e. Selección del equipo de manipulación correcto y entrenamiento en el uso adecuado.
- f. Aplicar buenas prácticas de estiba para evitar daños a los envases. Almacenaje sistemático con calzos o cuñas de materia inerte, pilas de altura limitada, separación de sustancias no compatibles, pasillos amplios, altura de techo y ventilación adecuada.
- g. Equipo idóneo de extinción de incendios, sistemas de alarma y detección de incendios, duchas y equipos de primeros auxilios.
- h. Cuando sea necesario y esté prescrito su uso, entrega al personal de manipulación y a otros empleados de ropas protectoras especiales, guantes, protector visual, cascos, máscaras de gas, lámparas de seguridad y dispositivos de alarma.
- i. Comprobaciones regulares de la disponibilidad y buen estado del equipo y la ropa de protección personal para el manejo de sustancias peligrosas.
- j. Comprobaciones regulares del buen estado de los envases o recipientes conteniendo las sustancias peligrosas almacenadas, realizando inspecciones regulares para identificar la presencia de signos de fuga o deterioro tales como: fuerte olor, barriles de metal oxidados o con fuga, envases de plásticos deformados o con fuga, tapas o etiquetas faltantes, etc.
- k. Entrenamiento al personal idóneo sobre métodos seguros de manipulación, almacenaje, primeros y auxilios y planes de contingencia.
- l. Contar con un manual de operaciones de almacenaje actualizado.

- m. Evitar la contaminación de aguas superficiales y freáticas, así como el vertimiento de sustancias al sistema de alcantarillado.
- n. El lugar seleccionado para almacenar sustancias peligrosas debe de estar alejado de casas o zonas residenciales.
- o. El almacén debe poseer piso impermeable y un área controlada diseñada para retener cualquier derrame y fuga.
- p. El área de almacenamiento debe mantenerse limpia y ordenada.
- q. Proporcionar al personal que manipula las sustancias peligrosas la información necesaria para su seguridad y la del medio ambiente.

6.3.2 Condiciones de la operación de almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario

Para el manejo de la escoria salina de aluminio se debe establecer un sistema de documentación para todo el personal que incluya instrucciones de la operación segura y correcta de todos los equipos, incluyendo equipo de protección personal y del almacenamiento del residuo en cuestión, e instrucciones y procedimientos sobre higiene, emergencias, seguridad y medio ambiente.

El almacenamiento debe estar basado en un plan documentado, de tal manera que en caso de un incidente sea posible tener una visión general del volumen del residuo involucrado. Es aconsejable dividir el área de almacenamiento en sectores y marcar cada sección claramente.

6.3.3 Condiciones de la bodega de escorias salinas de aluminio secundario

El lugar de almacenamiento de la Escoria Salina de Aluminio debe estar alejado de zonas densamente pobladas, fuentes de captación de agua potable y áreas inundables, debido a los posibles efectos dañinos a la salud humana y del medio ambiente que involucra el residuo en cuestión (Ver Capítulo 3). Es indispensable que se escoja un sitio dotado de servicios de electricidad, agua potable y red de drenaje público. El sistema de drenaje debe evitar que en caso de emergencia corrientes contaminadas alcancen las fuentes de agua o el alcantarillado público. Los materiales de construcción del almacén no deben ser

combustibles y la estructura del edificio debe ser de concreto con armazón de hierro o acero. Es recomendable que las estructuras de acero se protejan aislándolas (Recubrir de concreto las estructuras de acero).

Deben existir salidas de emergencias distintas a las de las puertas principales de ingreso de materiales. Al planificar la ubicación de estas salidas se deben tener en cuenta todas las emergencias posibles, evitando, como principal condicionante, que alguien pueda quedar atrapado. Se debe asegurar que la salida de emergencia esté suficientemente señalizada. Las puertas deberán abrirse en el sentido de la evacuación sin que haya necesidad del uso de llaves ni mecanismos que requieran un conocimiento especial. Su diseño debe incluir pasamanos de emergencia y debe facilitar la evacuación incluso en la oscuridad o en un ambiente de humo denso. Todas las áreas deben tener la posibilidad de evacuación hacia al menos dos direcciones.

El piso del lugar de almacenamiento de la escoria salina debe ser impermeable para evitar infiltración de contaminantes y resistente al residuo en cuestión. Debe ser liso sin ser resbaloso y libre de grietas que dificulten su limpieza. Su diseño debe prever la contención del agua de limpieza, de posibles derrames, por tanto se recomienda un desnivel del piso de mínimo el 1% con dirección a un sistema colector, y la construcción de un bordillo perimetral de entre 20 y 30 cm de alto. Se deben evitar drenajes abiertos, para prevenir la descarga a cuerpos de agua o al sistema de alcantarillado público. Deben estar señalizados los espacios autorizados para circulación de personal y sentido de ruta de evacuación en los pasillos, los cuales deben ser al menos de 5 m de ancho.

Los techos del lugar de almacenamiento deben estar diseñados de tal forma que no admitan el ingreso de agua lluvia a las instalaciones, pero que permitan la salida del humo y el calor en caso de un incendio, o en caso de liberación de gases tóxicos por contacto del agua o humedad con las escorias salinas.

Se recomienda que el lugar de almacenamiento cuente con condiciones óptimas de iluminación y ventilación natural, de esta forma se reducen los costos de operación de almacenamiento y se evitan instalaciones eléctricas especiales. Además se recomienda la instalación de equipos de ventilación forzada y/o extractores de aire que permitan la evacuación de vapores si es necesario, a través de conductos exclusivos para tal fin.

Todo equipo eléctrico debe estar ubicado de manera que se eviten daños accidentales causados por movimiento de vehículos o estibas, o por el contacto con agua u otro líquido. Los equipos deben ser conectados a tierra y estar protegidos contra sobrecargas.

Las condiciones idóneas de temperatura y humedad, para el almacenamiento de la escoria salina, no debe exceder los 40 °C y mantener un valor de humedad relativa lo más bajo posible para reducir el riesgo de reacciones químicas de la escoria salina con la humedad del ambiente.

En el Anexo C, se presentan los planos propuestos para la bodega de escorias salinas de aluminio secundario, en los cuales se han tomado en cuenta todas las consideraciones anteriormente descritas.

6.3.4 Almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario en recipientes móviles

Los recipientes deberán estar agrupados mediante paletizado, envasado, empaquetado u operaciones similares, cuando la estabilidad del conjunto lo precise o para prevenir excesivo esfuerzo sobre las paredes de los mismos. Se debe controlar el estado de seguridad de los envases periódicamente para garantizar un sistema de almacenamiento efectivo.

Cuando los recipientes se almacenen en estanterías o paletas se calculara, a efectos de altura máxima permitida, la suma de las alturas de los recipientes. El apilamiento de recipientes y bultos no debe ser superior a tres metros a menos que se utilice un sistema de estantería que evite la caída de éstos y se asegure su estabilidad, y teniendo en consideración que la altura máxima por estiba en tambores es de 3 estibas. El suelo y los primeros 100 mm (a contar desde el mismo), de las paredes alrededor de todo el recinto de almacenamiento deberán ser estancos al líquido, inclusive en puertas y aberturas para evitar el flujo de líquidos a las áreas adjuntas. Alternativamente, el suelo podrá drenar a un lugar seguro.

La altura máxima de apilamiento de envases apoyados directamente unos encima de otros vendrá determinada por la resistencia del propio envase y la densidad de los productos almacenados. Los recipientes estarán protegidos contra riesgos que provoquen su caída y rotura.

6.3.5 Consideraciones de higiene y seguridad ocupacional para el almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario

Debe haber una señalización adecuada, estableciendo los colores y señales normalizadas que adviertan a los trabajadores la presencia de un riesgo o la existencia de una prohibición u obligación, con el fin de prevenir accidentes que afecten la salud o el medio ambiente.

Las instrucciones de seguridad deben estar en castellano y con una interpretación única. Es conveniente el uso de símbolos fáciles de entender. Las señales deberán colocarse en un lugar estratégico a fin de atraer la atención de quienes sean los destinatarios de la información. Se recomienda instalarlos a una altura y en una posición apropiadas en relación al ángulo visual, teniendo en cuenta posibles obstáculos. El lugar de ubicación de la señal deberá estar bien iluminado, ser accesible y fácilmente visible. Si la iluminación general es insuficiente, se empleará una iluminación adicional ó se utilizarán colores reflectivos ó materiales fluorescentes. El material de las señales debe ser resistente a golpes, las inclemencias del tiempo y los efectos medio ambientales.

Aspectos a señalar:

- a. Señalizar el requerimiento de uso de equipo de protección personal para acceder a los sitios de almacenamiento.
- b. Señalizar todos los lugares de almacenamiento con las correspondientes señales de obligación a cumplir con determinados comportamientos, tales como no fumar, uso de equipo de protección personal, entre otros.
- c. Señalizar que sólo personal autorizado puede acceder a sitios de almacenamiento.
- d. Señalizar los corredores y las vías de circulación de montacargas y otros vehículos utilizando franjas continuas de un color blanco. La delimitación deberá respetar las distancias necesarias de seguridad entre vehículos y objetos próximos, y entre peatones y vehículos.

Los tipos de señales de seguridad deben cumplir con lo establecido en el código de colores de seguridad, el cual indica, entre otros requisitos, que se deben utilizar los colores básicos recomendados por la American Standards Asociation (A.S.A.). El Cuadro 6-5 muestra los colores de seguridad, su significado y otras indicaciones sobre su uso, relacionados con el almacenamiento de escorias salinas de aluminio secundario.

Si se desea situar señales complementarias éstas deben ser de color de base blanco y texto negro o color de base el mismo de la señal y el color de texto el de contraste correspondiente. La forma de la señal será rectangular y no contendrá ningún símbolo gráfico. Se ubicará debajo de la señal de seguridad o incluida dentro de sus límites. En todas las señales el símbolo o texto será puesto centralmente.

Cuando no se disponga de un símbolo para indicar un significado en particular deseado, el significado se obtendrá preferiblemente usando la señal general correspondiente junto con un texto en la señal complementaria o alternativamente usando un texto en lugar de un símbolo en la señal. La Figura 6-3 muestra ejemplos de señalización recomendada para bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

Cuadro 6-4 Contrastes de color para la señalización

Color	Fondo.	Contraste del símbolo.
Rojo	Blanco	Negro
Amarillo	Negro	Negro
Verde	Blanco	Blanco
Azul	Blanco	Blanco



Figura 6-3 Ejemplos de señalización recomendada para bodega de escorias salinas de aluminio secundario

Cuadro 6-5 Colores de seguridad, significado y otras indicaciones sobre su uso

Color	Significado	Indicaciones y precisiones	Especificaciones	Ejemplos
Rojo	Señal de prohibición	Comportamiento peligroso	Forma redonda, pictograma negro sobre fondo blanco, bordes y banda rojos (transversal descendente de izquierda a derecha atravesando el pictograma a 45°C respecto a la horizontal). El color rojo deberá cubrir como mínimo el 35% del área de la señal.	prohibido fumar, prohibido apagar con agua, no tocar, prohibido el paso, Prohibido el ingreso de alimentos y bebidas, etc
	Peligro-alarma	Alto, parada, dispositivos de desconexión de emergencia. Evacuación.		
Amarillo o anaranjado	Señal de advertencia	Atención, precaución, verificación.	Forma triangular, bordes negros. Pictograma negro sobre fondo amarillo. El color amarillo deberá cubrir como mínimo el 50% de la superficie de la señal.	Residuo Corrosivo, Peligro de Liberación de Gases tóxicos.
Azul	Señal de obligación	Comportamiento o acción específica. Obligación de utilizar un equipo de protección individual.	Forma redonda, pictograma blanco sobre fondo azul. El color azul deberá cubrir como mínimo el 50% de la superficie de la señal.	Protección obligatoria de la vista, protección obligatoria de la cabeza, protección obligatoria de las vías respiratoria, protección obligatoria de los pies, etc.
Verde	Señal de salvamento o de auxilio	Puertas, salidas, pasajes, materiales, puestos de salvamento o de socorro, locales.	Forma rectangular o cuadrada. Pictograma blanco sobre fondo verde. El color verde deberá cubrir como mínimo el 50% de la superficie de la señal.	primeros auxilios, camilla, ducha de seguridad, primeros auxilios, lavador de ojos

6.3.6 Selección del equipo de protección en el manejo de las escorias salinas de aluminio secundario

Aunque la selección de los equipos de seguridad y protección personal debe abarcar todos los aspectos relacionados con el ambiente laboral de un trabajador, en esta sección se tomarán en cuenta únicamente aquellos relacionados con la acción directa del residuo peligroso en cuestión, haciendo referencia a situaciones que impliquen la exposición o el contacto con la escoria salina de aluminio en niveles, concentraciones o cantidades bajas para ambientes laborales en operación cotidiana.

Se sabe que la utilización de equipos de protección personal en general restringe la movilidad del trabajador, aumenta sus niveles de estrés y produce incomodidad, por lo que el equipo de protección personal a seleccionar es aquel estrictamente necesario para prevenir riesgos a la salud humana de los trabajadores involucrados. Se recomienda que la selección del equipo de protección personal a utilizar se realice en conjunto con la participación de los trabajadores, ya que son ellos quienes deberán usarlos. De esta manera, ellos pueden opinar sobre su comodidad, aplicabilidad y limitaciones de manejo, así como sobre los procedimientos específicos para su uso en las sesiones de entrenamiento del uso de los mismos.

En Estados Unidos la National Fire protection agency (NFPA) propone una clasificación de equipo de protección personal basado en la delimitación del nivel de requerimientos que se deben cumplir en situaciones específicas de trabajo o de emergencia, para el caso del almacenamiento de la escoria salina de aluminio se aplica el nivel de clasificación C en el que se incluyen equipos de protección respiratoria y cutánea, éstos se describen en el Cuadro 6-6.

Para que esta actividad de almacenamiento de escoria salina de aluminio sea satisfactoria, es necesaria la creación de un plan de control de operaciones, en el que se planifiquen las actividades, programas de capacitación al personal, limpieza y verificación del recinto de almacenamiento, etc.

Cuadro 6-6 Descripción del equipo de protección personal a utilizar para el manejo de escorias salinas de aluminio secundario

No.	Equipo de Protección Personal	Especificaciones	Descripción
1.	Máscara facial	Con filtro combinado (químico - mecánico)	Protección respiratoria contra partículas y polvos finos en situaciones de trabajo normal y contra vapores en caso de emergencia (Filtro para Amoníaco)
2.	Ropa de protección	Confeccionada en una o dos piezas	Protección de la piel. Ésta puede ser de lona o tela Sincatex
3.	Guantes	Tela gruesa resistentes a materiales abrasivos	Protección cutánea de las manos por manejo de la escoria salina
4.	Botas de seguridad	De cuero con cubo de hierro	Protección de extremidades inferiores contra posibles caídas de materiales pesados
5.	Casco	Policarbonato o polietileno de alta densidad	Protección de la cabeza contra caída vertical de materiales
6.	Lentes	Plásticos u otro material	Protección visual contra partículas y polvos finos de escoria salina
7.	Radio	Opcional	A usar para comunicar cualquier emergencia.

Fuente: Elaboración Propia.

6.3.7 Etiquetado de recipientes con escoria salina de aluminio secundario

Todo envase conteniendo residuos peligrosos debe estar correctamente etiquetado (indicación del contenido) e identificado (indicación del productor). La identificación incluye los datos del centro productor, la referencia concreta de la unidad (nombre, clave o similar para los residuos químicos), el nombre del responsable del residuo y las fechas de inicio y final de llenado del envase. Los recipientes o envases que contengan residuos peligrosos químicos deberán estar etiquetados de forma clara, legible e indeleble. La etiqueta debe incluir:

- El código de identificación establecido en la Lista Europea de Residuos (LER).
- Nombre, dirección y teléfono del titular de los residuos.
- Fecha del envasado.
- Naturaleza de los riesgos que presenta el residuo, para cuya indicación deben usarse los pictogramas correspondientes en negro sobre fondo naranja en los envases
- La etiqueta debe estar firmemente fijada sobre el envase y su tamaño mínimo debe ser de 10 x 10 cm.
- De igual forma se colocan en los contenedores las etiquetas en forma de rombo de color blanco y negro que indican las características de las sustancias transportadas de acuerdo al Transporte de mercancías peligrosas por carretera.

La Figura 6-4 muestra una propuesta de etiqueta para el envase de almacenamiento de la escoria salina de aluminio secundario

RESIDUO PELIGROSO	
Escoria Salina de la Producción Secundaria de Aluminio	
<input type="text" value="100308"/> Código LER	<input type="text" value="Día / Mes / Año"/> Fecha de Envasado
Titular: Responsable de la Generación del Residuo	
Dirección: Lugar de Generación del Residuo	
Teléfono: Número de Contacto	
Observación: <input type="text"/>	

Figura 6-4 Propuesta de etiqueta para envases de almacenamiento de escoria salina de aluminio secundario

6.4 Exportación de escorias salinas de aluminio secundario para su tratamiento en el exterior

Con el propósito de que se efectúe un manejo ambientalmente sustentable de los materiales y residuos peligrosos, nuestro país se ha suscrito a diversos convenios internacionales a fin de que ese tipo de desechos sean transportados, envasados e identificados de tal forma que se minimicen posibles daños al ambiente y que los mismos sean entregados a empresas industriales y/o de servicios autorizados, que cuenten con la tecnología e infraestructura necesaria para realizar su tratamiento, reciclaje y reúso, de conformidad con el concepto de valorización de residuos.

En los procesos de importación y exportación de sustancias y residuos peligrosos se reglamenta que la exportación, transporte y eliminación de desechos peligrosos se rigen por la normativa jurídica salvadoreña incluyendo y considerando como parte de ésta normativa el Convenio de Basilea, los tratados y convenios internacionales que regulan esta actividad con efectos legales en El Salvador.

Las escorias salinas, de acuerdo a los estudios realizados, es un residuo peligroso que presenta características que permiten la valorización de sus componentes, sin embargo en El Salvador, no existen empresas que se dediquen a la valorización de este tipo de residuos, por lo que la exportación de las escorias salinas para su tratamiento en el exterior es una buena alternativa para la gestión ambientalmente razonable.

El Artículo 5 del reglamento especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos, determina que el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales será el encargado de regular el tránsito de sustancias y residuos peligrosos, velando por que se cumplan los requisitos establecidos en los instrumentos jurídicos nacionales e internacionales⁶.

⁶ Sitio Web: <http://www.marn.gob.sv>

En el caso de exportación de residuos peligrosos, se le da cumplimiento a lo dispuesto en los artículos 4, 6 y 7 del Convenio de Basilea, sin embargo el Ministerio no autorizará la exportación de desechos peligrosos, cuando se contemple su reimportación o cuando el país de destino, exija reciprocidad, implique o pueda inducir a un incumplimiento de las obligaciones contraídas por El Salvador, esto con el objetivo de que exista un resguardo al Medio Ambiente y la Salud humana debido a que no permite el canje de desechos peligrosos con otros países por las condiciones de sobre población y falta de plantas de tratamiento de desechos peligrosos en El Salvador.

En la cumbre de Presidentes de Centroamérica realizada en Panamá el 11 de diciembre de 1992, los países de Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá, tomando como base la existencia de gestiones por parte de personas naturales y jurídicas en relación a la importación de desechos y sustancias peligrosas, reconocieron que es de suma necesidad un control para impedir el tráfico ilegal de éstos realizando el Acuerdo Regional Sobre Movimiento Transfronterizo de Desechos Peligrosos, para que de una manera directa impida los daños a la salud humana y al medio ambiente como lo establecen y protegen los instrumentos internacionales como el convenio de Basilea, el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente, la Carta de Desechos Peligrosos, etc.

Debido a aspectos económicos de rentabilidad de operaciones, el transporte aéreo de Escorias Salinas en pequeñas cantidades no es recomendable, es preferible que el país de destino del residuo permita el transporte terrestre, ya que la vía marítima implica altos niveles de humedad en el ambiente, lo cual es un riesgo para el residuo en cuestión. Para ello, el Vice Ministerio de Transporte tiene como una de sus funciones la vigilancia y control del transporte de materiales peligrosos en el territorio salvadoreño.

Para el transporte de sustancias, residuos y desechos peligrosos, el titular de esta actividad debe contar con el permiso ambiental correspondiente, y para cada acción de transporte particular debe contar con un documento de transporte que brinde la información necesaria para la identificación de los materiales peligrosos transportados,

indicando nombres, clasificación de riesgo, número de identificación, tipo y número de envases y embalaje. Para el caso de la Escoria Salina de Aluminio, de acuerdo con sus características particulares, y lo establecido en el artículo 52 del Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos, la clasificación de riesgo corresponde a Clase 4, que incluye los materiales que reaccionan con el agua, y el número de identificación de categoría corresponde a División 4.3, que hace referencia específicamente a aquellos materiales que son peligrosos con la humedad.

Debe considerarse que por cada volumen de transporte, el generador o almacenador, según sea el caso debe entregar al transportista un documento de transporte debidamente firmado en original y dos copias para darle el trámite administrativo informativo correspondiente como establece el artículo 53; tomando en cuenta que todo vehículo que transporte sustancias, residuos o desechos peligrosos, debe portar en un lugar visible y fácilmente distinguible un cartel que contenga el color indicador de la clase de riesgo, número o nombre de esa clase y el número de identificación de las sustancias, residuos o desechos peligrosos según las reglas técnicas, normas y disposiciones legales aplicables, así como las clases de materiales peligrosos.

En El Salvador, el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ha autorizado a dos empresas⁷ para que practiquen el tratamiento de residuos peligrosos (MIDES y GEOCYCLE), sin embargo dentro de los residuos peligrosos no se incluye la escoria salina, y estas empresas no tienen ningún tipo de experiencia con tratamiento de este residuo. Sin embargo alrededor del mundo, existen empresas dedicadas al reciclaje de residuos peligrosos, que cuentan con la tecnología adecuada para el tratamiento y revalorización de escorias salinas del procesamiento de aluminio secundario. La mayoría de estas empresas, se localizan en Europa, sin embargo existen algunas de ellas con operaciones en México y Sur América. El Cuadro 6-7 muestra algunas de las empresas dedicadas a la gestión, tratamiento y destrucción de residuos industriales, peligrosos y no peligrosos, con experiencia en el tratamiento de escorias salinas.

⁷ Las actividades de estas empresas se describen en el Cuadro 6-87.

Cuadro 6-7 Empresas dedicadas a la gestión, tratamiento y destrucción de residuos industriales, peligrosos y no peligrosos, con experiencia en el tratamiento de escorias salinas de aluminio secundario

Nombre	Tipo de Actividad	Países de Operación
BEFESA	Compañía internacional especializada en la gestión integral de residuos industriales. Específicamente reciclaje de residuos de acero y residuos de aluminio	México, Perú, Chile, Argentina, España, Alemania, Francia, Portugal, Reino Unido, Suecia, Ucrania.
WasteCare.co.uk	Servicio de reciclaje y manejo de desechos de todos los sectores industriales	Reino Unido
García Galvis, s.l	Reciclado de residuos, gestión de residuos industriales, Gestión de servicio de recogida de residuos en puntos limpios móviles	España
Recuperaciones Cabeza	Gestión, tratamiento y destrucción de materiales peligrosos y no peligrosos	España

Fuente: elaboración propia.

6.5 Co-Procesamiento de escorias salinas de aluminio secundario en hornos cementeros

Existe un principio de jerarquía para la gestión de residuos, que establece que se debe fijar un orden de preferencia para la selección de la alternativa de gestión a aplicar a determinado residuo. Este principio de jerarquía, fomenta que se considere la gestión de los residuos en el orden de preferencia siguiente:

- f. Reducción de la generación de Residuos (Uso de MTD)
- g. Reutilización del Residuo
- h. Reciclado del Residuo
- i. Valorización del Residuo

De ésta forma, se busca evitar la disposición final de los residuos, en vertedero controlado. Sin embargo la evaluación a realizar para la selección de la alternativa de gestión debe considerar, además de ser una solución ambiental, ser una solución técnica y económicamente viable.

El principio de jerarquía para la gestión de residuos, es únicamente una pauta de actuación que únicamente implica una guía para el fomento de las operaciones que se consideran prioritarias, pero sin que en ningún modo ello implique que se pueda obligar a seguir un método determinado.

Para la disposición final de residuos peligrosos, el Capítulo VI del Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos, establece los métodos de disposición final considerados para los residuos peligrosos, los métodos contemplados en el reglamento, aplicables a la Escoria Salina de Aluminio se describen a continuación.

6.5.1 Co-procesamiento de residuos en El Salvador

El artículo 35, del Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos, considera que, métodos de disposición final destructivos como la pirolisis, la incineración u otro método destructivo de desechos peligrosos debe ser realizado en lugares autorizados para tal efecto, evitando la contaminación ambiental.

Para ello el Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales, ha autorizado entidades privadas para que realicen actividades de disposición final de residuos peligrosos en El Salvador, estas entidades se muestran en el Cuadro 6-8.

Cuadro 6-8 Entidades autorizadas para la disposición final de residuos peligrosos en El Salvador

Nombre de la Entidad	Tipo de Permiso Ambiental
Geocycle El Salvador, S.A. de C.V. Holcim El Salvador, S.A. de C.V.	Manejo, caracterización y pre-tratamiento de residuos y desechos peligrosos, así como para la destrucción de residuos y desechos en el co-procesamiento en sus hornos cementeros.
Manejo Integral de Desechos Sólidos (MIDES, S.E.M. de C.V.),	Tratamiento y disposición final en celdas de confinamiento de algunos medicamentos vencidos

Fuente: Elaboración propia.

Para el Co-procesamiento de residuos en hornos cementeros, Geocycle requiere que se llene el perfil del residuo y adicionalmente se entreguen muestras del mismo para ser analizadas en sus laboratorios. Los resultados de los análisis de laboratorio son presentados ante un comité técnico donde se discuten los riesgos a la salud, medio ambiente y de proceso (efectos sobre la calidad del cemento) y determinar el costo de co-procesamiento, que estará definido por la complejidad del manejo del residuo.

6.5.2 Aspectos generales del co-procesamiento de residuos en hornos cementeros

El Co-procesamiento de residuos es un concepto de desarrollo sostenible basado en los principios de Ecología Industrial y una perspectiva de ciclo de vida, que representa una opción preferible a la de incineración o relleno sanitario, ya que el proceso no requiere disposición final de sub-productos o cenizas (todo se aprovecha).

Esta técnica de tratamiento consiste en el uso de residuos adecuados en procesos de manufactura con el propósito de recuperar energía y/o minerales y disminuir el uso de combustibles o materias primas convencionales, en el que se emplean las MTD⁸.

La implementación del co-procesamiento debe considerar las circunstancias nacionales y debe contar con un Estudio de Impacto Ambiental, permisos y autorizaciones correspondientes. Además debe asegurar el uso de localizaciones e instalaciones adecuadas para el almacenamiento y pre-procesamiento.

Como regla general, el residuo a ser co-procesado debe agregar valor al proceso (calórico o mineral). El uso de hornos de cemento como operaciones de disposición de residuos (destrucción) sólo debe considerarse si hay beneficios ambientales netos (Reducción de NOx) o cuando no hay otra alternativa ambientalmente adecuada y costo-efectiva. En dichos caso se requiere un permiso específico luego de haberse analizado otras alternativas.

Debido a la naturaleza heterogénea de los residuos se requiere un mezclado y preparación previa para garantizar una alimentación continua y homogénea en el horno. No debe considerarse como una forma de diluir la concentración de ciertos constituyentes peligrosos para «cumplir» la normativa.

No existe una lista uniforme de residuos aplicable a cualquier horno, debido a las diferencias técnicas de cada proceso, condiciones de operación, composición de materiales, alimentación, tratamiento de gases, calidad de Clinker y materias primas, etc. Algunas variables que son consideradas al seleccionar residuos para su co-procesamiento son:

- Contenido de álcali (sodio, potasio, etc.), azufre y cloro, ya que éstos pueden producir expansión anormal y agrietamientos irregulares en el concreto.
- Contenido de MgO, ya que éste reacciona con el agua con un importante retraso, con respecto al fraguado y endurecimiento del cemento, haciendo que éste sea expansivo.
- Poder calorífico
- Contenido de agua
- Contenido de cenizas

⁸ Mejores Técnicas Disponibles

- Tasas de alimentación y flujo de emisiones
- Estabilidad de la operación
- Contenido de orgánicos
- Contenido de metales pesados en carga
- Impacto en calidad de Clinker de acuerdo a niveles de fosfatos, flúor y cloro
- Presencia de Thallium y cromo en cemento así como de elementos que pueden lixiviar.

De acuerdo con la composición química del residuo en estudio, se observa que las especies atómicas y compuestos presentes, en la escoria salina de aluminio podrían agregar un valor mineral a la composición química del Clinker que se elabora para la producción de cementos aluminosos o cementos tipo portland.

La composición típica de los cementos tipo portland incluye los compuestos que se muestran en Cuadro 6-9.

Cuadro 6-9. Componentes típicos de los cementos tipo portland

Tipo de componente	Nombre	Fórmula química
Componentes principales	Oxido de Calcio Oxido de Silicio Oxido de Aluminio Oxido de hierro	CaO SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃
Componentes secundarios	Oxido de Magnesio Sulfatos Álcalis	MgO SO ₃ K ₂ O y Na ₂ O
Otros componentes posibles	Oxido de Manganeso Anhídrido Fosfórico Oxido de Titanio Fluoruros	Mn ₂ O ₃ P ₂ O ₅ TiO ₂ F ⁺

La presencia de álcalis, como el óxido de potasio K₂O y oxido de sodio Na₂O, puede producir expansión anormal y agrietamientos irregulares en el concreto.

Observaciones

1. La industria del aluminio en El Salvador, se dedica principalmente a la transformación de aluminio primario importado desde otros países en los que se realiza la extracción de aluminio primario a partir del mineral Bauxita. Sin embargo, como parte de los procesos productivos se lleva a cabo la fundición de aluminio secundario con el fin de reducir pérdidas por productos fuera de especificación o defectuosos.
2. Los riesgos a la salud humana y del medio ambiente más importantes, relacionados con las escorias salinas de aluminio secundario, se derivan de su reacción química con el agua, ya que al entrar en contacto, se generan emanaciones de gases tóxicos al aire, como amoníaco y metano, y se lixivian altas cantidades de sales a los suelos y mantos acuíferos superficiales y subterráneos, así como también otros contaminantes metálicos, como cinc, hierro, níquel y aluminio.
3. Durante el proceso de lixiviación de escorias salinas de aluminio secundario se genera gas amoníaco, lo que se evidencia por medio del pH alcalino de la solución lixiviada (pH = 9.0) y una ligera percepción de olor a este tipo de gas. Para la realización de cálculos de balance de masa, la formación de gases durante el proceso experimental de lixiviación se estima despreciable.
4. Los riesgos a la salud humana y del medio ambiente, que representa la escoria salina de aluminio, pueden ser minimizados a través de la aplicación de métodos de gestión ambiental, iniciando con la reducción de residuos en la fuente, seguido de implementación de prácticas de manejo y almacenamiento apropiado del residuo en cuestión y finalmente seleccionando un método de tratamiento que sea económicamente viable para el generador.

5. El manejo apropiado de las escorias salinas de aluminio secundario es un factor determinante en la composición química de dicho residuo, ya que de esta forma se favorece o se limita el desarrollo de reacciones químicas que den lugar a formación de compuestos como óxidos de aluminio y componentes metálicos de aleaciones.

6. El manejo de las escorias salinas de aluminio secundario en forma compacta preferible al manejo de escorias salinas en forma suelta, ya que da lugar a la mejora de aspectos relacionados con transporte, optimización de espacio, reducción de pérdidas y reducción de riesgos.

7. Los métodos de análisis químico instrumental utilizados, como la difracción de rayos X, espectrofotometría de absorción atómica y fotometría, se realizan para la determinación de la composición química de la escoria salina del aluminio secundario, tomando los resultados obtenidos de cada análisis para realizar un balance de masa por especie atómica presente en las escorias salinas de aluminio secundario.

Conclusiones

1. Las concentraciones de los elementos químicos presentes en los lixiviados de escorias salinas de aluminio secundario, no exceden los valores establecidos en la Norma Salvadoreña Obligatoria (NSO) sobre Aguas Residuales descargadas a un cuerpo receptor, con excepción de la concentración de Cinc, cuya concentración en la escoria salina suelta y compacta corresponde a 122.4 ppm y 91.8 ppm respectivamente. Dicho valor excede el límite establecido por la NSO de 5 ppm, en aproximadamente un 90% en el caso de la escoria salina suelta y en un 75% en el caso de la escoria salina compacta.

2. La composición química de la escoria salina de aluminio secundario, se determinó por medio de balances de masa por especie atómica y por fracción granulométrica, obteniendo los siguientes resultados:

Especie Atómica	Escoria salina suelta		Escoria salina compacta	
	Fracción > 5 mm	Fracción < 5 mm	Fracción > 5 mm	Fracción < 5 mm
Al	35.51%	37.90%	28.47%	43.68%
Ca	0.17%	2.03%	0.00%	3.74%
Mg	0.42%	3.85%	0.12%	4.78%
K	0.01%	0.31%	0.25%	0.24%
Si	11.45%	10.91%	7.83%	7.13%
Na	0.29%	1.03%	0.99%	1.50%
Zn	0.07%	0.19%	0.05%	0.14%

3. Para ambos tipos de muestra de escoria salina de aluminio secundario analizada, el mayor contenido de aluminio total se encuentra en las partículas de tamaño menor a 5 mm, siendo para el caso de la escoria salina suelta de 37.90% y para la escoria salina compacta de 43.68%. Y para ambos tipos de muestra de escoria salina, el mayor contenido de aluminio en forma metálica se encuentra en las partículas de tamaño mayor a 5 mm.

4. El contenido de aluminio metálico es mayor en la escoria salina compacta, ya que se obtuvo una mayor cantidad de material retenido en malla 4 (fracción de partículas mayor a 5 mm) con menor peso (400.0 g), indicando presencia de compuestos no metálicos de mayor peso molecular en menor proporción, comparado con los resultados obtenidos para la escoria salina suelta.

5. En El Salvador no se cuenta con la tecnología necesaria para realizar tratamientos de recuperación y revalorización de residuos como las escorias salinas, por lo que su exportación para su tratamiento en el exterior o su co-procesamiento en hornos cementeros representan alternativas de gestión ambiental y económicamente viables para los generadores de la escoria salina de aluminio.

Recomendaciones

1. Realizar una investigación de las empresas dedicadas a la industria de aluminio en El Salvador, respaldada por las autoridades correspondientes, que permita conocer con certeza cuales de estas empresas realizan como parte de sus procesos productivos, procedimientos de fundición de aluminio con sales fundentes, y cuales son las operaciones que realizan para el manejo de las escorias salinas de aluminio secundario generadas.
2. Al MARN, elaborar un reglamento que regule específicamente el manejo y disposición final adecuada de las escorias salinas de aluminio secundario, en el que se establezcan los requisitos mínimos de seguridad para prevención de riesgos a la salud humana y medio ambiente y los métodos de disposición final autorizados en El Salvador.

Referencias Bibliográficas

- Aparicio, C., Manero, J., & Rodriguez, D. (2001). *Aleaciones Ligeras*. (U. P. Catalunya, Ed.) Ediciones UPC. Barcelona, España.
- ASI, (2011). Directorio de Empresas en El Salvador. Asociación Salvadoreña de Industriales. El Salvador.
- ASTM, (2001) Standard Practice for Sampling Nonferrous Metals and Alloys in Cast Form for Determination of Chemical Composition E 88 – 9101, American Society for Testing and Material, USA.
- BCR (2012) <http://www.bcr.gob.sv>, Banco Central de Reserva, El Salvador.
- Binczewski, G. J. (1995). The Point of a Monument: A History of the Aluminum Cap of the Washington Monument. *Journal Of Metals*, 20-25. USA.
- Breault (1994) Treatment and Disposal of Residues from Aluminium Dross Recovery, in: 2nd International Conference on Hazardous and Industrial Waste Management. USA.
- BREF. (2001). Prevención y Control Integrados de la Contaminación. Best Available Technique Reference Documents, Neografis, Madrid, España
- Brown, T. (2011). *World Mineral Production*. Keyworth, Nottingham, UK.
- Bruckard W.J., Woodcock J.T. (2009) Recovery of Valuable Materials from Aluminium Salt Cakes. Alemania.
- Cerrato. (02 de Abril de 2002). www.blogger.com. Recuperado en Enero de 2011, de <http://metalesnoferrosos.espinillo.blogspot.com/2009/04/metales-no-ferrosos-ligeros.html>
- DIN (1984) German Standard for the Examination and Determination of Leachability by Water DIN 38414-S4, Instituto Alemán de Normalización, Alemania.
- EFIG. (1995). *Secondary Aluminum Operations*. Emission Factor Inventory Group. USA.
- El-Katany (2003) Treatment of Salt Cakes by Aqueous Leaching and Bayer-Type Digestion, *Miner. Eng.* No. 21 pág. 605–612. USA.
- Gil, A. (2006). Gestión de las Escorias Salinas de la Segunda Fusión del Aluminio. *Ingeniería Química*, 142-158. España.

- Huillcañahui, R. (2007). Caracterización de los Residuos Minero Metalúrgicos y su Posible Uso en Barreras de Ingeniería. Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG, 87-97. Brasil.
- Hwang, J., Huang, X., & Xu, Z. (2006). Recovery of Metals from Aluminum Dross and Saltcake. Journal of Minerals & Materials Characterization & Engineering, 5(1), 47-62. USA.
- Kemeny, Sosinsky, Srhmith (1991) R.D. Peterson, L. Newton, Review of Aluminum Dross Processing, in: Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting, Warrendale, PA, 2002, pp. 1029–1037. USA.
- López, F., Sainz, E., & Formoso, A. (1994). The Recovery of Alumina from Salt Slags. Canadian Metallurgical Quarterly Journal, 33, 29-33. Canada.
- Mah, Toguri, Smith (1986) T.W. Unger, M. Beckmann, Salt Slag Processing for Recycling, in: Light Metals: Proceedings of Sessions, TMS Annual Meeting, CA. USA
- OIT, (1998). Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo. (M. d. Sociales, Ed., & C. PAWLOWSKY, Trad.) Organización Internacional del Trabajo, Madrid, España.
- PNUMA, (2005). Guia del Convenio de Estocolmo Sobre Contaminantes Organicos Persistentes. Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Francia.
- Prieto Iglesias, A. (2003). Uso Siderúrgico de Residuos Reciclados de la Industria del Aluminio. Madrid, España.
- Robson, G. (12 de 11 de 2010). Wikipedia. Recuperado el 01 de 2011, de [http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Electron_shell_013_Aluminium_\(es\).svg](http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Electron_shell_013_Aluminium_(es).svg)
- Smith, W. F. (1998). Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Mc Graw Hill. Madrid, España.
- Tsakiridis. (2012). Aluminium Salt Slag Characterization and Utilization – A review. Journal of Hazardous Materials, 217-218. Grecia
- Zheng, L., & Soria, A. (2008). Estudio Prospectivo de la Industria del Aluminio del Mundo. Instituto de Estudios Tecnológicos Prospectivos. European Communities. Madrid, España

ANEXOS

- Anexo A Material y equipo de laboratorio para desarrollo de procedimiento experimental de análisis químico de escorias salinas de aluminio secundario
- Anexo B Memoria de cálculo para caracterización de escoria salina de aluminio secundario.
- Anexo C Planos de propuesta de bodega para el almacenamiento de escoria salina de aluminio secundario.
- Anexo D Formularios de exportación de residuos.
- Anexo E Resultados de análisis químico instrumental para caracterización de muestras de escoria salina de aluminio secundario.

ANEXO A

Material y equipo de laboratorio para desarrollo de procedimiento experimental de análisis químico de escorias salinas de aluminio secundario.

Para realizar la parte experimental de esta investigación se hace necesario el uso del material y equipo de laboratorio que se enumera a continuación:

Cuadro A-1 Descripción del material y equipo de laboratorio usado durante el procedimiento experimental.

No.	Nombre equipo	Descripción
1	Molino de Martillos	Equipo utilizado para la trituración y reducción de tamaño de partículas de las muestras de Escoria Salina.
2	Tamices US N°4 y N°12	Equipo utilizado para separar la distribución de partículas obtenidas como resultado de la trituración de las muestras de Escoria Salina, para su análisis granulométrico y análisis fisicoquímico.
3	Horno de Secado	Equipo utilizado para el secado de las muestras de Escoria Salina durante el procedimiento experimental de análisis de lixiviados.
4	Balanza Granataria	Equipo de medición usado para determinación de pesos de muestras durante todo el procedimiento experimental.
5	Balanza Analítica	Equipo de medición usado para determinación de pesos de muestras durante el procedimiento experimental.
6	Agitador Magnético	Aparato usado para mantener agitación constante durante el análisis de lixiviados de muestras de Escorias Salinas.
7	Conductivímetro	Dispositivo de medición de conductividad y total de sólidos disueltos en el agua. Usado en el análisis de Lixiviados de Escoria Salina
8	Vidrio Reloj	Elemento de laboratorio usado para depositar las muestras de Escoria Salina y facilitar su manejo durante el procedimiento experimental.
9	Espátulas	Elemento de Laboratorio usado para manipular las muestras de Escoria Salina.

Sigue...

Cuadro A-1 Descripción del material y equipo de laboratorio usado durante el procedimiento experimental.

No.	Nombre equipo	Descripción
10	Malla de Asbesto	Elemento de laboratorio usado para proteger del fuego directo los elementos de vidrio utilizados para el calentamiento del agua para análisis de lixiviados y mantener una distribución de calor uniforme.
11	Mechero Bunsen	Dispositivo de laboratorio usado como fuente de calor.
12	Trípode	Aparato de laboratorio usado como soporte para sostener sobre la llama del mechero bunsen los elementos a calentar.
13	Beakers de 2000 ml	Recipiente de vidrio usado para colocar las muestras de Escoria Salina y ser analizadas.
14	Embudo de Vidrio	Material de laboratorio empleado como equipo auxiliar para la filtración del lixiviado de Escorias Salinas.
15	Papel Filtro	Material de laboratorio empleado para la filtración del lixiviado de Escorias Salinas.
16	Papel pH	Material de laboratorio usado para la medición del pH del lixiviado de muestras de Escoria Salina
17	Pizeta	Elemento de laboratorio usado para enjuagar con agua destilada la cristalería usada en el laboratorio.
18	Cronometro	Aparato usado para la medición del tiempo durante el procedimiento experimental

Además se usa el siguiente equipo de protección personal:

- a. Protección para ojos: lentes contra proyección de partículas.
- b. Protección para oídos: tapones de caucho
- c. Protección respiratoria: mascarilla de filtro mecánico para proteger contra polvos finos.
- d. Protección de Manos y Brazos: Guantes de cuero y guantes resistentes al calor.
- e. Ropa Protectora: Gabacha de laboratorio.

ANEXO B

Memoria de cálculo para caracterización de escoria salina de aluminio secundario.

Balance de Corrientes:

$$C + D = E + F + G \quad \text{E. 1}$$

La corriente G se considera despreciable, ya que la cantidad de gases generados es mínima.

$$G = 0$$

De acuerdo con la densidad del Agua a las condiciones expresadas, para la corriente D la masa de agua que se emplea para la lixiviación de la escoria corresponde a:

$$\rho_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{P}=1 \text{ atm}}_{\text{T}=40 \text{ }^\circ\text{C}} = 0.99225 \frac{\text{kg}}{\text{lt}}; \text{ Valiente Barderas Apéndice II}$$

$$D = \frac{0.99225 \text{ kg}}{\text{lt}} \times 1 \text{ lt} \times \frac{100 \text{ gr}}{1 \text{ kg}}$$

$$D = 992.25 \text{ gr}$$

Cálculos Escoria Salina Suelta

Al resolver E.1 para la corriente E para el caso de la escoria salina suelta se tiene que:

$$C + D = E + F + G$$

$$100.0 \text{ gr} + 992.25 \text{ gr} = E + 123.5 \text{ gr} + 0$$

$$E = 100.0 \text{ gr} + 992.25 \text{ gr} - 123.5 \text{ gr}$$

$$E = 968.75 \text{ gr}$$

Para conocer la cantidad en masa de las especies atómicas contenidas en la corriente E (fracción soluble del proceso de lixiviación de escoria salina suelta) se realiza un balance por cada especie atómica, como se muestra a continuación:

- Aluminio

$$M_{Al}^E = X_{Al}^E \times E \quad E.2$$

Donde:

M_{Al}^E = Masa de Aluminio en la Corriente E

X_{Al}^E = Concentración de Aluminio en la Corriente E;
conocida del análisis de Fotometría de Lixiviados de escoria salina suelta

$$M_{Al}^E = \frac{3.5 \text{ mg Al}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$M_{Al}^E = 3.384 \text{ mg} = 0.003384 \text{ gr}$$

- Cloruros

$$M_{Cl}^E = X_{Cl}^E \times E$$

$$M_{Cl}^E = \frac{2000 \text{ mg Cl}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$M_{Cl}^E = 1933.63 \text{ mg} = 1.93363 \text{ gr}$$

- Magnesio

$$M_{Mg}^E = X_{Mg}^E \times E$$

$$M_{Mg}^E = \frac{39.85 \text{ mg Mg}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$M_{Mg}^E = 38.528 \text{ mg} = 0.038528 \text{ gr}$$

- Potasio

$$M_K^E = X_K^E \times E$$

$$M_K^E = \frac{30.8 \text{ mg K}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$M_K^E = 29.778 \text{ mg} = 0.029778 \text{ gr}$$

- Silicio

$$M_{Si}^E = X_{Si}^E \times E$$

$$M_{Si}^E = \frac{1.03 \text{ mg Si}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{Si}^E = 0.996 \text{ mg} = 0.00996 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{Na}^E = X_{Na}^E \times E$$

$$M_{Na}^E = \frac{32.89 \text{ mg Na}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{Na}^E = 31.799 \text{ mg} = 0.031799 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{Zn}^E = X_{Zn}^E \times E$$

$$M_{Zn}^E = \frac{122.4 \text{ mg Zn}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{1002 \text{ gr sln}} \times 968.75 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{Zn}^E = 118.33 \text{ mg} = 0.11833 \text{ gr}}$$

Para conocer la masa de las especies atómicas contenidas en la corriente F (Fracción Insoluble de lixiviados de Escoria Salina Suelta) se realizan los siguientes balances por especie atómica:

- Aluminio

$$M_{Al}^F = X_{Al}^F \times F \quad \text{E. 3}$$

Donde:

M_{Al}^F = Masa de Aluminio en la Corriente F

X_{Al}^F = Concentración de Aluminio en la Corriente F;
conocida del análisis de AA de escoria salina suelta

Resolviendo la ecuación 3 se tiene que:

$$M_{Al}^F = \frac{381,290.50 \text{ mg Al}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Al}^F = 37,900.80 \text{ mg} = 37.90 \text{ gr}}$$

- Calcio

$$M_{Ca}^F = X_{Ca}^F \times F$$

$$M_{Ca}^F = \frac{20,428.50 \text{ mg Ca}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Ca}^F = 2,030.59 \text{ mg} = 2.031 \text{ gr}}$$

- Magnesio

$$M_{Mg}^F = X_{Mg}^F \times F$$

$$M_{Mg}^F = \frac{38,315.90 \text{ mg Mg}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Mg}^F = 3,808.60 \text{ mg} = 3.8086 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_K^F = X_K^F \times F$$

$$M_K^F = \frac{2,823.5 \text{ mg K}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_K^F = 280.66 \text{ mg} = 0.281 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{Si}^F = X_{Si}^F \times F$$

$$M_{Si}^F = \frac{109,699.4 \text{ mg Si}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Si}^F = 10,904.12 \text{ mg} = 10.904 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{Na}^F = X_{Na}^F \times F$$

$$M_{Na}^F = \frac{10,048.2 \text{ mg Na}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Na}^F = 998.79 \text{ mg} = 0.999 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{Zn}^F = X_{Zn}^F \times F$$

$$M_{Zn}^F = \frac{735.8 \text{ mg Zn}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.4 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Zn}^F = 73.14 \text{ mg} = 0.07314 \text{ gr}}$$

Balance de Especies Atómicas en C

Luego se calculan las fracciones en peso de las especies atómicas en la corriente C, que corresponde a la escoria salina con tamaño de partícula menor a 5 mm. La masa de Aluminio en la corriente C se calcula como la suma de las masas de aluminio contenidas en ambas fracciones de lixiviado, tanto la parte soluble como la parte no soluble, de la siguiente manera:

- Aluminio

$$M_{Al}^C = M_{Al}^F + M_{Al}^E$$

$$M_{Al}^C = 37.90 \text{ gr} + 0.003384 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Al}^C = 37.904 \text{ gr}}$$

- Calcio

$$M_{Ca}^C = M_{Ca}^F + M_{Ca}^E$$

$$M_{Ca}^C = 2.031 \text{ gr} + 0 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Ca}^C = 2.031 \text{ gr}}$$

- Magnesio en C

$$M_{Mg}^C = M_{Mg}^F + M_{Mg}^E$$

$$M_{Mg}^C = 3.8086 \text{ gr} + 0.038528 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Mg}^C = 3.847 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_K^C = M_K^F + M_K^E$$

$$M_K^C = 0.281 \text{ gr} + 0.029778 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_K^C = 0.310 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{Si}^C = M_{Si}^F + M_{Si}^E$$

$$M_{Si}^C = 10.904 \text{ gr} + 0.000996 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Si}^C = 10.905 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{Na}^C = M_{Na}^F + M_{Na}^E$$

$$M_{Na}^C = 0.999 \text{ gr} + 0.031799 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Na}^C = 1.031 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{Zn}^C = M_{Zn}^F + M_{Zn}^E$$

$$M_{Zn}^C = 0.073 \text{ gr} + 0.118338 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Zn}^C = 0.191 \text{ gr}}$$

- Cloruros

$$M_{Cl}^C = M_{Cl}^F + M_{Cl}^E$$

$$M_{Cl}^C = 0 + 1.933633 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Cl}^C = 1.93634 \text{ gr}}$$

Balance de Agua en Lixiviados E

$$E = M_{Agua}^E + M_{Especies}^E$$

$$M_{Agua}^E = 2.16945 \text{ gr} - 968.75 \text{ gr}$$

$$M_{Agua}^E = 968.75 \text{ gr} - 2.16945 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Agua}^E = 966.5935 \text{ gr}}$$

La forma de cálculo de la composición en peso de la fracción de escoria salina con tamaño de partícula mayor a 5 mm, se muestra a continuación:

- Aluminio

$$M_{Al}^B = X_{Al}^B \times B$$

$$M_{Al}^B = \frac{355,099.50 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Al}^B = 154.43 \text{ gr}}$$

- Calcio

$$M_{Ca}^B = X_{Ca}^B \times B$$

$$M_{Ca}^B = \frac{1,694.50 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Ca}^B = 0.74 \text{ gr}}$$

- Magnesio

$$M_{Mg}^B = X_{Mg}^B \times B$$

$$M_{Mg}^B = \frac{4,241.90 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Mg}^B = 1.84 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_K^B = X_K^B \times B$$

$$M_K^B = \frac{114.30 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_K^B = 0.05 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{Si}^B = X_{Si}^B \times B$$

$$M_{Si}^B = \frac{114,452.30 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Si}^B = 49.78 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{\text{Na}}^{\text{B}} = X_{\text{Na}}^{\text{B}} \times B$$

$$M_{\text{Na}}^{\text{B}} = \frac{2,858.40 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{\text{Na}}^{\text{B}} = 1.24 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{\text{Zn}}^{\text{B}} = X_{\text{Zn}}^{\text{B}} \times B$$

$$M_{\text{Zn}}^{\text{B}} = \frac{708.90 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 434.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{\text{Zn}}^{\text{B}} = 0.31 \text{ gr}}$$

Cálculos Escoria Salina Compacta

Al resolver E.1 para la corriente E para el caso de la escoria salina compacta se tiene que:

$$C + D = E + F + G$$

$$100.0 \text{ gr} + 992.25 \text{ gr} = E + 138.6 \text{ gr} + 0$$

$$E = 100.0 \text{ gr} + 992.25 \text{ gr} - 138.6 \text{ gr}$$

$$\mathbf{E = 953.65 \text{ gr}}$$

Para conocer la cantidad en masa de las especies atómicas contenidas en la corriente E (fracción soluble del proceso de lixiviación de escoria salina Compacta) se realiza un balance por cada especie atómica, como se muestra a continuación:

- Aluminio

$$M_{\text{Al}}^{\text{E}} = X_{\text{Al}}^{\text{E}} \times E \quad \text{E.2}$$

Donde:

M_{Al}^{E} = Masa de Aluminio en la Corriente E

X_{Al}^{E} = Concentración de Aluminio en la Corriente E;
conocida del análisis de Fotometría de Lixiviados de escoria salina compacta

$$M_{\text{Al}}^{\text{E}} = \frac{4.0 \text{ mg Al}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996.5 \text{ gr sln}} \times 953.65 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{Al}}^{\text{E}} = 3.828 \text{ mg} = 0.00383 \text{ gr}}$$

- Cloruros

$$M_{\text{Cl}}^{\text{E}} = X_{\text{Cl}}^{\text{E}} \times E$$

$$M_{\text{Cl}}^{\text{E}} = \frac{2450 \text{ mg Cl}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996,5 \text{ gr sln}} \times 953,65 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{Cl}}^{\text{E}} = 2344,649 \text{ mg} = 2,34465 \text{ gr}}$$

- Magnesio

$$M_{\text{Mg}}^{\text{E}} = X_{\text{Mg}}^{\text{E}} \times E$$

$$M_{\text{Mg}}^{\text{E}} = \frac{27,22 \text{ mg Mg}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996,5 \text{ gr sln}} \times 953,65 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{Mg}}^{\text{E}} = 26,050 \text{ mg} = 0,026050 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_{\text{K}}^{\text{E}} = X_{\text{K}}^{\text{E}} \times E$$

$$M_{\text{K}}^{\text{E}} = \frac{31,6 \text{ mg K}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996,5 \text{ gr sln}} \times 953,65 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{K}}^{\text{E}} = 30,241 \text{ mg} = 0,030241 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{\text{Si}}^{\text{E}} = X_{\text{Si}}^{\text{E}} \times E$$

$$M_{\text{Si}}^{\text{E}} = \frac{0,82 \text{ mg Si}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996,5 \text{ gr sln}} \times 953,65 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{Si}}^{\text{E}} = 0,785 \text{ mg} = 0,00785 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{\text{Na}}^{\text{E}} = X_{\text{Na}}^{\text{E}} \times E$$

$$M_{\text{Na}}^{\text{E}} = \frac{40,0 \text{ mg Na}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996,5 \text{ gr sln}} \times 953,65 \text{ grE}$$

$$\mathbf{M_{\text{Na}}^{\text{E}} = 38,28 \text{ mg} = 0,03828 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{Zn}^E = X_{Zn}^E \times E$$

$$M_{Zn}^E = \frac{91.8 \text{ mg Zn}}{\text{Lt sln}} \times \frac{1 \text{ Lt sln}}{996.5 \text{ gr sln}} \times 953.65 \text{ gr E}$$

$$\mathbf{M_{Zn}^E = 87.853 \text{ mg} = 0.087853 \text{ gr}}$$

Para conocer la masa de las especies atómicas contenidas en la corriente F (Fracción Insoluble de lixiviados de Escoria Salina Compuesta) se realizan los siguientes balances por especie atómica:

- Aluminio

$$M_{Al}^F = X_{Al}^F \times F \quad \text{E. 3}$$

Donde:

M_{Al}^F = Masa de Aluminio en la Corriente F

X_{Al}^F = Concentración de Aluminio en la Corriente F;
conocida del análisis de AA de escoria salina suelta

Resolviendo la ecuación 3 se tiene que:

$$M_{Al}^F = \frac{437,604.10 \text{ mg Al}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Al}^F = 43,672.889 \text{ mg} = 43.673 \text{ gr}}$$

- Calcio

$$M_{Ca}^F = X_{Ca}^F \times F$$

$$M_{Ca}^F = \frac{37,483 \text{ mg Ca}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Ca}^F = 3740.8034 \text{ mg} = 3.741 \text{ gr}}$$

- Magnesio

$$M_{Mg}^F = X_{Mg}^F \times F$$

$$M_{Mg}^F = \frac{47,604.1 \text{ mg Mg}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Mg}^F = 4,750.88918 \text{ mg} = 4.751 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_K^F = X_K^F \times F$$

$$M_K^F = \frac{2,120.2 \text{ mg K}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_K^F = 211.59596 \text{ mg} = 0.212 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{Si}^F = X_{Si}^F \times F$$

$$M_{Si}^F = \frac{7,1406.9 \text{ mg Si}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Si}^F = 7126.40862 \text{ mg} = 7.126 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{Na}^F = X_{Na}^F \times F$$

$$M_{Na}^F = \frac{14,614.6 \text{ mg Na}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Na}^F = 1,458.53708 \text{ mg} = 1.459 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{Zn}^F = X_{Zn}^F \times F$$

$$M_{Zn}^F = \frac{495.2 \text{ mg Zn}}{\text{Kg muestra}} \times \frac{1 \text{ Kg}}{1000 \text{ gr}} \times 99.8 \text{ gr F}$$

$$\mathbf{M_{Zn}^F = 49.42096 \text{ mg} = 0.049 \text{ gr}}$$

Balance de Especies Atómicas en C

Luego se calculan las fracciones en peso de las especies atómicas en la corriente C, que corresponde a la escoria salina con tamaño de partícula menor a 5 mm. La masa de Aluminio en la corriente C se calcula como la suma de las masas de aluminio contenidas en ambas fracciones de lixiviado, tanto la parte soluble como la parte no soluble, de la siguiente manera:

- Aluminio

$$M_{Al}^C = M_{Al}^F + M_{Al}^E$$

$$M_{Al}^C = 43.673 \text{ gr} + 0.00383 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Al}^C = 43.677 \text{ gr}}$$

- Calcio

$$M_{Ca}^C = M_{Ca}^F + M_{Ca}^E$$

$$M_{Ca}^C = 3.741 \text{ gr} + 0 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Ca}^C = 3.741 \text{ gr}}$$

- Magnesio

$$M_{Mg}^C = M_{Mg}^F + M_{Mg}^E$$

$$M_{Mg}^C = 4.751 \text{ gr} + 0.02605 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Mg}^C = 4.777 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_K^C = M_K^F + M_K^E$$

$$M_K^C = 0.212 \text{ gr} + 0.03024 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_K^C = 0.242 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{Si}^C = M_{Si}^F + M_{Si}^E$$

$$M_{Si}^C = 7.126 \text{ gr} + 0.00078 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{Si}^C = 7.127 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{\text{Na}}^{\text{C}} = M_{\text{Na}}^{\text{F}} + M_{\text{Na}}^{\text{E}}$$

$$M_{\text{Na}}^{\text{C}} = 1.459 \text{ gr} + 0.03828 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{\text{Na}}^{\text{C}} = 1.497 \text{ gr}}$$

- Zinc en C

$$M_{\text{Zn}}^{\text{C}} = M_{\text{Zn}}^{\text{F}} + M_{\text{Zn}}^{\text{E}}$$

$$M_{\text{Zn}}^{\text{C}} = 0.049 \text{ gr} + 0.08785 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{\text{Zn}}^{\text{C}} = 0.137 \text{ gr}}$$

- Cloruros

$$M_{\text{Cl}}^{\text{C}} = M_{\text{Cl}}^{\text{F}} + M_{\text{Cl}}^{\text{E}}$$

$$M_{\text{Cl}}^{\text{C}} = 0 + 2.34465 \text{ gr}$$

$$\mathbf{M_{\text{Cl}}^{\text{C}} = 2.345 \text{ gr}}$$

Balance de Agua en Lixiviados E

$$E = M_{\text{Agua}}^{\text{E}} + M_{\text{Especies}}^{\text{E}}$$

$$M_{\text{Agua}}^{\text{E}} = E - M_{\text{Especies}}^{\text{E}}$$

$$M_{\text{Agua}}^{\text{E}} = 953.65 \text{ gr} - 2.53168 \text{ gr}$$

$$M_{\text{Agua}}^{\text{E}} = 951.11832 \text{ gr}$$

La forma de cálculo de la composición en peso de la fracción de escoria salina con tamaño de partícula mayor a 5 mm, se muestra a continuación:

- Aluminio

$$M_{\text{Al}}^{\text{B}} = X_{\text{Al}}^{\text{B}} \times B$$

$$M_{\text{Al}}^{\text{B}} = \frac{308,816.90 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{\text{Al}}^{\text{B}} = 123.80 \text{ gr}}$$

- Calcio

$$M_{Ca}^B = X_{Ca}^B \times B$$

$$M_{Ca}^B = \frac{0 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400,9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Ca}^B = 0}$$

- Magnesio

$$M_{Mg}^B = X_{Mg}^B \times B$$

$$M_{Mg}^B = \frac{1,293.00 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400,9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Mg}^B = 0.52 \text{ gr}}$$

- Potasio

$$M_K^B = X_K^B \times B$$

$$M_K^B = \frac{2,666.90 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400,9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_K^B = 1.07 \text{ gr}}$$

- Silicio

$$M_{Si}^B = X_{Si}^B \times B$$

$$M_{Si}^B = \frac{84,936.20 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400,9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Si}^B = 34.05 \text{ gr}}$$

- Sodio

$$M_{Na}^B = X_{Na}^B \times B$$

$$M_{Na}^B = \frac{9,859.40 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400,9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Na}^B = 3.95 \text{ gr}}$$

- Zinc

$$M_{Zn}^B = X_{Zn}^B \times B$$

$$M_{Zn}^B = \frac{495.20 \text{ mg}}{\text{kg de B}} \times 400.9 \text{ gr} \times \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ gr}}$$

$$\mathbf{M_{Zn}^B = 0.20 \text{ gr}}$$

ANEXO C

Planos de propuesta de bodega para almacenamiento de escoria salina de aluminio secundario.

Figura C-1 Vista frontal de fachada de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

Figura C-2 Corte seccional de vista frontal de fachada de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

Figura C-3 Corte vista lateral de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

Figura C-4 Vista aérea de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

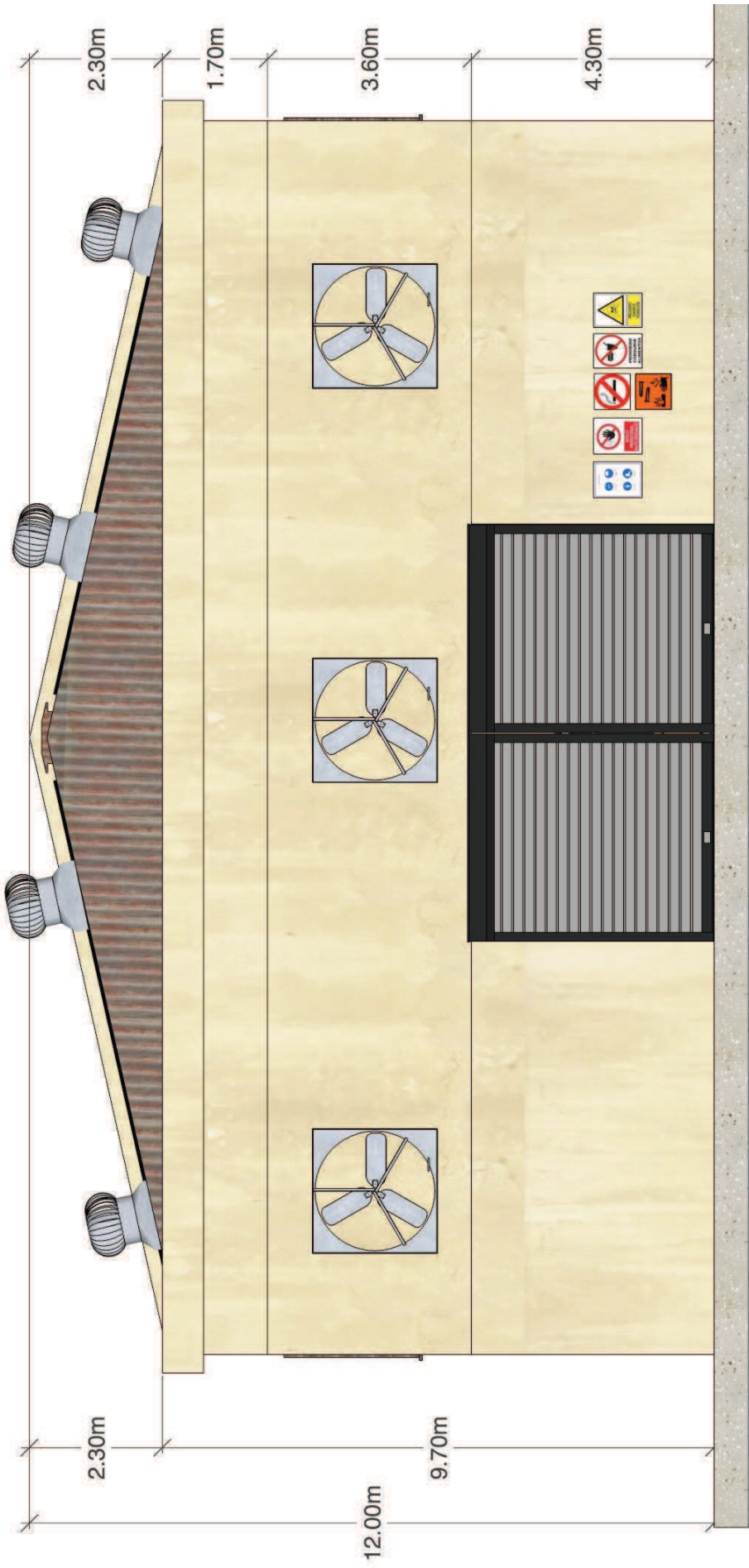


Figura C-1 Vista frontal de fachada de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

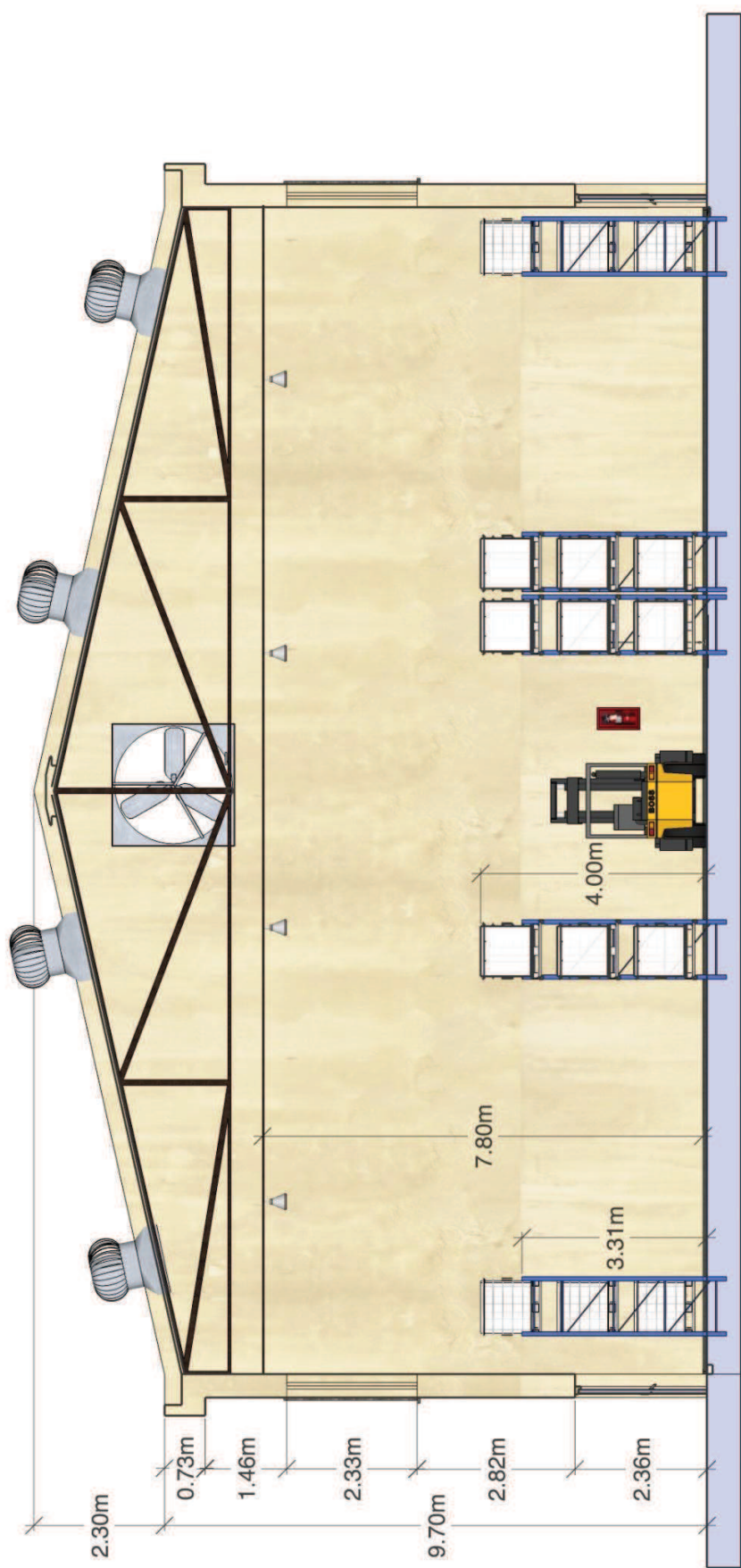


Figura C-2 Corte seccional de vista frontal de fachada de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.



Figura C-3 Corte vista lateral de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

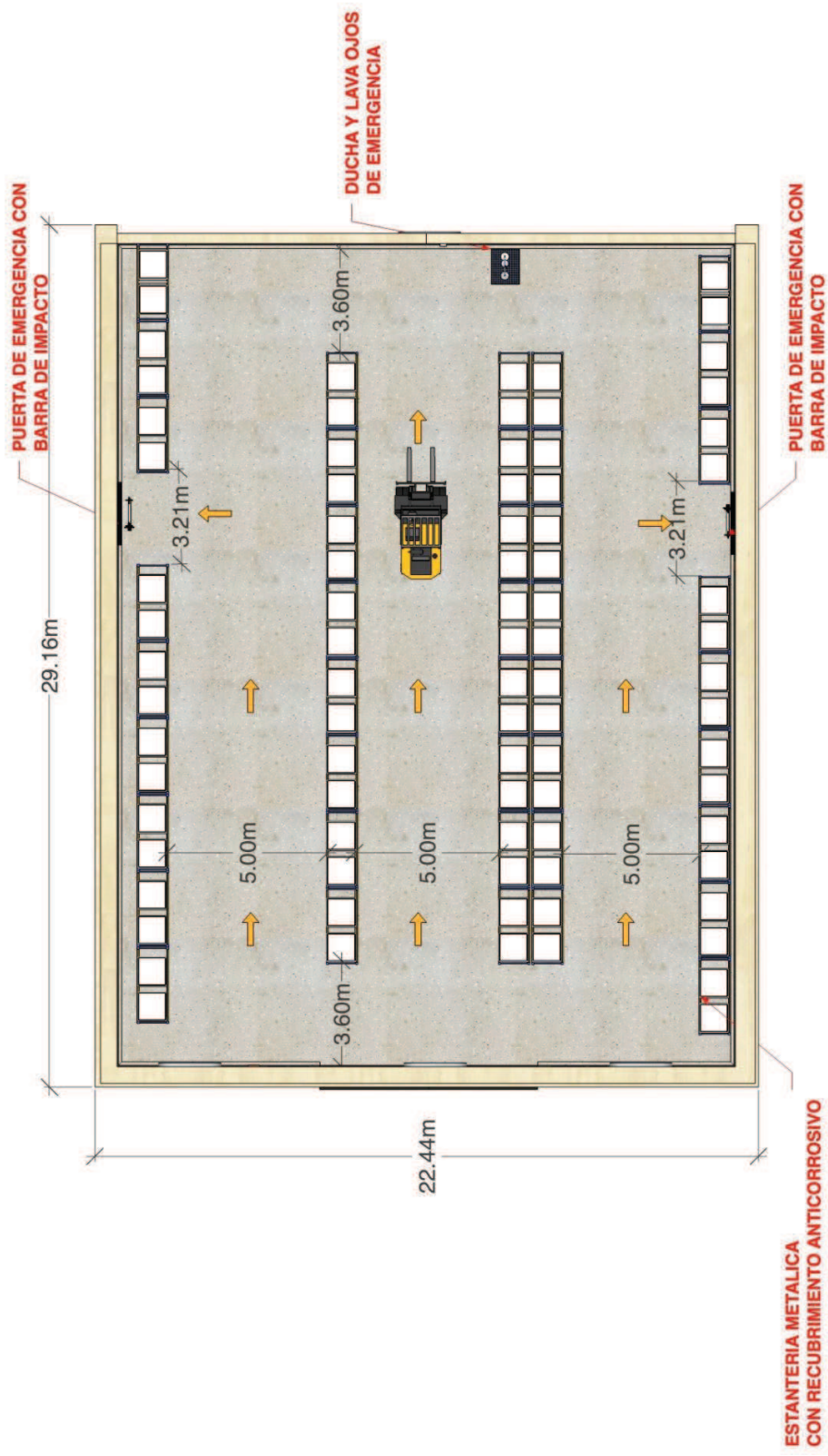


Figura C-4 Vista aérea de bodega de escorias salinas de aluminio secundario.

ANEXO D

Formulario Exportación de Residuos - MARN



MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES
DIRECCIÓN GENERAL DE GESTIÓN AMBIENTAL
FORMULARIO AMBIENTAL: EXPORTACIÓN DE RESIDUOS/DESECHOS PELIGROSOS

INFORMACIÓN GENERAL

Naturaleza de la Persona que solicita la actividad de exportación de residuos/desechos peligrosos:

Persona Natural

Nombre:

Documento Único de Identidad

Pasaporte:

Domicilio Principal (Dirección exacta):

Municipio:

Departamento:

Teléfono:

Fax:

Email:

Persona Jurídica

Nombre de la empresa:

Actividad principal:

Domicilio principal:

Municipio:

Departamento:

Teléfono:

Fax:

Email:

Representante Legal:

Documento Único de Identidad

Pasaporte:

INFORMACION DEL SITIO DE ELIMINACIÓN O RECUPERACIÓN DE LOS RESIDUOS/DESECHOS

Persona Natural

Nombre:

Domicilio Principal (Dirección exacta):

Teléfono:

Fax:

Email:

Persona Jurídica

Nombre de la empresa:

Actividad principal:

Domicilio principal (Dirección exacta):

Teléfono: _____ Fax: _____ Email: _____

Representante Legal: _____

Método de eliminación o recuperación de los residuos/desechos peligrosos: _____

INFORMACIÓN DEL TRANSPORTISTA PREVISTO

Persona Natural

Nombre: _____

Número de Resolución MARN del Permiso Ambiental para el Transporte: _____

Domicilio Principal (Dirección exacta): _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Email: _____

Persona Jurídica

Nombre de la empresa: _____

Número de Resolución MARN del Permiso Ambiental para el Transporte: _____

Actividad principal: _____

Domicilio principal (Dirección exacta): _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Email: _____

Representante Legal: _____

Nota: Si no posee Permiso Ambiental para el transporte, deberá tramitarlo mediante la presentación del Formulario Ambiental de Transporte de Materiales Peligrosos (FA TMP 04)

INFORMACION DEL SITIO DE ALMACENAMIENTO DE LOS RESIDUOS/DESECHOS

Persona Natural

Nombre: _____

Número de Resolución MARN del Permiso Ambiental sobre el sitio de Almacenamiento: _____

Domicilio Principal (Dirección exacta): _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Email: _____

Persona Jurídica

Nombre de la empresa: _____

Número de Resolución MARN del Permiso Ambiental sobre el sitio de Almacenamiento: _____

Actividad principal: _____

Domicilio principal (Dirección exacta): _____

Teléfono: _____ Fax: _____ Email: _____

Representante Legal: _____

Nota: Si no posee Permiso Ambiental para el almacenamiento deberá tramitarlo mediante la presentación del Formulario Ambiental de Transporte de Materiales Peligrosos (FA AMP 04)

DECLARACION JURADA

Doy fe de la veracidad de la información detallada en el presente documento, cumpliendo con los requisitos de ley exigidos, razón por la cual asumo la responsabilidad consecuente derivada de la presente Declaración Jurada.

Nombre completo del Titular o Representante Legal

Firma

Nota: La presente no tiene validez sin nombre y firma. Si requiere mayor espacio para cualquiera de los numerales incorporar páginas adicionales al Formulario Ambiental.

I. IDENTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS/DESECHOS PELIGROSOS A EXPORTAR

➤ Para los residuos/desechos a exportar indique

	DESCRIPCION
Nombre del Residuo/Desecho	
Tipo del Residuo/Desecho (Número Y) ¹	
Características de Peligrosidad del Residuo/Desecho (Número H) ²	
Cantidad total del residuo/desecho a exportar	
Tipo de embalaje ³	
Características Físicas ⁴	
Características Químicas	
Modo de transporte ⁵	
Puerto de salida del país de origen	
País Destino Final	
País(es) de Tránsito	
Fecha prevista de la exportación	

Notas:

1. Tipo de Residuo/Desecho: refiérase al artículo 23 del Reglamento Especial en Materia de Sustancias, Residuos y Desechos Peligrosos.
2. Características de Peligrositas: H1 Explosivos; H3 Líquidos inflamable; H4.1 Sólidos inflamables; H4.2 Sustancias o desechos susceptibles a combustión espontánea; H4.3 Sustancias o desechos que, en contacto con el agua, emiten gases inflamables; H5.1 Oxidantes; H5.2 Peróxidos orgánicos; H6.1 Tóxicos (venenos) agudos; H6.2 Sustancias infecciosas; H8 Corrosivos; H10 Liberación de gases tóxicos en contacto con el aire o el agua; H11 Sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos); H12 Ecotóxicos; H13 Sustancias que pueden, por algún medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia, por ejemplo, un producto de lixiviación, que posee alguna de las características arriba mencionadas.
3. Tipo de embalaje: 1. Tambor; 2. Barril de madera; 3. Bidón; 4. Caja; 5. Bolsa; 6. Embalaje mixto; 7. Receptáculo a presión; 8. A granel; 9. Otro (especificuese).
4. Características físicas: 1. Pulverulento/polvo; 2. Sólido; 3. Viscoso/en pasta; 4. Fangoso; 5. Líquido; 6. Gaseoso; 7 Otros (especificuese).
5. Modo de transporte: C-Carretera; T-Tren; M-Mar; A-Aire; AI-Aguas interiores.

ANEXO E

Resultados de análisis químico instrumental para caracterización de muestras de escoria salina de aluminio secundario.

- Anexo E-1 Resultados de análisis químico instrumental de muestras de lixiviados de escoria salina de aluminio secundario, realizados en el Laboratorio de Aguas del CENSALUD (Centro de Investigación y Desarrollo en Salud) de la facultad de Química y Farmacia de la Universidad de El Salvador.
- Anexo E-2 Resultados de análisis químico instrumental de Difracción de Rayos X de muestras de escoria salina de aluminio secundario, realizados en el Laboratorio Geoquímico de La Geo, El Salvador
- Anexo E-3 Resultados de análisis químico instrumental de Espectrofotometría de Absorción Atómica de muestras de escoria salina de aluminio secundario, realizados en el Laboratorio Geoquímico de La Geo, El Salvador



F - 09

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS**

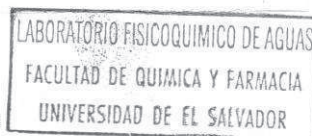
CODIGO Nº 03-12		INFORME DE RESULTADOS		
Nombre y dirección del cliente: PATRICIA CHEVEZ. RESIDENCIAL BERNAL, CALLE PRINCIPAL CASA # 02. SAN SALVADOR.				Pág. 2 de 2
Descripción de muestra: LIXIVIADO DE ESCORIA DE ALUMINIO.			Nº DE MUESTRAS: 2	
Lugar de toma de muestra: SOYAPANGO.				
Fecha de elaboración del informe: 21 DE FEBRERO DE 2012.				
Fecha de recepción de muestra: 10 DE FEBRERO DE 2012.		Fecha de Análisis: DEL 15 AL 21 DE FEBRERO/2012.		
Método de Análisis: FOTOMETRICO Y VOLUMENTRICO.				
Parámetros	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua, Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
	CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
ALUMINIO	03-12-02	MX C	4.0 mg/L	5.0 mg/L
CALCIO			No Detectado	No Normado
CLORUROS			2450 mg/L	No Normado
CROMO HEXAVALENTE			0.03 mg/L	0.1 mg/L
FLUORUROS			2 mg/L	5 mg/L
MAGNESIO			27.22 mg/L	No Normado
MANGANESO			0.11 mg/L	2.0 mg/L
NIQUEL			0.10 mg/L	0.2 mg/L
NITROGENO AMONIACAL			No Detectado	No Normado
POTASIO			31.60 mg/L	No Normado
SILICE			0.82 mg/L	No Normado
SODIO			40.00 mg/L	No Normado
ZINC			91.8 mg/L	5 mg/L
Observaciones:				
1. La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.				

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

NOTA: El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.

FECHA DE ENTREGA: 29 FEB 2012

[Signature]
Licda. Odette Rauda Acevedo
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas
y Analista



[Signature]
Licda. Rosa Mirian Rojas Larín
Analista

[Signature]
Lic. Henry Alfredo Hernández
Analista



F - 09

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE QUÍMICA Y FARMACIA
LABORATORIO FÍSICOQUÍMICO DE AGUAS**

CODIGO N° 03-12		INFORME DE RESULTADOS		
Nombre y dirección del cliente: PATRICIA CHEVEZ. RESIDENCIAL BERNAL, CALLE PRINCIPAL CASA # 02. SAN SALVADOR.				Pág. 1 de 2
Descripción de muestra: LIXIVIADO DE ESCORIA DE ALUMINIO.			N° DE MUESTRAS: 2	
Lugar de toma de muestra: SOYAPANGO.				
Fecha de elaboración del informe: 21 DE FEBRERO DE 2012.				
Fecha de recepción de muestra: 10 DE FEBRERO DE 2012.			Fecha de Análisis: DEL 15 AL 21 DE FEBRERO/2012.	
Método de Análisis: FOTOMETRICO Y VOLUMENTRICO.				
Parámetros	Identificación de la Muestra		Resultados	Norma CONACYT Agua, Residuales descargadas a un cuerpo receptor NSO 13.49.01:09
	CODIGO LABORATORIO	CODIGO CLIENTE		
ALUMINIO	03-12-01	MX B	3.5 mg/L	5.0 mg/L
CALCIO			No Detectado	No Normado
CLORUROS			2000 mg/L	No Normado
CROMO HEXAVALENTE			0.03 mg/L	0.1 mg/L
FLUORUROS			2 mg/L	5 mg/L
MAGNESIO			39.85 mg/L	No Normado
MANGANESO			0.03 mg/L	2.0 mg/L
NIQUEL			0.08 mg/L	0.2 mg/L
NITROGENO AMONIACAL			No Detectado	No Normado
POTASIO			30.80 mg/L	No Normado
SILICE			1.03 mg/L	No Normado
SODIO			32.89 mg/L	No Normado
ZINC			122.4 mg/L	5 mg/L
Observaciones:				
1. La toma de muestra estuvo a cargo del interesado.				

Advertencia: Los Resultados del informe solo se refieren a las muestras analizadas.

NOTA: El informe de análisis sólo puede ser reproducido parcial o totalmente con la autorización escrita del laboratorio.
Se especificara en observaciones, si la muestra fue tomada por el cliente o el laboratorio.

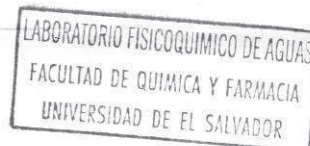
FECHA DE ENTREGA:


29 FEB 2012

Licda. Odette Rauda Acevedo
Jefe del Laboratorio Físicoquímico de Aguas
y Analista

Licda. Rosa Mirian Rivas Larín
Analista

Lic. Henry Alfredo Hernández
Analista



	Laboratorio de Geología	Area: GEO	Numero: 33
	Código: F - GEO-005		Fecha: 23/04/12
Nombre del solicitante: Patricia Idalia Chevez Aparicio			
Nombre de la Empresa: Universidad de El Salvador			
Fecha de solicitud: 11/04/12			
No. de muestras: 5			
Resultados de Análisis			
Muestra	Localidad	Descripción	Composición mineralógica por DFRX
CT037-12 MxC lodos	Proveniente de lixiviado de escoria de Aluminio	La muestra está compuesta por partículas de diferentes tamaños y formas, color gris-café. Se observa partículas metálicas redondeadas gris (60%) en su mayoría y fragmentos rojizos y blancos. Los fragmentos blancos no reaccionaron con el ácido clorhídrico.	Aluminio (Al) – 50% Chabazita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{Cl}_2$) – 18% Bayerita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – 18% Cuarzo (SiO_2) – 14%
CT038-12 MxC malla 4	Escoria salina compacta triturada	La muestra está compuesta por partículas metálicas redondeadas de color gris metálico (95%), algunas porosas, cubiertas de partículas terrosas y finas de color café-claro. Dureza alta.	Parte terrosa: Aluminio (Al) – 26% Chabazita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{Cl}_2$) – 25% Bayerita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) - 18% Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – 17% Silvita (KCl) – 14% Parte metálica: Aluminio (Al) – 100%

CT039-12 MxB lodos	Lodo proveniente de lixiviado de escoria salina de aluminio suelta	La muestra está compuesta por partículas metálicas redondeadas (60%) y partículas terrosas de diferentes tamaños de color gris-café, se observa menor cantidad de partículas rojizas	Aluminio (Al) – 36% Silicato de aluminio de calcio ($\text{Ca}_{1,95}\text{Al}_{3,9}\text{Si}_{8,1}\text{O}_{24}$) – 31% Silvita (KCl) – 17% Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – 16%
CT040-12 MxB malla 4	Escoria salina suelta triturada	La muestra está compuesta por partículas redondeadas metálicas de color gris metálico (95%), cubiertas de partículas terrosas y finas de color café-claro. Dureza alta.	Parte terrosa: Aluminio (Al) – 26% Chabazita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8\text{Cl}_2$) – 22% Gahnita (ZnAl_2O_4) -17% Bayerita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) - 15% Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) – 10% Silvita (KCl) – 10% Parte metálicas: Aluminio (100%)
CT041-12 Disco	Extracción de escoria salina compacta	La muestra está compuesta por una pieza redondeada con agujero en la parte central, color gris-metálica, dureza alta	Aluminio (Al) – 93% Bayerita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) – 7%

Observaciones:

Las muestras fueron analizadas por la técnica de difracción de rayos X, utilizando un difractómetro marca SIEMENS D5000 con radiación de ánodo de cobre monocromado (CuK_{α} , $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Los difractogramas se obtuvieron en un rango de 2θ , de 2 a 60° .

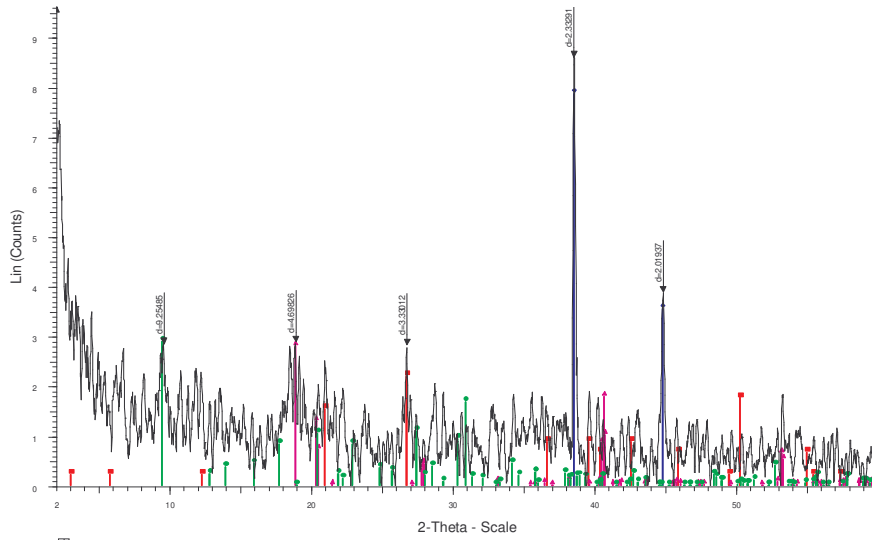
1. La muestra MxC lodos (CT037-12) está compuesta por partículas terrosas, algunas cubriendo las partículas metálicas. Al echarle agua, se observa bien las partículas metálicas, fragmentos rojizos y blancos. Se identificó el aluminosilicato de calcio (chabazita), cuarzo (sílice), hidróxido de aluminio (bayerita) y aluminio en su mayoría.
2. La muestra MxC malla 4 (CT038-12) está compuesta principalmente por partículas redondeadas metálicas de color gris-metálico, con algunas partículas finas cubriendo estos metales. Se realizó análisis en ambos tipos de muestras: parte metálica y parte fina. La parte metálica es aluminio y en la parte fina se identificó chabazita, bayerita, gibbsita (hidróxido de aluminio) y silvita (KCl), un tipo de sal.
3. La muestra MxB lodos (CT038-12) está compuesta por partículas terrosas y metálicas. Los diferentes colores de gris-metálico, blanco y rojizo se observaron al echarle agua a la muestra. Se encontró aluminio, aluminosilicato de calcio, gibbsita (hidróxido de aluminio) y silvita.
4. La muestra MxB malla 4 (CT040-12) está compuesta por partículas redondeadas de color gris metálico con algunas partículas terrosas. Se identificó aluminio en su mayoría, aluminosilicato de calcio, hidróxido de aluminio (bayerita y gibbsita), gahnita (óxido de aluminio de cinc) y silvita.
5. La muestra del disco (CT041-12) es una pastilla dura metálica redondeada, con un agujero pequeño en la parte central con una dureza alta. Está compuesta principalmente por aluminio (Al) e hidróxido de aluminio.

Las muestras recuperadas en la malla 4 (McB y MxC) consisten en su mayoría, partículas redondeadas metálicas, identificadas como aluminio (Al).

Las muestras de lodo (MxB y MxC) están compuestas por aluminio (Al), hidróxido de aluminio y aluminosilicato de calcio.

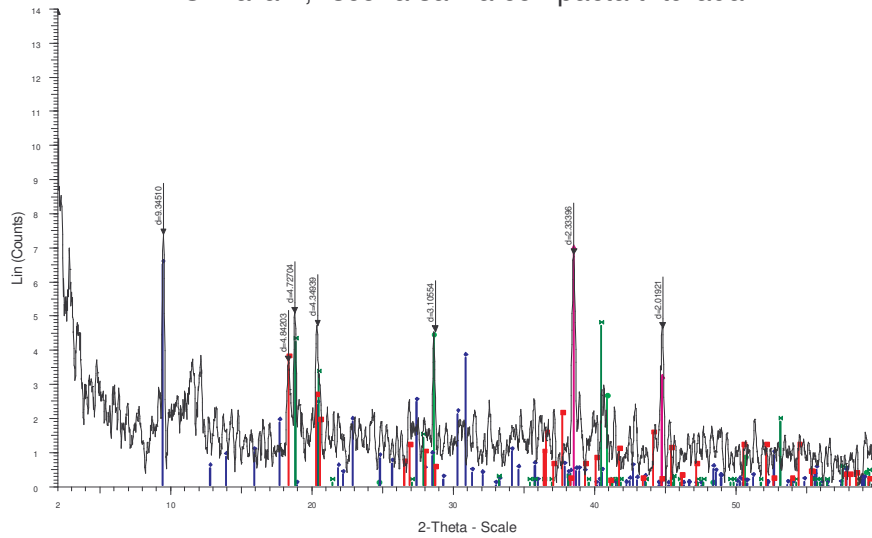
Difractogramas

MxC Lodos



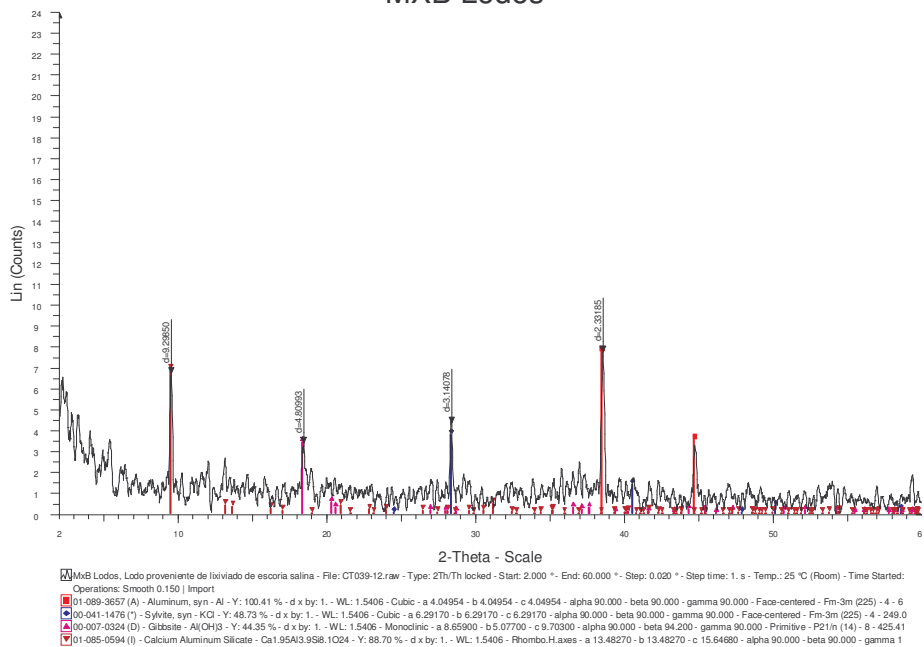
MxC Lodos, Proveniente de lixiviado de escoria salina de al - File: CT037-12.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started:
Operations: Smooth 0.150 | Import
[01-071-4625 (A) - Aluminum - Al - Y: 91.44 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.04400 - b 4.04400 - c 4.04400 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 66.1353
[00-003-0444 (D) - Quartz - SiO2 - Y: 25.64 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Hexagonal - a 4.90300 - b 4.90300 - c 5.39300 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - P3121 (152) - 3 - 112.275
[01-074-1119 (I) - Bayerite - Al(OH)3 - Y: 32.59 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 5.06200 - b 8.67100 - c 4.71300 - alpha 90.000 - beta 90.270 - gamma 90.000 - Primitive - P21a (14) - 4 - 206.864
[01-085-1037 (N) - Chabazite - CaAl2Si2O6Cl2 - Y: 33.61 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 13.87500 - b 13.87500 - c 15.03913 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-

MxC malla 4, Escoria salina compacta triturada

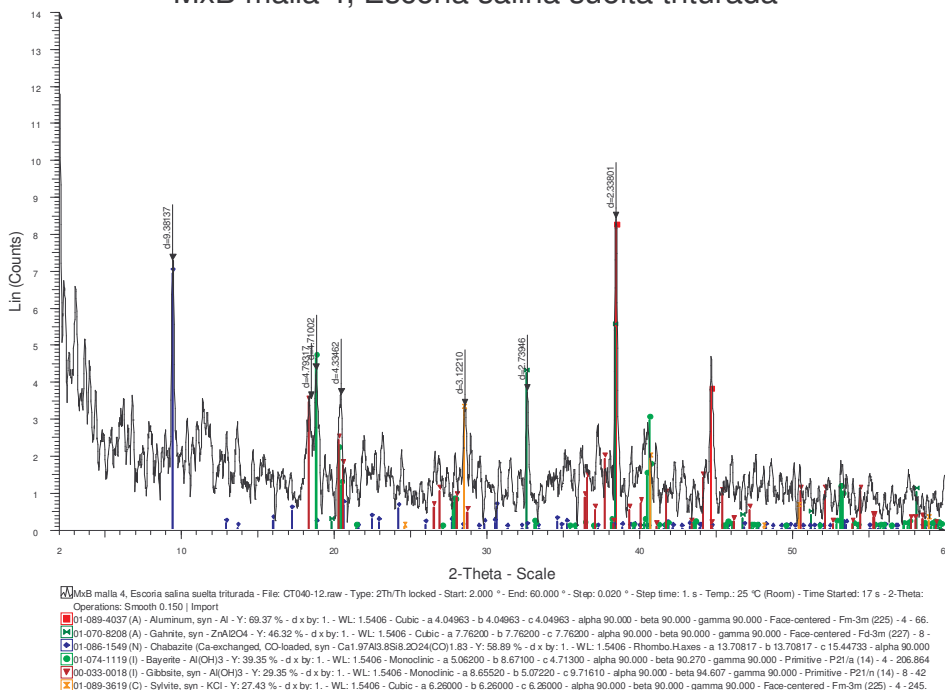


MxC malla 4, Escoria salina compacta triturada - File: CT038-12.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 60.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 1. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 19 s - 2-Thet
Operations: Smooth 0.150 | Import
[01-075-0297 (I) - Sylvine sodian, syn - Na1002K8998O2 - Y: 42.54 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 6.23540 - b 6.23540 - c 6.23540 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - F
[01-071-4625 (A) - Aluminum - Al - Y: 67.91 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 4.04400 - b 4.04400 - c 4.04400 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 66.1353
[01-085-1037 (N) - Chabazite - CaAl2Si2O6Cl2 - Y: 63.78 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 13.87500 - b 13.87500 - c 15.03913 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-
[00-020-0011 (I) - Bayerite, syn - Al(OH)3 - Y: 46.03 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 5.06200 - b 8.67100 - c 4.71300 - alpha 90.000 - beta 90.270 - gamma 90.000 - Primitive - P21a (14) - 4 - 20
[00-033-0018 (I) - Gibbsite, syn - Al(OH)3 - Y: 36.60 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic - a 8.65520 - b 5.07220 - c 9.71610 - alpha 90.000 - beta 94.607 - gamma 90.000 - Primitive - P21n (14) - 8 - 42

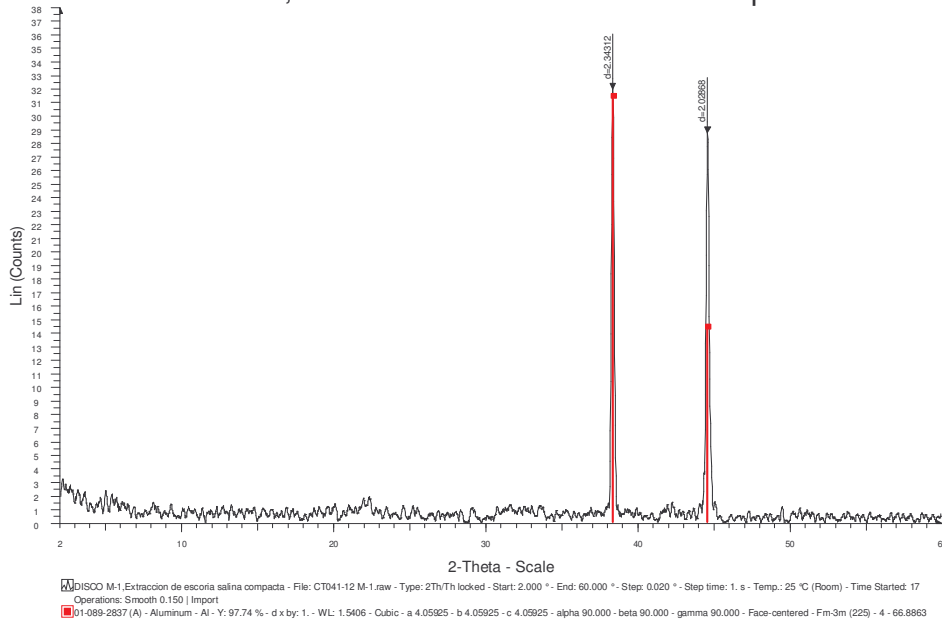
MXB Lodos



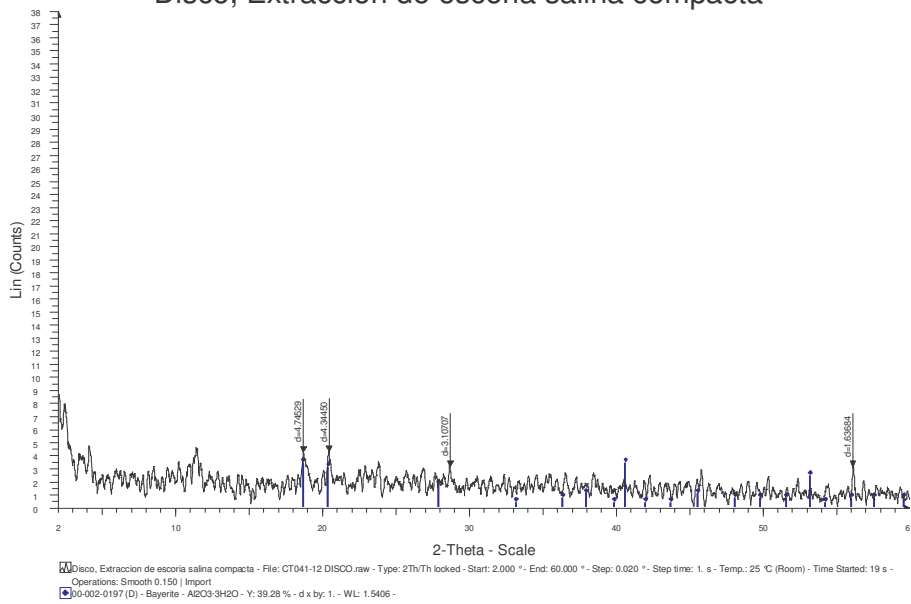
MxB malla 4, Escoria salina suelta triturada



DISCO M-1, Extraccion de escoria salina compacta



Disco, Extraccion de escoria salina compacta



Analizado por: Elizabeth de Henríquez

Fecha de Entrega: 23/04/12

Revisado por: Ing. Arturo Quezada Muñoz

Coordinador, Área de Geología