



**Universidad Nacional Autónoma De México**  
**Facultad De Química**

**Aluminio Verde.**  
**El Reto Para La Industria Del Futuro**

**TESINA**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**  
**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO.**

Presenta:

**NOEL ALEJANDRO QUIROZ VERGARA**

Asesora:

**BALBINA OJEDA RAMÍREZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2023.





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor:** García Hinojosa José Alejandro.

**VOCAL:**                   **Profesor:** Ojeda Ramírez Balbina.

**SECRETARIO:**       **Profesor:** Figueroa Vargas Ignacio Alejandro.

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor:** Rojas Rodríguez Alma Delia.

**2do. SUPLENTE:**      **Profesor:** Nuñez Velazquez Tania Georgina

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Edificio D, Facultad de Química, UNAM.

**ASESOR DEL TEMA:**



---

M. en C. Balbina Ojeda Ramírez

**SUSTENTANTE(S):**



---

Noel Alejandro Quiroz Vergara

## Agradecimientos.

A mis papás y a mi abuelita por siempre hacer lo necesario para que yo me dedicara solamente a la universidad. Por todas las veces que me cuidaron cuando estaba enfermo, por todas las navidades y cumpleaños especiales que he tenido. Por todas las veces que antepusieron mis necesidades a las de ustedes, por todos los desvelos que les he hecho pasar y por todo lo que me ayudaron para mudarme a Puebla. No podría haber terminado sin todo su apoyo.

A Balbi por siempre apoyarme tanto de manera académica, profesional y personal durante mi estancia en la universidad. Siempre fue un placer dar lo mejor de mí en todas las clases que tuve contigo. Eres una inspiración no solamente para mí, sino para todos aquellos que hemos llegado a ser tus alumnos. A Nat por hacerme ver mi carrera de maneras que no hubiera podido imaginar por mi mismo y abrirme un mundo de posibilidades. Sin ti muchas de las cosas a las cuales aspiro a ser no serían posibles. Ustedes 2 son todo aquello que un día quiero llegar a ser.

A Kathy por siempre apoyarme cuando sentía que no podía seguir por mi mismo, por todas las materias en las que nos ayudamos, por escuchar mis historias por más largas que fueran, por todas las veces que nos reímos de alguien y por siempre creer en mí.

A Giovanni por siempre ser mi guía para saber qué es lo correcto, por ser la persona con la que descubro comidas nuevas y por saber entenderme y guiarme cuando cometo un error.

A ambos por todos esos momentos especiales que tuve con ustedes, por todas las clases que nos saltamos para ir por un café y por ser mis mejores amigos. Esto jamás habría sido posible sin su ayuda y su compañía. Estoy muy agradecido de haberlos conocido.

Y a Karina, Yayo, Omar, Daniel y César por todo su apoyo durante todos estos años y siempre estar dispuestos a compartir su tiempo conmigo.

**Dedicada a mí mismo.**

# ÍNDICE

Capítulo 1, Introducción.....	5
1.1 Planteamiento del problema.....	6
1.2 Metodología.....	8
1.3 Objetivos.....	8
Capítulo 2, Fundamento teórico.....	9
2.1 Medio ambiente, daño medioambiental y su medición.....	9
2.2 Sustentabilidad y desarrollo sostenible.....	9
2.2.1 Evaluación de un proyecto de desarrollo sostenible.....	10
2.3 Ciclo de vida de los materiales.....	13
2.3.1 Fin de la vida de los materiales.....	14
2.3.2 Análisis de ciclo de vida (LCA).....	15
2.3.3 Aluminio en la economía circular.....	17
2.4 Aluminio.....	19
2.4.1 Proceso de obtención de aluminio primario.....	21
2.4.2 Proceso de obtención de aluminio secundario.....	24
2.5 Medio ambiente y emisiones.....	24
2.6 Energía.....	27
2.7 Mercado global.....	29
2.8 Mercado nacional.....	34
2.9 Aluminio verde.....	36
2.9.1 Aluminio verde en el futuro.....	38
2.9.2 Etiquetado y estandarización.....	39
Capítulo 3, Resultados y discusión.....	41
3.1 Planteamiento.....	41
3.2 Generalidades.....	41
3.3 Life Cycle Inventory (LCI).....	43
3.4 Diseño y elaboración de plataforma digital.....	55
Capítulo 4, Conclusiones y trabajos futuros.....	56
Capítulo 5, Referencias.....	57

## Capítulo 1, Introducción.

El aluminio es un metal idóneo para ser reutilizado por su alta reciclabilidad, por lo que es posible de reprocesar infinitas veces sin que este pierda sus propiedades o su calidad. Esta no es su única propiedad de interés, ya que además, posee una gran durabilidad, así como una alta resistencia a la corrosión y una baja densidad.

Existen 2 vías por las cuales es posible obtener aluminio metálico a nivel industrial, por la vía primaria (obtención a partir del mineral) o por la vía secundaria (reciclado de chatarras). El aluminio primario comienza con la extracción y molienda de la bauxita, la cual es posteriormente concentrada y llevada al proceso Bayer, con lo cual se obtiene la alúmina y a partir de esta se obtiene el aluminio metálico, por medio del proceso Hall-Héroult. Sin embargo, toda esta serie de procesamientos requieren una gran cantidad de energía y generan emisiones y residuos que contaminan considerablemente el medio ambiente.

Por otro lado, la obtención de aluminio secundario se basa en la refundición de sus chatarras, las cuales deben pasar por limpiezas, recortes y compactados, con el fin de que la materia prima esté lo más limpia posible. Aunque la producción de aluminio secundario implica una menor cantidad de emisiones y de energía utilizada, no es posible obtener purezas tan elevadas como con el aluminio primario, al menos no con los procesos de separación usados actualmente en la industria.

Se considera que cuanto más precisa sea la separación de chatarras de aluminio, estas pueden utilizarse de forma más específica. Esto además de reducir considerablemente las emisiones de CO<sub>2</sub> y el gasto energético, proporciona aluminios secundarios de mayor pureza y ayuda a alargar la vida de las chatarras utilizadas. En este caso entran en juego las posibilidades que las nuevas tecnologías ofrecen, las cuales permiten realizar un reciclaje y reprocesamiento cada vez más selectivos. Aunado a las nuevas tecnologías disponibles, actualmente los requerimientos medioambientales están siendo cada vez más rigurosos en todo tipo de industrias, incluida la industria metalmeccánica.

Las soluciones que se desarrollen en los próximos años, deben no solamente asegurar un crecimiento económico sostenido en el tiempo, también deben proteger al capital humano y al medio ambiente. Todo esto con el fin de tener un desarrollo cada vez más sostenible, donde se vayan adoptando medidas de producción y consumo más responsables.

Pero no solo la huella de carbono es importante al momento de medir la sustentabilidad en la producción de un producto, también se pueden usar otros indicadores y herramientas que nos den una visión más amplia de cómo impacta la fabricación de un producto a nuestro entorno, ejemplo de esto son la huella hídrica, la huella de carbono equivalente, la eficiencia energética y el análisis de ciclo de vida (LCA) de un producto.

Es aquí donde entra el aluminio verde, el cual promete revolucionar la industria del aluminio en el mundo. El desarrollo del mismo permitirá la producción de aluminio con cada vez mayor pureza al mismo tiempo que se reducen las emisiones, los residuos y los costes energéticos. Con la

introducción de este concepto se requerirá la creación de normas y estándares los cuales aseguren tanto la calidad metalúrgica como la medioambiental.

El presente trabajo se enfocará en recabar la información acerca del aluminio verde (green aluminum), organizarla, analizarla y ponerla al alcance de alumnos e ingenieros que estén interesados en las innovaciones y retos del futuro que nos alcanza a pasos agigantados.

## 1.1 Planteamiento del problema.

Desarrollar industrias sostenibles debe ser una necesidad, esto hace que sea necesario cuestionar y reflexionar acerca de los procesos de extracción, refinación y manufactura que se han utilizado hasta la fecha y de cómo estos han contribuido al cambio climático, este es uno de los grandes retos que deben asumir las sociedades en la actualidad. No solo se deben desarrollar soluciones innovadoras y sostenibles en la industria del aluminio, sino que además estas deben de ser globalizadas y de fácil entendimiento para los consumidores.

El desarrollo de una industria verde del aluminio debe comenzar desde el control de las chatarras utilizadas en el reciclaje, lo cual requiere de la tecnología necesaria para realizar la separación de manera eficiente y precisa en función de la composición química de diferentes aleaciones. El reciclaje es un factor realmente importante debido a la alta reciclabilidad del aluminio y su larga vida útil. Gracias a estas propiedades se estima que aproximadamente un 75% del aluminio producido a lo largo de la historia todavía se halla en circulación, del cual el 35% se encuentra en construcciones y edificios, 30% en transporte y logística, 30% en maquinaria y cables eléctricos y menos del 1% en embalaje.

No solo la reciclabilidad es relevante, sino también el gasto energético. El ahorro energético en la producción del aluminio secundario respecto a la producción del aluminio primario es hasta del 95%, aunado a una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>eq de un 92%. Aún así, se debe de trabajar para encontrar nuevos procesos de producción de aluminio primario que sean más eficientes en cuanto al uso de energía y que minimicen la cantidad de carbono liberado a la atmósfera [1].

Por otro lado, la industria del aluminio reciclado además se está adaptando a utilizar fuentes de energía limpias que dejen de lado los combustibles fósiles. Toda la industria debe comprometerse a priorizar la introducción de materiales y fuentes de energía sostenibles [2]. Gracias a los cambios que se están comenzando a realizar se espera que para el 2030 las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción y procesamiento de aluminio se reduzcan en un 30%, mientras que el consumo de energía dentro del mismo se reduzca en un 22% [3].

El principal problema que existe es que la mayoría de empresas al diseñar y situar una planta no suelen considerar su impacto ambiental, sino solamente los costos. Ejemplo de esto es China, el país productor del 60% de aluminio en el mundo, donde la principal fuente de energía sigue siendo el carbón. Aunado a esto el cambio a procesos sostenibles está siendo bastante desigual, mientras que una tonelada de aluminio en Europa posee unas emisiones de 4 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, en China la misma cantidad de aluminio emite alrededor de 15 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente [4]. El



objetivo es que la industria del aluminio tenga emisiones de CO<sub>2</sub> neutras para el año 2050 de manera global [5].

Además de esto, la bauxita (la principal mena del aluminio) desde el 2020 ha sido reconocida como un material crítico según la Comisión Europea [6]. Es decir, que se considera a la bauxita como un material con una importancia industrial enorme del cual no existen materiales que pueden sustituirlo y que además existe un gran peligro de interrupciones en su cadena de suministros, por lo que si no se prioriza al reciclaje del aluminio es posible que en el futuro toda la cadena de suministros se vea afectada.

La búsqueda del aluminio verde parte de no solamente una mayor demanda de productos de aluminio en diferentes industrias, sino de una demanda cada vez mayor de productos y procesos que posean un menor daño medioambiental, una mayor eficiencia de recursos y una mayor calidad metalúrgica, todo esto a su vez con una normatividad que avale dichos avances.

Organizaciones como Carbon Trust han propuesto la aplicación de estándares que ayuden a los compradores a reconocer cuando el aluminio producido ha visto reducido su impacto medioambiental. A partir de estos estándares nace el término green aluminum (aluminio verde), el cual considera todo aluminio primario que libere 4 toneladas o menos de CO<sub>2</sub> equivalente, por tonelada de metal producido. El desarrollo del aluminio verde no solamente debe basarse en la creación de normativas, sino también de canales para su comercialización, ejemplo de esto es la London Metal Exchange que está en desarrollo de una plataforma de comercio exclusiva de aluminio verde [7]. A su vez diversas organizaciones como START Responsible Aluminium, han propuesto sistemas que proporcionen una mayor trazabilidad a diversos productos terminados de aluminio.

Los pioneros en cuanto a la reducción de emisiones y consumo energético son las empresas Rusal y Norsk Hydro, las cuales producen la mayor parte de su aluminio de manera sostenible, siendo el aluminio verde cerca del 90% y el 67% de su producción total, respectivamente. En México empresas como CUPRUM y ALMEXA ya han dado inicio al desarrollo de proyectos encaminados a la implementación y uso del aluminio verde, en donde los planes están direccionados hacia las aleaciones industriales empleadas en el área metalmecánica [8].

El presente proyecto tiene la finalidad de realizar la búsqueda de información relacionada con la tendencia hacia la producción y desarrollo de aluminio verde, la creación de normativas que garanticen una baja huella de carbono en productos de aluminio, la reducción del daño medio ambiental y la visión hacia el futuro que este tiene que enfrentar, y a su vez, plasmar dicho contenido en una plataforma en donde pueda ser consultada esta información, la cual se torna más relevante día a día en la industria metalúrgica y en el mundo.

## 1.2 Metodología.

El desarrollo del presente trabajo se realizó por etapas:

- I. Búsqueda de información.
  - a. Investigación bibliográfica en libros especializados de los diferentes temas abordados (como ciclo de vida, fin de vida y LCA).
  - b. Consulta de artículos, bases de datos y otros medios, enfocándose en reportes de diferentes organizaciones e industrias productivas en el sector del aluminio.
  - c. Webinars
- II. Análisis de la información. Comparar y analizar los diferentes datos disponibles en la literatura.
- III. Cálculo de las emisiones (en CO<sub>2</sub> equivalente) de diferentes procesos productivos. Estos deben realizarse considerando todas las emisiones de gases de efecto invernadero de cada proceso así como su correspondiente GWP<sub>100</sub>.
- IV. Diseño y selección de la información que se incluirá en la plataforma. Esta debe ser lo más representativa del proceso y lo más simplificada posible, con el fin de que pueda ser comprendida por una gran cantidad de usuarios.
- V. Generación del reporte del proyecto, tomando como base un vasto marco teórico con el fin de abordar diferentes temas dentro del subsecuente análisis.
- VI. Elaboración de la plataforma digital. Debe contener información relevante de la industria del aluminio, además de poseer un diseño claro y limpio que facilite la navegación dentro de la misma.

## 1.3 Objetivos.

### Generales.

- Recopilar información sobre la cadena productiva del aluminio, su mercado industrial y sus aspectos ambientales, así como las innovaciones existentes para el desarrollo del aluminio verde, con el fin de dar a conocer la importancia que éste tendrá en el futuro.

### Particulares.

- Investigar los principales aspectos metalúrgicos, medioambientales, económicos y normativos que involucran a la cadena de valor del aluminio a través de una revisión bibliográfica.
- Realizar el LCI de todo el proceso productivo de un componente de aluminio primario en Latinoamérica y su comparación respecto a los datos promedio a nivel global, con el fin de conocer las emisiones y residuos que estos producen.
- Difundir a través de una plataforma digital, la importancia y las iniciativas existentes en la actualidad para la creación de una industria de aluminio verde en el mundo.

## Capítulo 2, Fundamento teórico.

### 2.1 Medio ambiente, daño medioambiental y su medición.

El término "medio ambiente" generalmente se refiere al entorno físico que es común a todos los seres vivos e incluye el espacio aéreo, el agua, la tierra, las plantas, la vida silvestre y la flora-fauna, etc.

La evaluación del daño medioambiental es relevante actualmente debido a que el cambio climático está afectando la calidad medio ambiental y sus funciones a lo largo del globo. Por ejemplo, el cambio climático está afectando el proceso de formación de suelos, productividad de los cultivos y la diversidad bacteriana en suelos. Así mismo, el aumento de la temperatura atmosférica está reduciendo la producción de biomasa en las plantas. El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera terrestre aumenta la temperatura global y afecta de manera negativa en varios procesos clave en la Tierra.

La evaluación de parámetros medioambientales es necesaria para ejecutar diferentes actividades de desarrollo dentro de una región. Dependiendo del tipo de daño medioambiental que se quiere evaluar, es necesario el uso de diferentes parámetros, es decir, puede evaluarse la actividad microbiana, la disponibilidad de nitrógeno y fósforo, el pH, la conductividad eléctrica o niveles de fertilidad de un suelo, o, por otro lado, pueden medirse las emisiones de gases de efecto invernadero y el contenido de metales pesados en la evaluación de la calidad del aire [9].

### 2.2 Sustentabilidad y desarrollo sostenible.

La sustentabilidad trata sobre la habilidad de satisfacer las necesidades de las personas y sus comunidades y organizaciones no solo en el corto plazo, sino a largo plazo. Es sobre la gente y sus necesidades, no solo sobre la tecnología, el ambiente o "ser verde". Es sobre administrar y proteger los recursos naturales de la tierra, sus ecosistemas, el clima y su atmósfera para que las generaciones presentes y futuras tengan los recursos que necesitan para tener una vida decente. Al hacerlo, millones de otras especies con las que compartimos el planeta se verán también beneficiadas [10] [11]. La sustentabilidad es un campo que está llamando mucho la atención en los últimos años al igual que la medición y la evaluación de la misma.

Por otro lado, el desarrollo sostenible es un concepto fuertemente relacionado a la sustentabilidad, ya que se define como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la habilidad de futuras generaciones de satisfacer sus propias necesidades. El desarrollo sostenible además se ha convertido en un manifiesto político bajo el cual ciudadanos, organizaciones civiles, empresas y gobiernos son guiados a promover acciones dirigidas a un objetivo en común: la sustentabilidad [12].

El desarrollo sostenible tiene que ver con la relación del ser humano con el medio ambiente del cual depende para su alimentación y la obtención de energía, agua y materias primas. Pero es algo más grande que eso. También se trata del sistema económico global del cual se obtienen materias primas, se manufacturan productos y se comercia. Y tal vez más importante aún, tiene que ver con la relación existente entre las personas, es decir, con los valores de la sociedad en la que cada individuo se

desarrolla y su relación con otras sociedades. Los 3 pilares del desarrollo sostenible deben entenderse como el crecimiento económico, el balance ecológico y el progreso social.

Se debe de entender que la sustentabilidad no es una pregunta de si o no. Esta tiene muchas facetas como la eficiencia y uso de recursos, el cuidado del medio ambiente, la legislación, la igualdad social, los derechos humanos y más, por lo tanto, su evaluación resulta compleja. Esta debe ser reflexionada, juzgada y debatida. No existen respuestas "correctas" a preguntas de desarrollo sostenible, sino que más bien, existen respuestas bien documentadas que reconocen las preocupaciones de los interesados, las prioridades en conflicto y las restricciones económicas, sociales y legales de las tecnologías al igual que su legado medioambiental.

### **2.2.1 Evaluación de un proyecto de desarrollo sostenible.**

En cuanto se aplica el concepto de desarrollo sostenible a la industria se pueden encontrar dificultades ¿Como es que esta ayuda a tener un desarrollo sostenible? Esto se logra al diferenciar 3 tipos de capitales involucrados, los cuales son el capital natural (recursos energéticos y naturales, agua potable, atmósfera, suelo y biosfera), capital financiero (instituciones, capacidad industrial, infraestructura y bienestar financiero) y capital humano (salud, educación, felicidad, experticia técnica y conocimiento). Debe existir un crecimiento positivo en las 3 capitales para que exista un desarrollo sostenible. El reconocimiento de la importancia del capital humano y natural ha estimulado actividades que disminuyen los impactos no deseados en el crecimiento económico, particularmente para disminuir el consumo de recursos, la liberación de emisiones y la inequidad social.

Cada acción realizada para llegar a un desarrollo sostenible es llamada articulación, la cual está motivada por un objetivo primario. El problema es que a veces es posible que las articulaciones entren en conflicto. Una articulación que promueve una faceta de un problema puede que agrave otra. Es decir, un objetivo primario lleva a una articulación, pero esta puede llevar a su vez a una consecuencia no intencionada e indeseable [13].

Un ejemplo de lo anterior se observa en la tabla 1. Además, debe entenderse lo siguiente: Cada articulación es motivada por un objetivo el cual generalmente tiene una escala de tiempo, costo y tamaño que se prevean para su implementación. El primer paso para la evaluación es la identificación de las articulaciones. Cada articulación requiere de interesados. Estos tienen preocupaciones que reflejan los impactos ambientales, sociales o económicos percibidos de la articulación. Si no se puede llegar a un compromiso con las partes interesadas, será difícil ejecutar la articulación de manera aceptable, comprometiendo nuevamente la sostenibilidad.

Tabla 1. Ejemplo de articulaciones en el desarrollo sostenible. Cada uno tiene un objetivo motivador. Varios además tienen consecuencias inintencionadas [13].

Objetivo primario	Articulación	Consecuencias
Reducción de la dependencia de combustibles fósiles	Biopolímeros	Competencia con la industria alimentaria
Estimular una economía de bajo carbono	Impuesto al carbono	Incremento en los precios de la electricidad
Estimular una economía basada en la circularidad de los materiales	Diseño para el reciclaje	Inhibe el uso de materiales avanzados
Responsabilidad social	Fuentes materiales éticas	Desventajas para los trabajadores de subsistencia

Los problemas en los cuales puede verse involucrada una articulación son:

- Materiales (eficiencia de la vida del material, seguridad de la cadena de suministros).
- Energía (eficiencia, seguridad de la fuente de energía).
- Ambiente (consumo de recursos, emisiones a la atmósfera, agua y suelos)
- Regulaciones (conciencia y cumplimiento de legislaciones, directivas, restricciones y acuerdos tanto nacionales como internacionales)
- Sociedad (salud, educación, empleo, equidad, prosperidad intelectual, felicidad y conocimiento)
- Economía (costo de implementación de la articulación y los beneficios que pueda proveer)

La metodología Ashby para la evaluación el desempeño de una articulación se divide en 5 pasos:

1. Definición del objetivo primario de la articulación.
2. Identificación de grupos de interés.
3. Recolección de datos y hechos.
4. Síntesis.
5. Reflexión.

En este trabajo se hará hincapié en la recolección de datos y hechos, así como en los indicadores y metodologías disponibles. Se deben de investigar los hechos y datos que otorguen información sobre los materiales y energía necesarios para que la articulación se lleve a cabo, que se relacionen con los grupos interesados y aquellos relacionados a la infraestructura esencial.

Estos datos pueden obtenerse por balances de materia y energía, análisis de ciclo de vida (LCA), ecoauditorías, manifiestos de impacto ambiental, sistemas estadísticos del país de interés, estados financieros y evaluación financiera, técnica y económica de proyectos y con normatividad como la NOM, NMX, ISO, ASTM, etc.

Esta etapa puede realizarse desde 2 puntos de vista, el Bottom-Up o el Top-Down, los cuales ponen especial énfasis en el análisis del proceso (con balances de materia y energía) y en aspectos de todo el ciclo de vida de los materiales involucrados en la articulación (usando un LCA), respectivamente. Es posible obtener información de las diferentes dimensiones ya mencionadas anteriormente. Esto puede verse con mayor detalle en la tabla 2.

Tabla 2. Fuentes de diferentes tipos de datos [13].

Dimensión	Información obtenida	Fuente
Materiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materiales involucrados</li> <li>• Existencia de un material crítico</li> <li>• Balance de materia en la cadena de suministro</li> <li>• Eficiencia del uso de materiales</li> </ul>	
Energía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético</li> <li>• Esquema de consumo energético</li> <li>• Fuentes de energía involucradas</li> <li>• Eficiencia energética</li> </ul>	LCA y auditorías
Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclo de vida de los materiales involucrados</li> <li>• Impacto ambiental de la articulación a lo largo del ciclo de vida</li> <li>• Huella de carbono de la articulación</li> </ul>	
Regulación	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudios obligatorios a realizar según la normatividad</li> <li>• Regulación en el uso, producción y disposición de materiales involucrados</li> <li>• Existencia de legislaciones que puedan afectar a la articulación</li> </ul>	NOM, NMX, etc.
Sociedad	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Creación de empleos por la implementación de la articulación</li> <li>• Creación de bienestar y equidad</li> <li>• Posibilidad de choque de la articulación con normas sociales o culturales</li> <li>• Desarrollo a la autosuficiencia y resiliencia de los individuos y comunidades involucradas</li> </ul>	Complicado de evaluar
Economía	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Balance costo beneficio de la articulación</li> <li>• Tiempo de recuperación de la inversión</li> <li>• Costos de oportunidad involucrados</li> <li>• Fuentes de financiamiento</li> </ul>	Estadística y evaluación de proyectos

La mayoría de esta información es posible obtenerla con indicadores, los cuales son una comparación entre 2 o más datos, esto otorga una medida cuantitativa o cualitativa que funciona como criterio en la toma de decisiones de quien lo analiza. Estas a su vez permiten estandarizar y comparar el desempeño de 2 decisiones tomadas (articulaciones). Además permiten medir impactos. Un ejemplo de esto puede ser el Factor de emisión o la Intensidad Energética en un proceso de arrabio.

El problema con los indicadores es que están limitados a la metodología utilizada en su construcción, entre más cualitativo es lo que desea estimarse, es más complicado construir un indicador para ello (como el capital social y humano) y su valor puede cambiar dependiendo del país, sector u organización que lo mide (en este caso, se debe medir el valor conforme al objetivo de la articulación).

Además de indicadores, es posible usar eco-atributos de un material, los cuales normalmente se relacionan a la energía incorporada o al coste energético de una parte del proceso, así como a la huella de carbono o al consumo de agua. Estos eco-atributos suelen estar representados en una dimensión por unidad de masa. Suelen tener una desviación estándar cercana al 10% y se reportan los máximos y mínimos posibles [13].

## 2.3 Ciclo de vida de los materiales

Todos los materiales que utilizamos tienen un ciclo de vida, parecido al de los seres vivos, es decir, que tienen un tiempo de vida. Una vez finalizado este tiempo, es posible que el material se convierta en un residuo sólido urbano o que se reincorpore a la cadena de producción en forma de materia prima. En cada una de las etapas del ciclo de vida existe un impacto ambiental, ya sea en forma de consumo de recursos o en forma de liberación de emisiones. Un ejemplo de dicho ciclo se puede observar en las figuras 1 y 2.

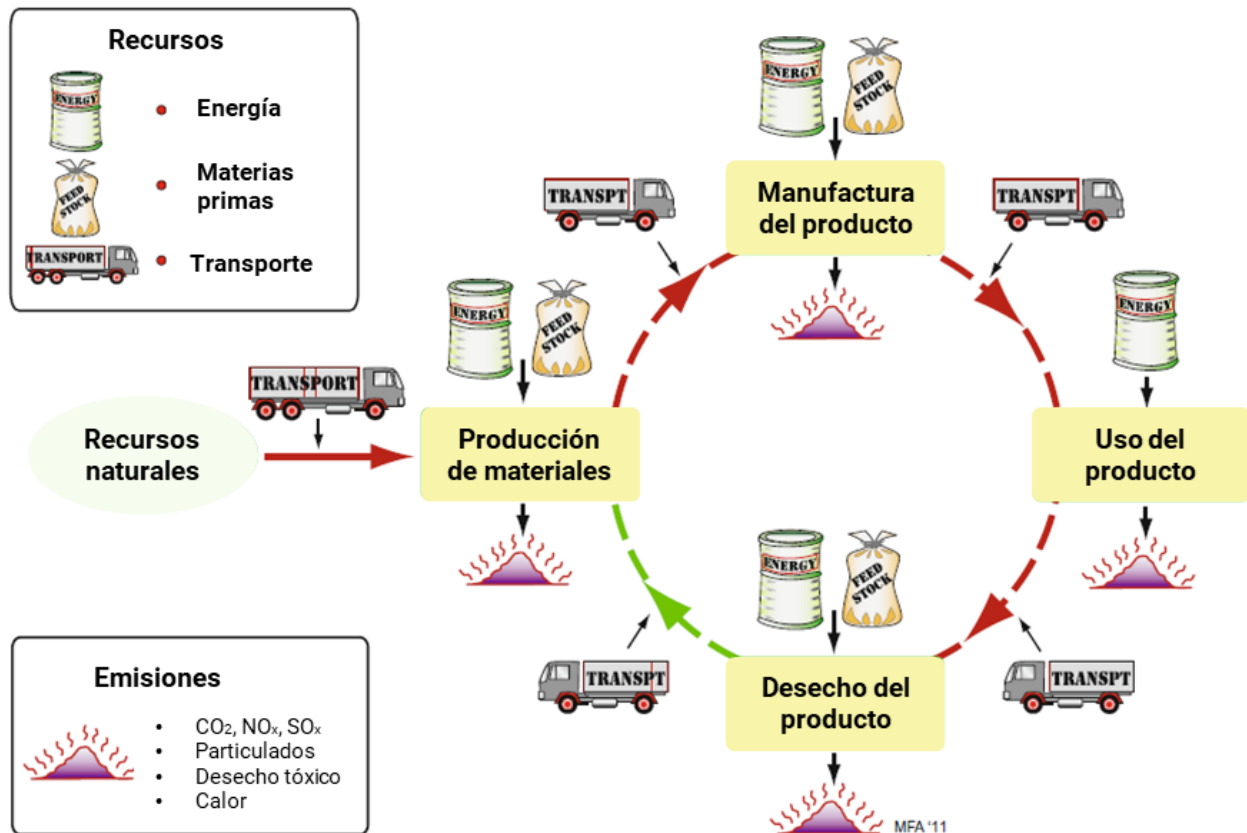


Figura 1. Ciclo de vida de un producto [14].

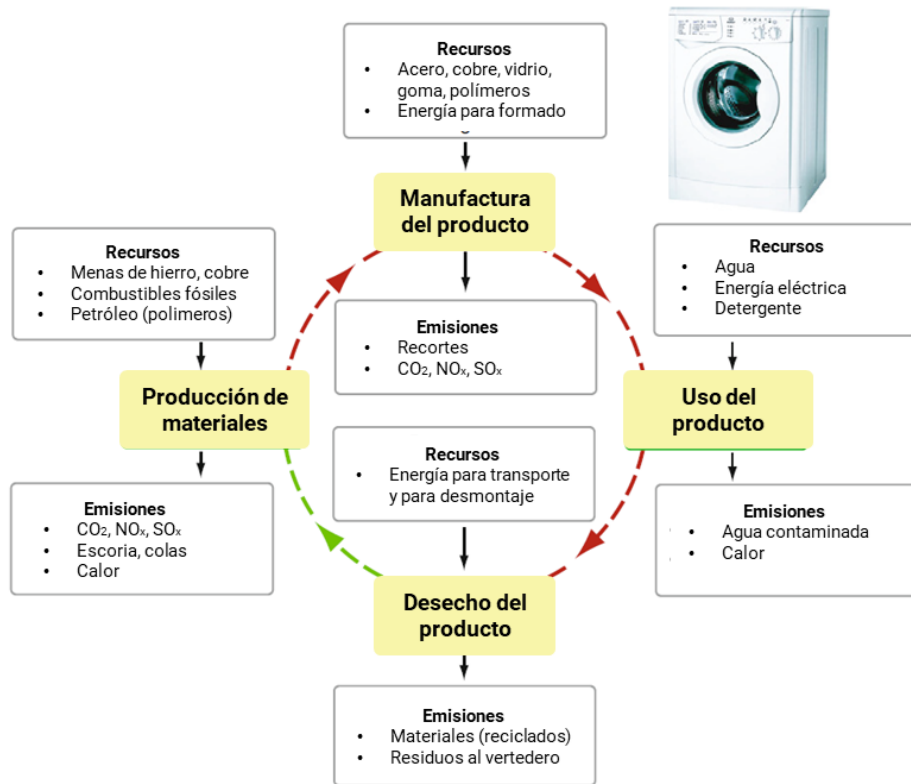


Figura 2. Ejemplo del ciclo de vida de una lavadora [14].

### 2.3.1 Fin de la vida de los materiales.

El fin del tiempo de vida puede ser de diferentes tipos:

- Física: Tiempo en el cual un producto se estropea por encima de una reparación económica.
- Funcional: Tiempo en el cual la necesidad que un producto satisface deja de existir.
- Tecnológica (obsolescencia): Tiempo en el cual los avances tecnológicos hacen a un producto inaceptablemente obsoleto.
- Económica: Tiempo en el cual los avances en diseño y tecnología ofrecen las mismas funcionalidades a un costo significativamente menor.
- Legal: Tiempo en el que nuevos estándares, directivas, legislaciones o restricciones hacen al producto ilegal.
- Deseabilidad: Tiempo en el cual cambios en las preferencias de la moda, estética o gusto hacen a un producto no atractivo.

Pasada esta vida útil, el material puede tener diferentes destinos, para los cuales cada uno de ellos redirecciona el flujo del material del ciclo de vida, pero esta vez en etapas diferentes o bien, fuera de este [14].

Los destinos que puede tener un material al final de su vida útil son:

- Basureros y vertederos
- Incineración
- Reciclaje



- Reingeniería
- Reuso

En la figura 3 se observan estos 5 posibles destinos que puede tener un material al final de su vida, así como las rutas que puede tomar para ser reincorporado a la cadena de suministros.

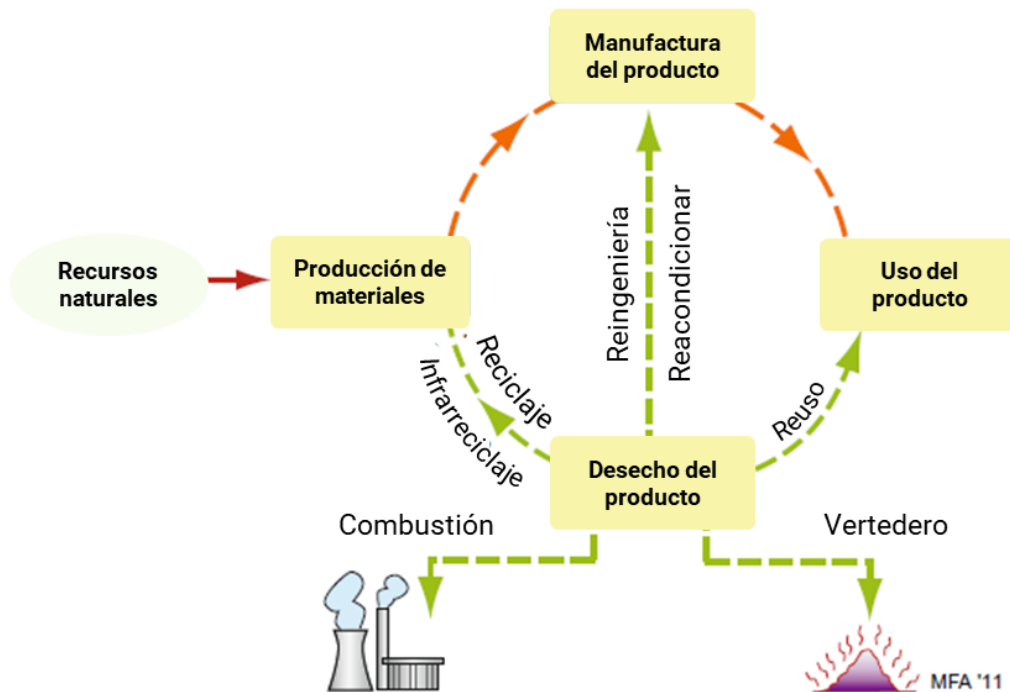


Figura 3. Diferentes destinos de un producto al final de su ciclo de vida [14].

### 2.3.2 Análisis de ciclo de vida (LCA).

Este se compone de la evaluación de algunos aspectos medioambientales de un producto a través de todo su ciclo de vida. Este además envuelve a todas las actividades que van desde la manufactura, transporte, uso y desecho. Normalmente el LCA comienza desde la extracción de la materia prima, pasa por el diseño, procesado, manufactura, embalaje, distribución, uso, reuso, reciclado y por último, desecho de un producto o materia prima, aunque todo esto depende de las fronteras que sean delimitadas al realizar el análisis.

El LCA según la ISO es la evaluación de entradas, salidas y el potencial impacto ambiental de un producto durante su tiempo de vida, con él se pueden determinar los puntos críticos del proceso de manufactura de un producto. El LCA se usa para planear estrategias ambientales, desarrollo de productos y marketing mediante la comparación con otros productos.

Junto al LCA también nace el concepto de administración del ciclo de vida (LCM), el cual es un enfoque que busca la reducción del daño medioambiental a través del LCA de un producto, sistema o servicio. De alguna manera, el LCM puede proveer un set simplificado de procedimientos propios del

LCA los cuales son apropiados para las PYMEs (pequeñas y medianas empresas). El LCM se realiza con base en la metodología descrita según la ISO 14040.

Un típico estudio de LCA consiste de los siguientes pasos:

- Definición de los objetivos y su alcance.
- Realizar el análisis del Life Cycle Inventory (LCI) aunado a la recolección de datos sobre la energía y recursos usados así como de las emisiones al medio ambiente a lo largo de todo el ciclo de vida. El LCI es la fase que envuelve la compilación y cuantificación de las entradas y salidas para un sistema dado a través de su ciclo de vida.
- Evaluación de los impactos potenciales asociados a las emisiones ambientales y a todas las formas de uso de recursos.
- Interpretar los resultados de las fases previas del estudio en relación a los objetivos de estudio.

Incluso las compañías más grandes no pueden encaminar sus industrias o mercados hacia objetivos de desarrollo sostenible sin el soporte de sus cadenas de valor. Como resultado de esto, cada vez una mayor cantidad de compañías están comenzando a exigir mejores rendimientos medioambientales a sus proveedores e incluso, el cumplir con ciertos estándares se ha convertido en un requisito indispensable para el comercio con los proveedores. Incluso una mayor cantidad de empresas están comenzando a realizar el LCA de sus propios productos.

Debe de hacerse una aclaración, el LCA no debe (o al menos no debería) usarse para decir si un determinado producto es "amigable" ambientalmente. A lo mucho es solo posible decir, que usando una serie de criterios específicos un producto es mejor que otro en ciertos aspectos de su rendimiento. Su función debe ser principalmente otorgar información al público o consumidor sobre el desempeño ambiental de un producto, comprobar que se cumple con una cierta normatividad (normalmente ISO 14001) y para evaluar el impacto al capital ambiental. Dentro del LCA es necesario incorporar todo tipo de recursos, sean renovables, no renovables, minerales, suelo, plantas, animales o agua. Es decir, que debe especificarse de donde viene la energía, por ejemplo, si un proceso requiere del calentamiento de un sistema, se debe especificar si este ha sido realizado por medio de combustibles fósiles o por electricidad, y en dado caso, especificar si esta electricidad viene de plantas nucleares, de la quema de combustibles, de plantas eólicas, etc. Esto ya que cada fuente de energía tiene diferentes características, beneficios y problemas medioambientales.

Cuando se toma al ciclo de vida de un producto como centro de enfoque, es fácil decir que resulta en una tarea muy complicada, ya que se tienen entradas medioambientalmente importantes de agua, aire y suelo en cada paso del ciclo de vida. Algunos impactos inesperados (o beneficios) pueden resultar asociados a coproductos o subproductos de algunos procesos, estos deben ser también rastreados, e incluso es posible descubrir nuevas formas de contaminación durante el análisis [15]. Todo esto es de utilidad a la hora de analizar el proceso de manufactura, así como sus emisiones y eficiencia energética del aluminio.

Los límites usados se pueden definir según sea nuestro interés, es decir, que se puede realizar tomando solamente el proceso productivo de un producto (de la puerta a la puerta) o puede

considerarse desde la extracción de las materias primas hasta el fin de la vida del producto (de la cuna a la tumba).

### 2.3.3 Aluminio en la economía circular.

El aluminio es un material circular, capaz de ser reciclado una y otra vez sin que este pierda su ligereza, conductividad, formabilidad, durabilidad, permeabilidad y reciclabilidad. Sus propiedades lo hacen un recurso vital para una economía circular y climáticamente neutra. Gracias a sus propiedades, el aluminio es capaz de impulsar a otros sectores en su búsqueda en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, especialmente la industria del transporte.

El aluminio es el material del futuro en aplicaciones de sectores clave como el embalaje, el transporte, la construcción y las energías renovables. Se espera que para el 2050 haya un crecimiento del 40% en la demanda del aluminio. El crecimiento a 2050 de cada uno de estos sectores productivos se observa en la figura 4.

Se estima además que para el 2050 el aluminio disponible para reciclar se duplique y que en zonas como la Unión Europea el aluminio reciclado constituya el 50% de su demanda total (actualmente del 36%). Este crecimiento en la demanda se debe a la sustitución de diferentes materiales (como lo son los aceros, cobre, plásticos, PVC o madera).

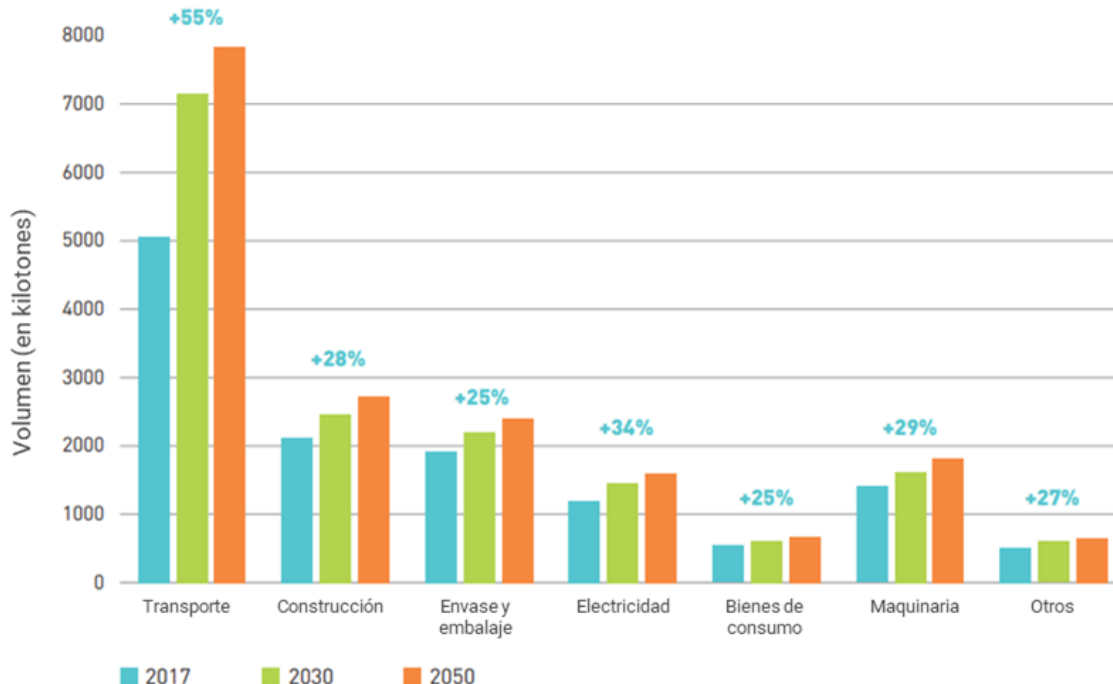


Figura 4. Demanda de aluminio semi terminado por sector en Europa [16].

Al aumentar el suministro de aluminio a la economía también se verán aumentadas las salidas del mismo debido a que los productos habrán alcanzado su máxima vida útil. El reciclado y el fin de la

vida del aluminio son importantes y los ciclos de reciclaje de este material son mucho mayores respecto a otros materiales. Ejemplos de ello se encuentran en la Unión Europea donde se recicla más del 90% del aluminio del sector automotriz y de la construcción y más del 75% de las latas de aluminio.

Aun así, la vida útil de los productos de aluminio es alta, de más o menos 50 años para la construcción y 15 años para el transporte. Esta longevidad aunada al aumento de la demanda significan que la cantidad de aluminio que está alcanzando su fin de vida y está disponible como chatarra post consumo es limitado.

La industria del aluminio además requiere, que poco a poco se vaya reduciendo la cantidad de todo tipo de chatarras generadas (tanto pre consumo como post consumo) y que el proceso de reciclado sea cada vez más eficiente y de la mayor calidad posible. Es decir, se necesita disminuir todas las salidas en forma de chatarras que el aluminio pueda tener durante su proceso productivo, así como mejorar los procesos de recolección, recuperación, clasificación y reciclado del aluminio [16].

Además de esto, el reprocesamiento ayuda en la reducción de emisiones. Se considera que el reciclado del aluminio (incluyendo su transporte) necesita menos del 5% de la energía requerida para la producción de aluminio primario, es decir, 16 [kWh/kg] de aluminio primario frente a sólo 0.4 [kWh/kg] para el aluminio secundario y posee unas emisiones de gases de efecto invernadero de solo 0.5 [kg CO<sub>2</sub>e/kg Al] [17]. La comparativa de emisiones entre diferentes fuentes de energía en la producción primaria frente al reciclado del aluminio se observa en la figura 5.

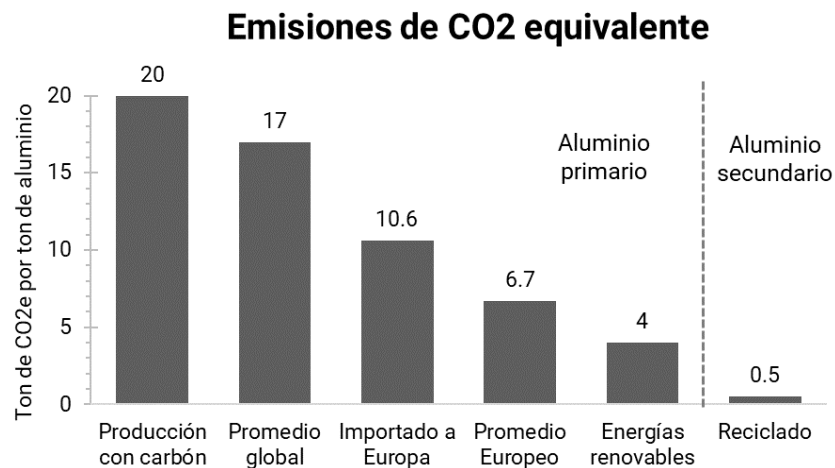


Figura 5. Emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes procesos de aluminio primario producido.

Se requiere una combinación de manejo circular de materiales que combine la implementación de un diseño para la circularidad, sistemas de recolección y clasificación mejoradas, la eliminación de barreras al mercado interno, la limitación de las exportaciones de chatarras, incentivos para soluciones y productos circulares y el reconocimiento del papel del reciclaje en la mitigación del cambio climático. Todo esto dará las condiciones idóneas para aprovechar todo el potencial del

aluminio para la circularidad. El ciclo de vida del aluminio es posible verlo de mejor manera en la figura 6.



Figura 6. Ciclo de vida del aluminio [18].

## 2.4 Aluminio.

El aluminio es un metal vital en la sociedad actual principalmente por su infinita reciclabilidad, baja densidad, durabilidad y resistencia, así como por su eficiencia energética. Este se encuentra en una gran cantidad de industrias y productos con los que convivimos día a día.

Es posible encontrarlo aleado con litio en la industria aeroespacial, en la industria alimentaria en forma de latas (siendo el material más sostenible en la actualidad en la industria de bebidas), en la industria automotriz en donde gracias a su baja densidad y alta resistencia este ofrece una mayor eficiencia y un mejor rendimiento del vehículo, además de una gran cantidad de usos más que van desde electrodomésticos, electrónica y electricidad, en la industria de la construcción y en nuevas e innovadoras tecnologías como paneles solares, baterías de ion aluminio, nanotecnología y más que se espera que ayuden a crear y hacer crecer nuevos mercados a lo largo del siglo XXI [19].

El aluminio forma parte del 8% de la corteza terrestre, esto lo convierte en el elemento químico más abundante después del silicio (28%) y el oxígeno (47%). Debido a su reactividad química, no se encuentra puro en la naturaleza y solo aparece combinado en compuestos, normalmente en forma de óxidos e hidróxidos, que a su vez se encuentran mezclados con óxidos de otro tipo de metales y sílice. En la actualidad la principal (y prácticamente única) mena de aluminio es la bauxita.

El aluminio se procesa principalmente mediante 2 rutas, la primera parte de la obtención del aluminio metálico a partir de la bauxita (obtención del aluminio primario) y la segunda a partir de las chatarras de aluminio al final de su vida útil (aluminio secundario).

En las figuras 7 y 8 se observan esquematizaciones de todos los procedimientos, materias primas y desechos que se requieren en la producción de aluminio primario y secundario.

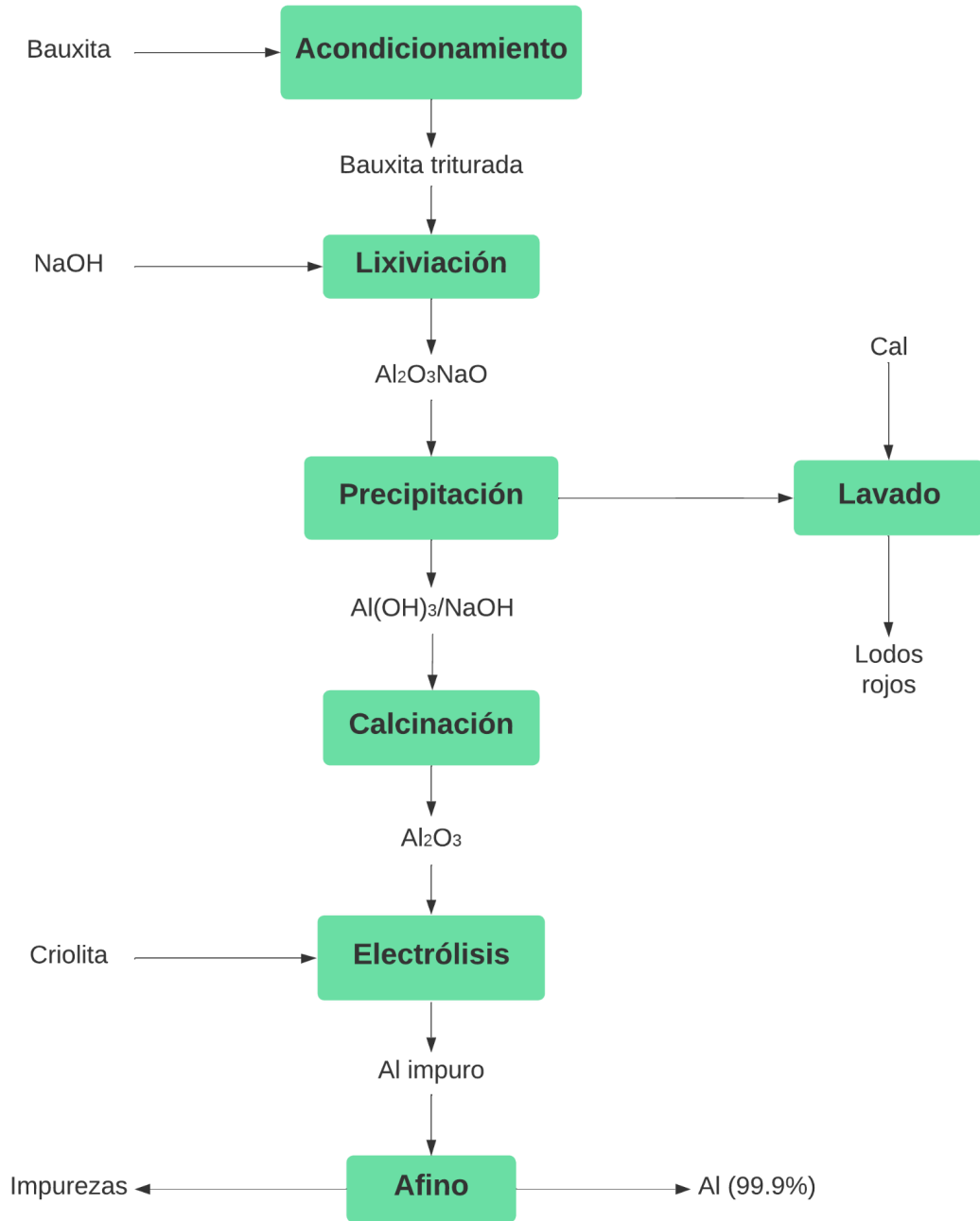


Figura 7. Proceso de obtención de aluminio primario [20].

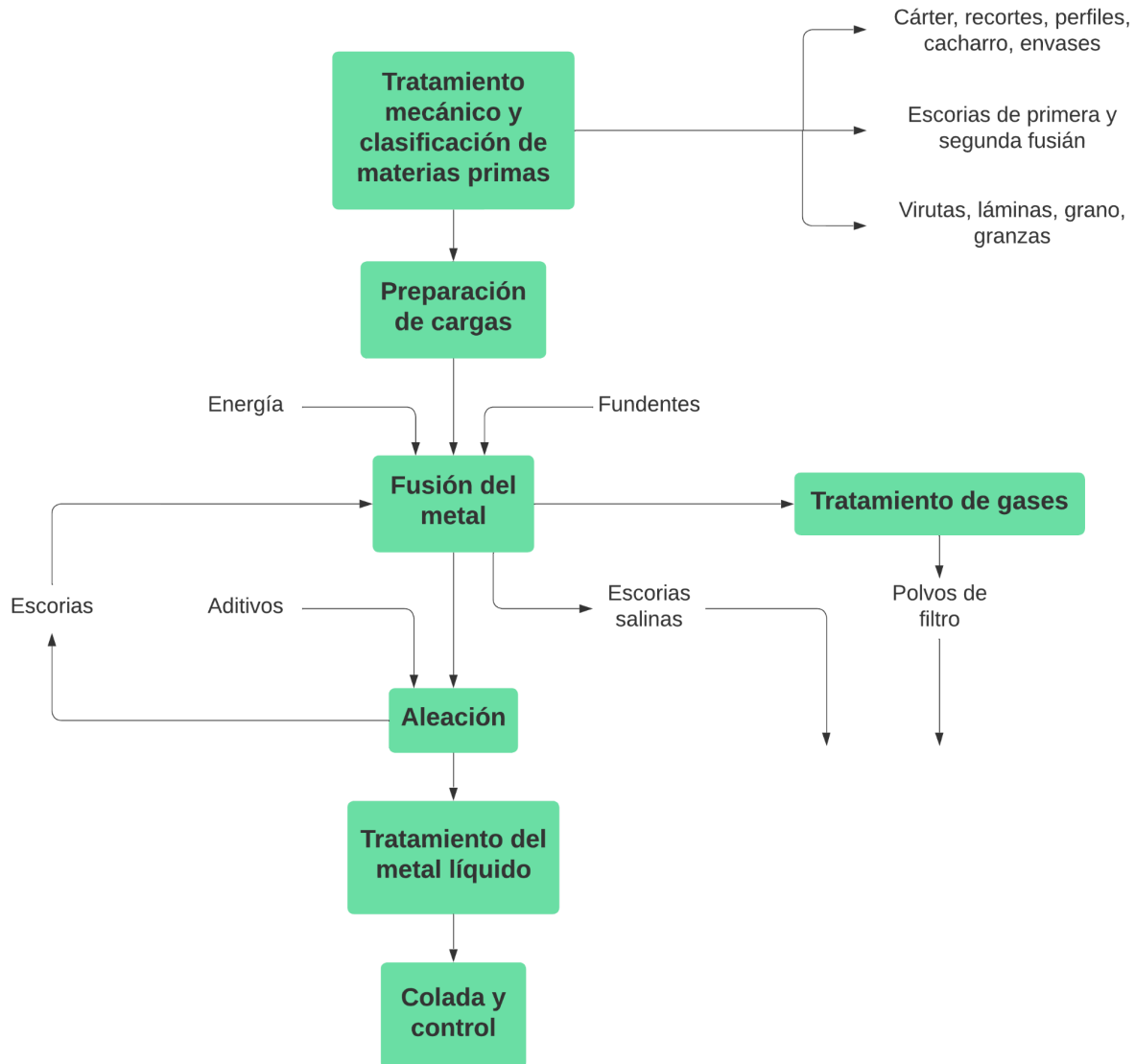
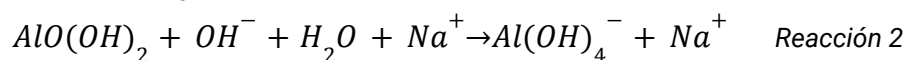
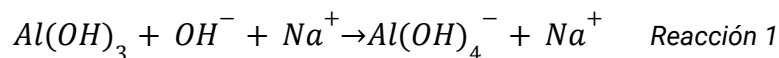


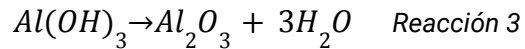
Figura 8. Proceso de obtención de aluminio secundario [20].

### 2.4.1 Proceso de obtención del aluminio primario.

La primera consiste en la extracción de la alúmina a partir de la bauxita mediante el proceso Bayer. En esta se desea aislar la alúmina (óxido de aluminio) de los minerales que la acompañan. Para ello el primer paso es triturar y moler la bauxita hasta obtener un polvo fino, el cual es posteriormente mezclado con una solución acuosa de hidróxido de sodio. Esta mezcla es posteriormente calentada a alta presión, en donde ocurren las siguientes reacciones químicas:



Los materiales no aluminicos se separan por decantación. La solución es posteriormente enfriada para cristalizar el hidróxido de aluminio formado y separarlo de la solución cáustica, la cual es recuperada para su uso posterior. Finalmente se calcina el hidróxido de aluminio a temperaturas cercanas a los 1000 [°C], para formar la alúmina. Durante este proceso se forman emisiones gaseosas que incluyen partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.



La segunda etapa consiste en la extracción del aluminio a partir de la alúmina por medio de la electrólisis. El óxido de aluminio obtenido en la fase anterior tiene un punto de fusión muy alto, cercano a los 2000 [°C], lo que hace imposible someterlo a un proceso de electrólisis. Por esto es que se mezcla la alúmina con fluoruro de sodio (criolita) la cual actúa como un fundente, esto provoca que la temperatura de fusión de esta mezcla baje hasta casi los 900 [°C].

Posteriormente se somete a electrólisis esta mezcla, sumergiendo en la cuba unos electrodos de grafito (tanto el ánodo como el cátodo están compuestos de este material). Al hacer pasar la corriente eléctrica continua a través de la mezcla se descompone la alúmina en oxígeno y en aluminio líquido. El metal fundido se deposita en el polo negativo (cátodo) del fondo de la cuba, mientras que el oxígeno se acumula en los electrodos de grafito (ánodo).

Parte del grafito que está en el baño se quema por la acción del oxígeno, transformándose en CO<sub>2</sub>. El aluminio así obtenido tiene un pureza del 99.5-99.9 [wt%], siendo el hierro y el silicio sus principales impurezas. El aluminio metálico pasa de las cubas al horno, donde es purificado mediante la adición de un fundente o se alea con otros metales para obtener aleaciones con propiedades específicas. Después se vierte en moldes o se hacen lingotes para su posterior reprocesado para la manufactura de productos terminados o semiterminados. En promedio para producir una tonelada de aluminio se necesitan 4 toneladas de bauxita y 2 toneladas de alúmina.

Las cubas utilizadas en el proceso pueden ser de 2 tipos, cubas Söderberg o cubas de ánodos precocidos.

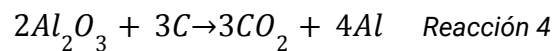
- En la cuba Söderberg el ánodo de cada cuba está formado por un bloque único, en estado de semi fusión y compuesto de pasta Söderberg (la cual es aproximadamente 70% de coque y 30% de brea). Conforme este bloque se quema con el oxígeno, es reconstituido al ser alimentado por su parte superior con la misma pasta, en forma sólida y troceada.
- En las cubas de ánodos precocidos, estos están formados por varios bloques anódicos por cuba, cuya pasta (pasta cruda) está formada por 85% de coque y 15% de brea. Este bloque es compactado por prensado y posteriormente introducido a un horno de cocción en ciclos térmicos con un tiempo de permanencia de 3 semanas a temperaturas máximas de 1200 [°C] a las cuales ocurre la coquización de la brea, dando un bloque crudo, con buena conductividad eléctrica y baja reactividad química.



La distancia existente entre ánodos y cátodos se mantiene regulada automáticamente mientras estos se van consumiendo (lo cual tarda alrededor de 4 semanas). En este momento se retiran y los desechos son reciclados para la fabricación de pasta, mientras que los hierros de sujeción son usados repetidamente.

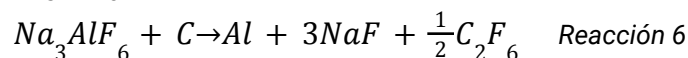
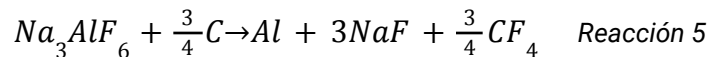
En las fábricas más modernas (que usan cubas de ánodos precocidos) la fabricación de los ánodos se realiza en instalaciones apropiadas para un correcto almacenaje y manutención de las materias primas, formación, cocción y sellados de los bloques, así como para la recuperación de desechos. Al contrario, los cátodos al tener una larga duración, no resulta rentable disponer en las fábricas de instalaciones especiales, realizándose sólo la operación del sellado para los mismos.

La reacción simplificada que ocurre en las cubas a temperatura de funcionamiento es la siguiente:



Durante el proceso de electrólisis, cuando los niveles de alúmina son bajos, ocurre un fenómeno conocido como efecto ánodo, el cual es el responsable de las emisiones de perfluorocarbonos (PFC). Esto ocurre cuando a altas temperaturas las sales fundidas de los fluoruros de aluminio se combinan con el carbono del ánodo, y da lugar a la formación de  $CF_4$  y  $C_2F_6$ . El efecto ánodo se debe principalmente a un aumento súbito de la tensión eléctrica, donde además se forman otros fluoruros, CO y  $CO_2$ . Se estima que este fenómeno ocurre entre 0.3 y 3 veces por cuba y suele durar de 2 a 20 minutos [21].

Las principales reacciones químicas de este fenómeno son las siguientes:



El metal fundido proveniente de la electrólisis es transportado de las ollas a un sistema de colada donde se adicionan retornos, recortes y chatarras. El metal líquido es transferido a un horno de mantenimiento dentro del cual se realiza el ajuste a la composición química, esta se ajusta según los parámetros exactos que desea el cliente. Esto se realiza con la adición de diferentes elementos aleantes. En el caso de las aleaciones base aluminio, las más importantes son el silicio, el cobre y el magnesio.

Cuando la composición química es la correcta, se realizan tratamientos al metal líquido, ya sea desgasificación, escorificado y filtrado, con el fin de eliminar gases disueltos y posibles inclusiones (endógenas y exógenas). Los gases utilizados en la desgasificación del aluminio suelen ser gases inertes como nitrógeno o argón.

Posteriormente el aluminio es colado ya sea en moldes electromagnéticos o por colada continua dependiendo de si se desean obtener láminas o bobinas, respectivamente. Cualquiera que sea el caso se utiliza agua para el enfriamiento de los moldes, esta agua es continuamente recirculada. Constantemente se monitorea su contenido de sólidos suspendidos, grasas, aceites e hidrocarburos y cuando el contenido permitido de estos se sobrepasa, esta agua es tratada y se introduce agua limpia al sistema.

Aun cuando en la mayoría de los casos las chatarras y recortes son recirculados para su posterior fundición, algunos fundidores eligen vender estas chatarras a recicladores independientes. Lo mismo ocurre con los refractarios y escorias, las cuales pueden ser tratadas para la recuperación de aluminio remanente en ellas.

#### **2.4.2 Proceso de obtención del aluminio secundario.**

La producción de aluminio secundario o reciclado es un conjunto de procesos que permiten utilizar productos de aluminio al final de su vida útil. El proceso se basa en refundir el metal, lo cual reduce enormemente los costes de producción, ya que se requieren cantidades de energía mucho menores que las empleadas en la ruta primaria.

Se estima que el consumo energético de las operaciones en la refinación del aluminio son aproximadamente solo el 5% de las requeridas para la producción del aluminio primario, y a su vez, se reducen enormemente las emisiones del CO<sub>2</sub>. En la mayoría de los casos durante el refundido del metal se elimina el Mg que pudiera haber en la chatarra que entra como materia prima, esto con el fin de evitar la degradación del producto terminado durante las operaciones de moldeo. En esta etapa se desea reducir el contenido de Mg de 1% (contenido habitual de las chatarras) hasta un 0.1%.

Tras este pretratamiento se procede a la fusión. Existen 2 tipos de procesos los cuales se diferencian según el tipo de horno empleado (rotativo y otros). La diferencia radica en el empleo o no de sales fundentes para la fusión de las chatarras. Mediante el empleo de sales se obtiene un mayor grado de recuperación de aluminio, ya que estas disminuyen el grado de oxidación del metal durante la fusión (los fundentes forman una capa sobre el aluminio que evita la oxidación durante la fusión), con el subsecuente aumento de la producción de escorias salinas.

Aeronaves, automóviles, bicicletas, botes, material de menaje, cables, etc., son típicamente reciclados y forman parte de la chatarra reprocesada. Habitualmente disponen de pinturas, lacados, recubrimientos, grasas, etc., que es necesario limpiar antes de introducir en el horno de la refusión para evitar problemas [21].

#### **2.5 Medio ambiente y emisiones.**

Para analizar las emisiones que tienen tanto el aluminio primario como el secundario, así como los diferentes procesos asociados a la manufactura del aluminio, se deben de definir conceptos

muy importantes, los cuales ayudarán a comprender de mejor manera cómo es que las diferentes emisiones afectan a la atmósfera.

Se debe de comprender que es un gas de efecto invernadero y porque es importante. Un gas de efecto invernadero (greenhouse gas, GHG) es un gas que calienta la tierra por medio de la absorción de energía de la radiación solar así como por la desaceleración de la velocidad a la cual esta energía puede escapar al espacio. Estos actúan como una manta aislante para la tierra. Diferentes GHGs tienen distintos efectos en el calentamiento de la tierra. Estos efectos varían según la eficiencia radiativa y el tiempo de vida de cada gas [22].

El potencial de calentamiento global (Global Warming Potential, GWP) fue desarrollado para permitir la comparación de los impactos en el calentamiento global de diferentes gases. Específicamente, es una medida de comparación de que tanta energía absorberá una tonelada de emisiones por un cierto periodo de tiempo, normalmente en 100 años. El GWP otorga una unidad de comparación para diferentes tipos de emisiones. Por definición, el CO<sub>2</sub> tiene un GWP de 1 independientemente del tiempo de vida usado, ya que es el gas de referencia [23].

Además se debe conocer qué es el CO<sub>2</sub> equivalente o CO<sub>2</sub>eq. Esta es una medida métrica usada para comparar las emisiones de diferentes gases de efecto invernadero con base en su GWP. Es decir, esta medida permite comparar el potencial de calentamiento global de un cierto gas de efecto invernadero, con otra cantidad de CO<sub>2</sub> con un índice de calentamiento global equivalente. Normalmente se expresa en millones de toneladas métricas de CO<sub>2</sub> equivalente (abreviado como MMTCDE). El CO<sub>2</sub>eq de un cierto gas se obtiene al multiplicar las toneladas liberadas a la atmósfera por su GWP asociado [24].

Como se puede ver en ambos procesos, no existe solamente una contaminación por emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, sino que existen otros tipos de contaminación como contaminación por residuos, contaminación por ruido, contaminación hídrica, etc. Un ejemplo de diferentes afecciones medioambientales existentes en los procesos de fabricación de aluminio primario y secundario se presentan en las tabla 3 y 4. Las diferentes emisiones durante estos procesos, así como su respectivo GWP y CO<sub>2</sub>eq se reportan en las tablas 5 y 6, el GPW<sub>100</sub> de diferentes gases de interés se observan en la tabla 7 y finalmente la distribución de emisiones de diferentes procesos se reportan en la figura 9.

En 2019 las emisiones totales de CO<sub>2</sub> relacionadas a la energía en la industria del aluminio alcanzaron los 663,000,000 [ton], lo cual equivale al 2% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> de dicho año en el planeta.

Tabla 3. Afecciones medioambientales en diferentes procesos de producción del aluminio primario [20].

Etapa	Problemática medioambiental	Afección
Preparación de la bauxita	C. Atmosférica	Polvo
	C. Residuos	Contiene Si, Fe, Ti, Ca y óxidos
	C. Ruido	Molesta
Lixiviación	C. Hídrica	Sólidos en suspensión
	C. Residuos	Lodo rojo (óxidos metálicos y silicato aluminico)
Precipitación y lavado	C. Hídrica	Aguas residuales
	C. Residuos	Lodos con compuestos metálicos
Calcinación	C. Atmosférica	Gases de combustión, vapor de agua y partículas
	C. Residuos	Escorias y filtros usados
Electrolisis	C. Atmosférica	Gases con fluoruros, NO <sub>x</sub> , CO <sub>x</sub> , HAP, etc.
	C. Hídrica	Aguas ácidas
	C. Residuos	Ánodos de carbono, filtros y refractarios gastados
Afino	C. Atmosférica	Polvo y gases (cloruros)
	C. Hídrica	Agua con Fe, Si, alúmina y carbones

Tabla 4. Afecciones medioambientales en diferentes procesos de producción del aluminio secundario [20].

Etapa	Problemática medioambiental	Afección
Tratamiento mecánico y separación de materiales	C. Atmosférica	Partículas y polvo
	C. Residuos	Residuos de pintura, caucho, plásticos y aceites
	C. Ruido	Molesta
Preparación de cargas	C. Atmosférica	Partículas
	C. Residuos	Restos de materias primas
	C. Ruido	Molesta (dependiendo el método)
Fusión	C. Atmosférica	Gases de combustión (NO <sub>x</sub> , CO <sub>x</sub> y partículas)
	C. Residuos	Escorias de aluminio y escorias salinas
Aleación	C. Residuos	Escorias de aluminio

Tabla 5. Emisiones de GHGs de diversos procesos de producción del aluminio [25].

Proceso	Emisiones de GHGs [kg CO <sub>2</sub> eq/kg Al]	
	Mínimo	Máximo
Producción de aluminio primario	5.92	41.10
Producción de aluminio secundario	0.32	0.74
Rolado	0.20	1.35
Extrusión	0.28	0.74
Colada del componente terminado	0.48	0.62

Tabla 6. Emisiones de dióxido de carbono, metano, tetrafluoroetano, tetrafluoroetileno y potencial de calentamiento global de varios procesos de producción de aluminio en [kg/ton de Al] [25].

Proceso	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	CF <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	GWP [kg CO <sub>2</sub> eq/ton]
Extracción	22.9	0.028	0	0	23.5
Refinación de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2682.4	4.3	0	0	3,772.7
Producción de ánodos	506.6	0.26	0	0	512.7
Reducción	12,150.8	35.7	0.35	0.035	15,497.5
Colada de lingotes	821.5	0.92	0	0	755.8

Tabla 7. Potenciales de calentamiento global de diferentes GHGs emitidos en la industria del aluminio en [ton CO<sub>2</sub>e/ton Al] [25].

GHGs	GWP <sub>100</sub>
CO <sub>2</sub>	1
CH <sub>4</sub>	25
N <sub>2</sub> O	298
SF <sub>6</sub>	22,800
HFCs	124-14,800
PFCs	7,390-12,200

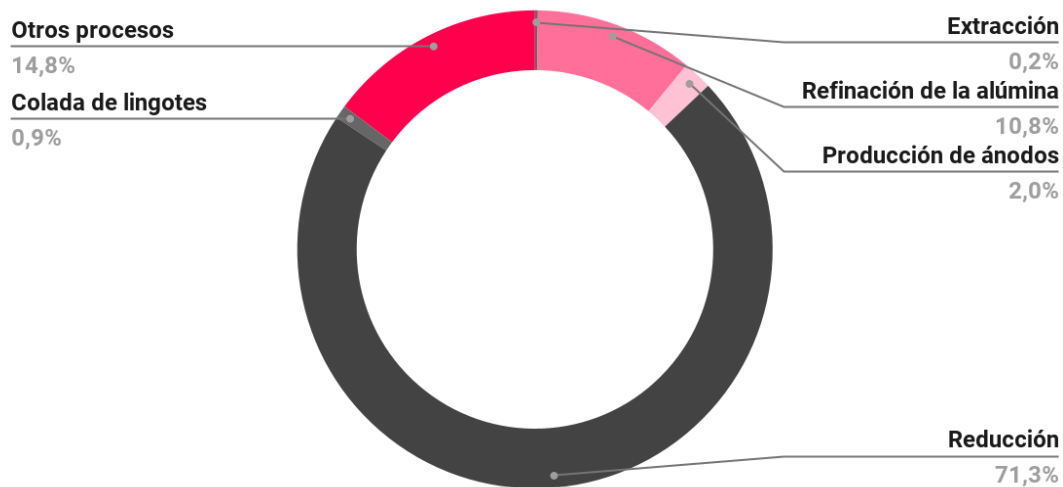


Figura 9. Contribución porcentual en las emisiones de GHGs de los principales procesos en la producción de aluminio [25].

## 2.6 Energía.

A diferencia de los datos reportados en las emisiones de la industria del aluminio, es más complicado reportar datos en el caso de la energía utilizada por unidad de masa, así como la eficiencia energética de los procesos. Estos valores cambian de región a región a nivel mundial.

La medición energética no es nada trivial, ya que requiere de la realización de balances de materia y energía, y dependiendo el enfoque que se quiere dar, estos pueden incluir sólo al

proceso de manufactura como tal, a los insumos utilizados e incluso a la energía requerida para su distribución y logística. Debido a esto los datos no suelen ser tan recientes como se podría esperar. Por otro lado, se estima que en la actualidad la mayoría de procesos para la producción del aluminio primaria varía entre los 13-17 [kWh/kg] y se espera que en los próximos años las nuevas generaciones de celdas electrolíticas logren reducir este costo energético hasta los 11 [kWh/kg] [26].

La energía requerida en la industria del aluminio y sus procesos se reporta en las siguientes tablas 8, 9 y 10.

Tabla 8. Energía total (en kWh) por tonelada de aluminio primario producido en diferentes áreas del mundo [27].

Región	Energía requerida [kWh/ton]
Norteamérica	15,583
Sudamérica	17,169
Europa	15,499
África	14,567
China	13,543
Asia	14,888
Oceanía	14,515
Consejo de Cooperación del Golfo	15,129
Mundo	14,280

Tabla 9. Energía total (en kWh) por tonelada de alúmina producida en diferentes áreas del mundo [28].

Región	Energía requerida [kWh/ton]
Norteamérica	2,879
Sudamérica	2,299
Europa	3,808
África y Asia	3,126
China	2,875
Oceanía	2,904
Mundo	2,923

Tabla 10. Consumo aproximado de energía eléctrica en 2007 de toda la cadena de producción del aluminio en la Unión Europea [29].

Actividad	Consumo energético específico [kWh/ton]	
	Mínimo	Máximo
Refinación de la alúmina	225	260
Producción de ánodos prehornados	120	190
Producción primaria	14,000	16,000
Colada primaria	50	200
Producción secundaria	120	340
Refinación secundaria	-	-
Operaciones de rolado	70	900
Operaciones de extruido	300	1,200

## 2.7 Mercado global.

Cabe mencionar que no solamente los criterios energéticos son importantes, también deben de considerarse los aspectos económicos que rodean al aluminio. Aunque hay que aclarar que es muy difícil hacer una comparación de costos en cuanto al aluminio primario y secundario (ya que en general su precio también se ve afectado por el nivel de pureza y los elementos aleantes de la aleación, así como las fluctuaciones que haya en los mercados financieros).

Lo que sí es posible medir es el impacto económico que esta industria posee. El mercado del aluminio se estima que alcanzó los \$164,230 millones de dólares al año 2019 y se proyecta que crezca hasta los \$242,440 millones para el año 2027, con un crecimiento anual del 5%.

A continuación se presentan las figuras 10-17 y tablas 11-13 que describen el comportamiento del mercado global de los productos de aluminio, desde la bauxita y la alúmina, pasando por los productos terminados de aluminio hasta los desechos y desperdicios del mismo, así como el valor de cada uno y los principales países productores en el mundo.

### Mercado del aluminio por uso final

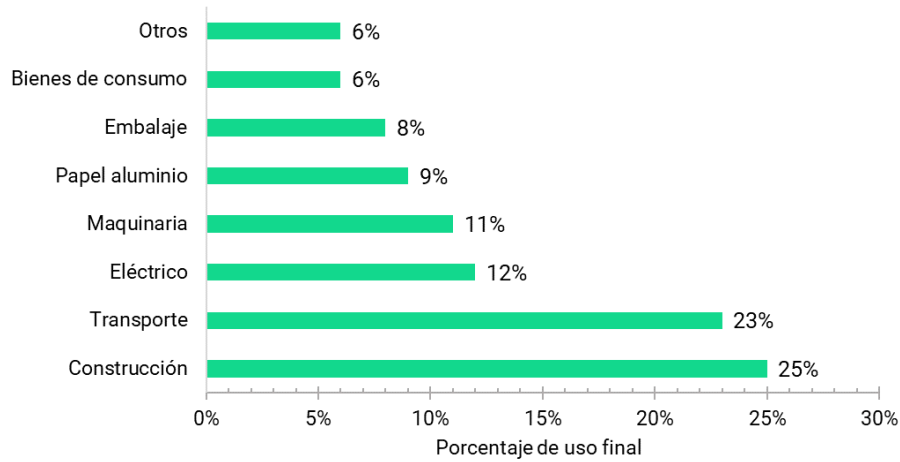


Figura 10. Mercado del aluminio por porcentaje de uso final en el año 2020 [30].

### Principales exportadores de productos de aluminio en 2020



Figura 11. Principales exportadores de aluminio y productos de aluminio en 2020, por país (en miles de millones de dólares) [31].



Tabla 11. Producción mundial de bauxita por país en 2020 [32].

Ranking	País	Miles de toneladas	Total [wt%]
1	Australia	110,000	29.6
2	Guinea	82,000	22.1
3	China	60,000	16.2
4	Brasil	35,000	9.4
5	Indonesia	23,000	6.2
6	India	22,000	5.9
7	Jamaica	7,700	2.1
8	Rusia	6,100	1.6
	Resto del mundo	25,300	6.7
Total		371,100	100.00

Tabla 12. Producción mundial de alúmina por país en 2020 [32].

Ranking	País	Miles de toneladas	Total [wt%]
1	China	74,000	54.1
2	Australia	21,000	15.4
3	Brasil	9,600	7.0
4	India	6,700	4.9
5	Rusia	2,800	2.0
6	Arabia Saudita	1,800	1.3
7	Jamaica	1,700	1.2
8	Canadá	1,500	1.1
9	USA	1,300	1.0
	Resto del mundo	16,360	12.0
Total		136,760	100.00

Tabla 13. Producción mundial de aluminio primario por país en 2020 [32].

Ranking	País	Miles de toneladas	Total [wt%]
1	China	37,000	56.7
2	India	3,600	5.5
3	Rusia	3,600	5.5
4	Canadá	3,118	4.8
5	EAU	2,670	4.0
6	Australia	1,600	2.5
7	Bahréin	1,500	2.3
8	Noruega	1,400	2.1
9	USA	1,400	1.7
10	Islandia	840	1.3
	Resto del mundo	9,000	13.8
Total		65,258	100.00

Por otro lado, la demanda mundial de aluminio se estima que fue de 64 millones de toneladas en el año 2020. Entre 2015-2020 la demanda anual de aluminio creció en promedio un 2.4% anual. En este sentido, el mayor consumidor de aluminio del mundo fue China, el cual representó cerca del 60% de la demanda mundial de aluminio primario.

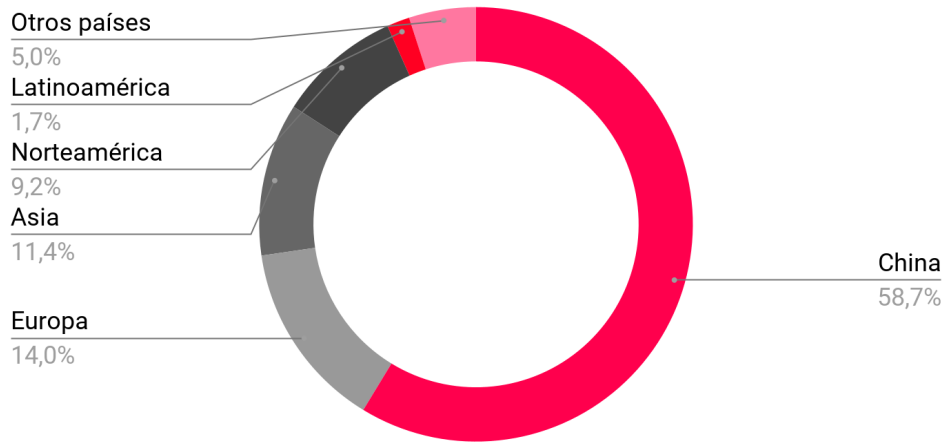


Figura 12. Demanda mundial de aluminio en 2020 [32].



Figura 13. Precio promedio del aluminio en [USD/ton] durante el 2010-2020 [32].

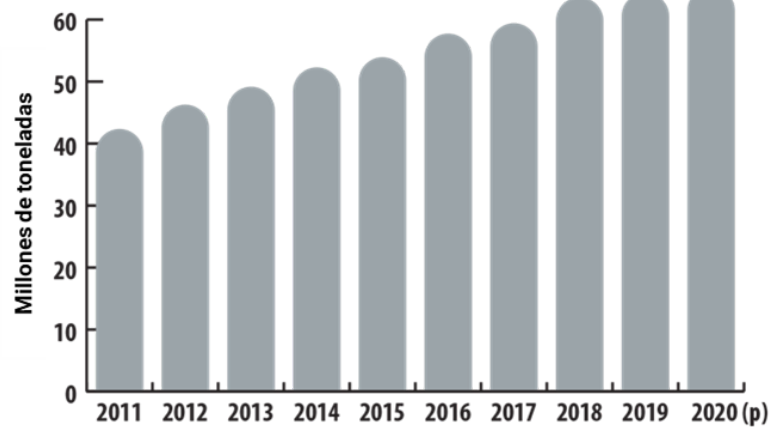


Figura 14. Crecimiento de la producción mundial de aluminio primario en millones de toneladas. Se observa un crecimiento de 42.4 en 2011 a 65.3 en 2020 [32].

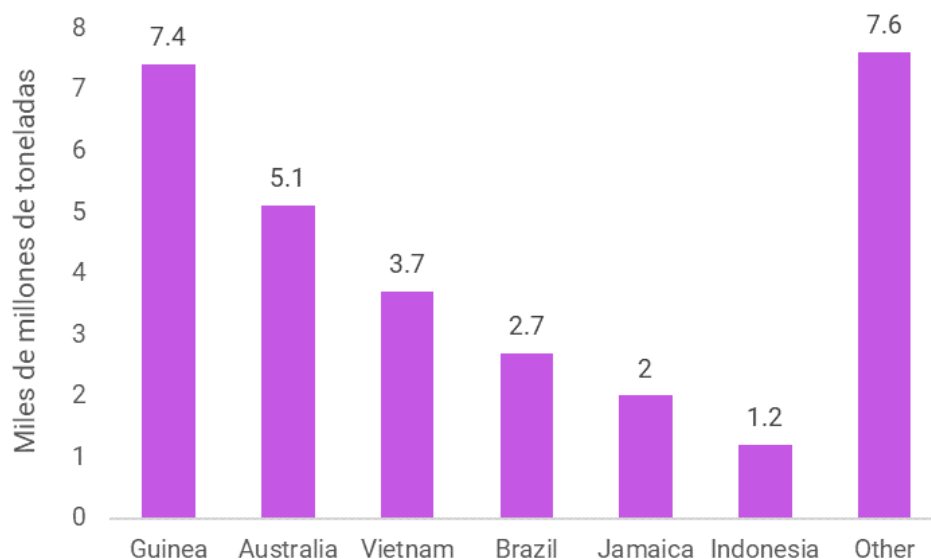


Figura 15. Reservas mundiales de bauxita en 2020 [32].

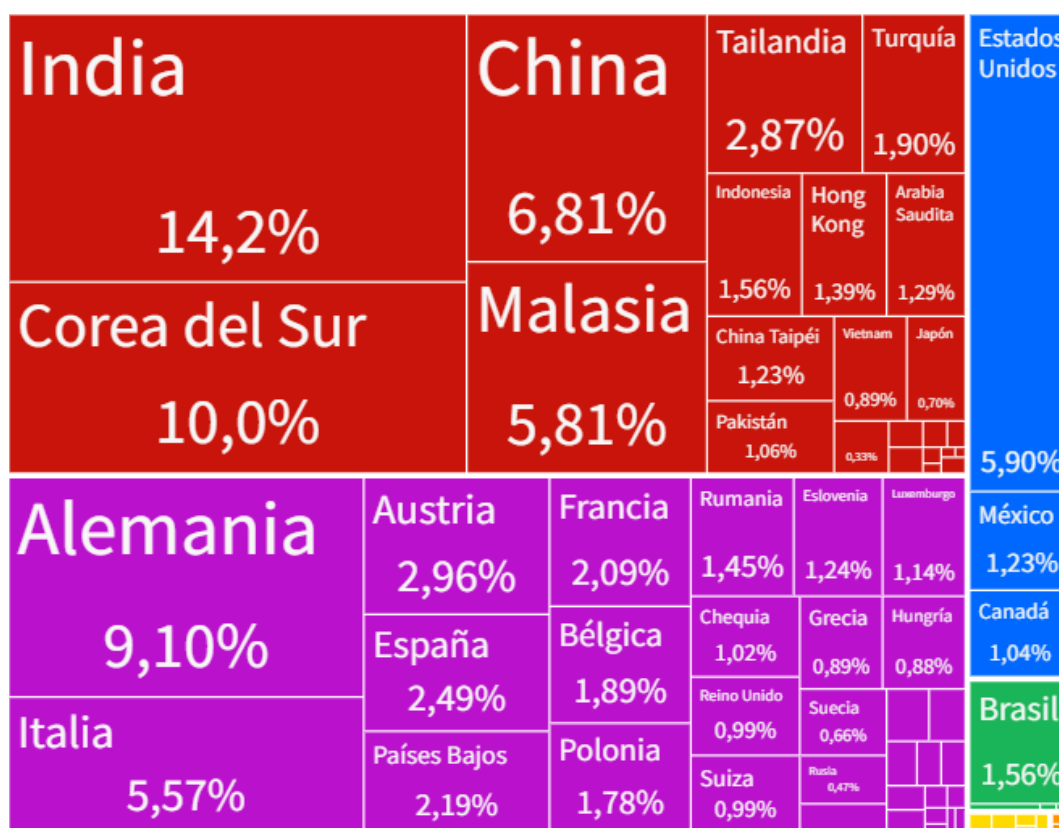


Figura 16. Importadores de desperdicios y desechos de aluminio en 2020. Mercado valuado en 11,200 millones de dólares [33].

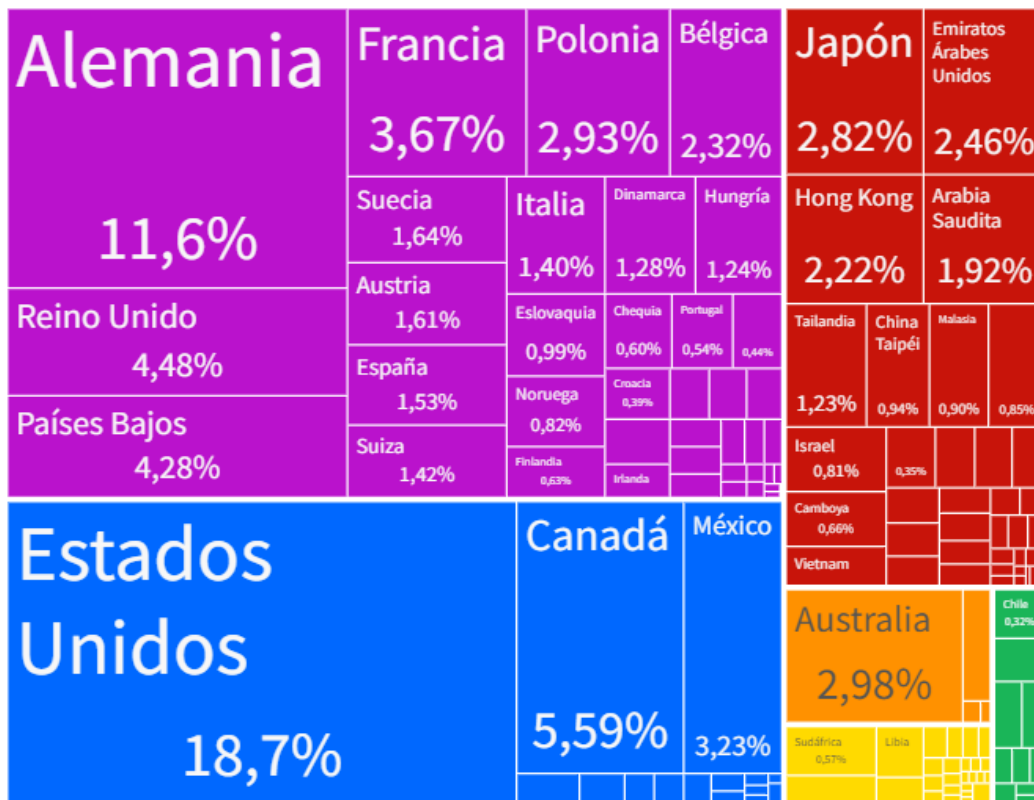


Figura 17. Exportadores de desperdicios y desechos de aluminio en 2020. Mercado valuado en 11,200 millones de dólares [33].

## 2.8 Mercado nacional.

El aluminio es el segundo metal más importante en la industria metalúrgica y aunque México es el principal productor de una gran cantidad de metales y minerales (plata, oro, plomo, molibdeno, zinc, selenio, cobre, barita, cadmio, etc), su producción de aluminio es escasa, ni siquiera es de los principales 30 productores de este metal en el mundo. México es un país que no tiene yacimientos relevantes de bauxita y por consiguiente no tiene ninguna planta productora de alúmina en su territorio, lo cual lleva a que el país no sea capaz de producir suficiente aluminio para cubrir su propia demanda.

Como resultado, la producción de aluminio primario en México es despreciable, esto se ve empeorado con falta de exploraciones o descubrimientos de nuevos yacimientos de bauxita en las últimas décadas. Esto hace que la industria nacional cubra su demanda por la importación y por una importante industria basada en el reciclado del aluminio (donde se reciclan productos que van desde la industria de la construcción, la automotriz y la industria del envase y embalaje). Estas importaciones de chatarras de aluminio vienen de 9 países, principalmente de USA. Se estima que estas importaciones fueron de 55,506 [ton] en el 2016.

En los últimos 5 años esta industria ha ido creciendo un 25% en el país, registrando un récord de producción de 645,000 [ton] durante el año 2018, siendo la principal industria responsable de esto la automotriz. De la producción total, el 60.2% corresponde a lingotes, un 32.2% a perfiles,

el 6.4% a la producción de papel aluminio y los productos laminados a solamente un 1.3%. Todo esto corresponde al 1.6% de la producción global.

Con todo esto, es de esperar que México importe una gran cantidad de aluminio. Tan solo en el año 2017 estas importaciones tuvieron un valor total de \$2,540 millones de dólares, las más grandes de cualquier otro producto mineral, superando a metales industriales, minerales y metales preciosos. Para ponerlo en perspectiva, es importante hacer ciertas comparaciones:

- El aluminio representa el 30.5% de todas las importaciones de metales de México (incluyendo metales preciosos e industriales). Un mercado con un tamaño estimado de \$8,330 millones de dólares en 2017.
- Estas importaciones exceden en valor las importaciones de todos los minerales no metálicos (valuado en \$2,450 millones de dólares) y octuplica las importaciones de los metales preciosos como oro, plata y platino (valuados en \$318 millones de dólares).
- Las importaciones de aluminio son 2 veces más grandes que las importaciones de acero del país.
- La industria entera del aluminio aporta más de \$7,000 millones de dólares al PIB del país, así como más de 120,000 puestos de trabajo.
- Se estima además que el 97% de todas las latas de aluminio en México son recicladas, de las cuales el 50% del mismo es exportado a USA y otros países [34].

Los principales recicladores de aluminio son Almexa en el Estado de México, Almetek en Coahuila, Arzyz en Nuevo Leon, Alretech en Hidalgo, Alucal en Veracruz, Aluminicaste en Guanajuato y muchas otras que son miembros del IMEDAL (Instituto Mexicano del Aluminio).

La industria automotriz es el principal impulsor de la industria de aluminio en México seguido por las industrias de la construcción y el envase y embalaje, siendo Cuprum, Nemak y Grupo Vasconia las más importantes en esta rama [35].

Las exportaciones del aluminio son mucho menos significativas, con una cantidad de \$925.5 millones de dólares en 2017, corresponden solamente al 5.3% de las exportaciones totales de México de metales y minerales. En comparación, las exportaciones de otros metales son mucho más importantes para el país, entre estos se encuentran el oro (5 veces más grandes), la plata (3 veces más grandes), el cobre (3 veces más grandes), el plomo (2 veces más grandes) y el zinc (1.5 veces más grandes) en el mismo periodo de tiempo.

México sufre de un déficit crónico de aluminio debido a su baja actividad minera con la bauxita y la alúmina, lo que además provoca que el país deba basar su industria en gran medida en las importaciones. Esto último representa una gran área de oportunidad para una gran cantidad de productos de aluminio, incluyendo a aquellos usados en la industria automotriz y de la construcción.

## 2.9 Aluminio verde.

La producción de aluminio requiere de una gran cantidad de energía, la fuente de la misma determina a su vez la cantidad de emisiones que se liberarán en el proceso. Mientras que la electricidad obtenida por quema de carbono es la menos eficiente fuente de energía (respecto a emisiones de carbono) la eólica, solar o hidroeléctrica por el contrario poseen huellas de carbono prácticamente neutras.

Esto último es vital en la construcción de una industria de aluminio basada en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero [36]. En la figura 18 se observa la diferencia de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente por [MWh] producido en función de la distribución de la fuente de poder utilizada.

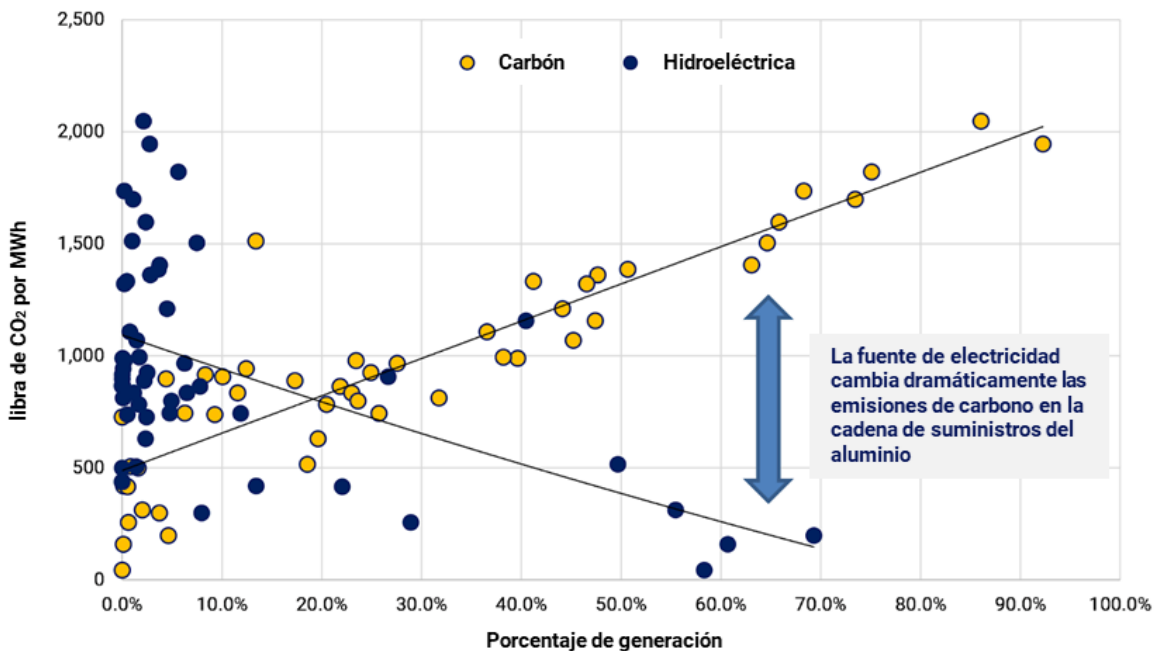


Figura 18. Emisiones de plantas de energía de USA en [lb CO<sub>2</sub>/MWh] respecto a la distribución de fuente de poder utilizada [36].

Se considera que la fuente de donde se genere la electricidad, puede cambiar drásticamente las emisiones de carbono a lo largo de toda la cadena de suministros del aluminio. En general el aluminio verde puede considerarse como aquel aluminio primario producido por medio de fuentes de energía con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, a la atmósfera. Normalmente la cantidad máxima de emisiones que un aluminio puede tener para ser considerado como verde es de 4 [ton CO<sub>2</sub>eq/ton Al]. Esta cantidad puede llegar hasta las 2 [ton CO<sub>2</sub>eq/ton Al] en producciones realizadas con energía hidroeléctrica.

Es importante mencionar que la producción de aluminio verde no solo se basa en utilizar energías renovables y ya (no es algo tan simple), sino que existen iniciativas que diversas empresas consideran que deben tomarse en cuenta para que la producción de aluminio pueda ser más verde y mucho más sostenible:

- La reducción de emisiones mediante la innovación en la producción de ánodos para la producción de aluminio primario, así como el cambio a fuentes de energía con menores emisiones de carbono.
- Creación de marcas “low-carbon” para productos de aluminio. Con esto se ayudará a las industrias a alcanzar sus objetivos respecto a la reducción de emisiones, al mismo tiempo que se contribuye a una divulgación climática más transparente.
- Transparencia en la huella de carbono. La información acerca de la huella de carbono, certificaciones ASI y el uso de energías renovables empodera a los consumidores a tomar mejores y más informadas decisiones acerca de los materiales que eligen para sus procesos productivos.
- Circularidad. Para 2050 el International Aluminum Institute espera que la demanda de aluminio exceda las 150 millones de toneladas, hoy en día esta demanda es de 60 millones. El 75% de la demanda actual la cubre el aluminio primario y corresponde al 90% de las emisiones de esta industria. El reciclado puede impulsar la eficiencia de recursos y la reducción de emisiones. Adicionalmente, el enfoque de los esfuerzos de la industria entera hacia la circularidad debe centrarse no solo en el reciclaje, sino también en la reducción de la cantidad de desperdicios generados en la industria del aluminio, asegurando así un crecimiento de producción desvinculado a un mayor uso de recursos.
- Etiquetado para sostenibilidad. Las empresas deben ser parte de varios procesos de certificación ambiental, con un involucramiento en nuevos esfuerzos para desarrollar etiquetas de sostenibilidad, que permitan compras éticas e incentiven la transformación de la industria. Dicho esfuerzo de etiquetado debería incluir una mayor ecologización del propio reciclaje de aluminio, por ejemplo, mediante el aumento de la tasa y la eficiencia de recolección y refundición de chatarras.
- Liberalización del mercado del aluminio primario de bajo carbono. El acceso asequible a materias primas de bajo carbono es una pieza clave para la industria manufacturera. Esta liberalización debe incluir la eliminación de tarifas de importación de estos commodities, esto es clave para una mayor competitividad y sostenibilidad en toda la cadena de valor del aluminio.
- Eliminación del exceso de capacidad para asegurar el comercio verde y justo. El exceso de capacidad es la condición que ocurre cuando la demanda de un producto es menor a la posible oferta que una empresa podría potencialmente suplir al mercado. Cuando una empresa tiene una producción menor para la cual se diseñó, se crea el exceso de capacidad. Esta daña la sustentabilidad y lleva a un uso excesivo de recursos y energía creando emisiones que podrían evitarse. Este además distorsiona los mercados y el comercio, ya que, frecuentemente resulta de prácticas de comercio injustas e involucra el soporte por medio del estado.

- Facilitar el desarrollo e investigación. Incentivos en la industria para la colaboración en investigación y desarrollo podría impulsar las tecnologías de bajo carbono y la transición circular.
- Apoyo al multilateralismo. Un crecimiento económico justo y desvinculado a un mayor uso de recursos, la resiliencia sanitaria y el combate al cambio climático, son elementos intrínsecos para una agenda de desarrollo sostenible interconectada. Se debe promover un sistema global robusto basado en la responsabilidad compartida y solidaridad [37].

### 2.9.1 Aluminio verde en el futuro.

Debido al interés de las empresas de consumir aluminio verde, poco a poco se ve la posibilidad de la bifurcación del mercado del aluminio. Independientemente de que haya un mercado organizado para el mismo, existe un gran interés en el aluminio verde. Ejemplo de esto es la empresa Anheuser-Busch que está trabajando con el gigante del aluminio Rio Tinto para asegurar un suministro enorme de aluminio verde. Rio Tinto a su vez logra esto utilizando energía hidroeléctrica en sus plantas productoras en Canadá. Por otro lado Anheuser-Busch, la cervecera más grande del mundo comenzará a etiquetar su Michelob Ultra con un estampado de bajo carbono. Sus nuevas latas reducirán sus emisiones de carbono en un 30% por lata.

Además, los principales productores de aluminio como Rusal están presionando para que se acepte el green premium para garantizar que el metal se produzca con energías renovables y con una menor emisión de CO<sub>2</sub>eq. Aunado a esto, tanto gobiernos como entidades privadas están invirtiendo una gran cantidad de recursos en cambiar a un uso de energía eléctrica.

El interés en el uso de materias primas más sostenibles no está solamente en las empresas manufactureras, sino también en aquellas dedicadas a la venta de productos terminados. Empresas como Walmart, Home Depot y General Motors están haciendo esfuerzos para tener productos más sostenibles, donde se use energía renovable y tenga bajas emisiones de carbono, al mismo tiempo que están presionando a que sus proveedores tengan procesos más sostenibles.

La certificación del aluminio verde daría pie a la comercialización de un mismo commodity (aluminio), con las mismas especificaciones pero por un proceso de obtención diferente, y a su vez, un diferente precio. Esto acarrea la necesidad de que los proveedores verifiquen las emisiones asociadas al aluminio y una serie de problemas más:

- En primer lugar, se debe de tener un estándar calculado de lo que se considera “verde” o “de bajo carbono” ya que el cálculo del impacto podría considerarse a lo largo de toda la cadena de suministros (considerando además la extracción de bauxita y la producción de alúmina). Esta sería la más completa, pero también más complicada.
- En segundo lugar, las empresas que ya cuentan con producción de aluminio verde no desearían la mayor competencia que vendría con la estandarización.



- En tercer lugar, un contrato de aluminio de bajo carbono podría no encontrar liquidez suficiente para ser útil.

Además existen problemas en cuanto a los precios que este tendría, ya que la posibilidad de que 2 grados de un metal con especificaciones idénticas tengan precios diferentes, añade una complejidad en cuanto a cómo se debe manejar el riesgo en los precios [36].

## 2.9.2 Etiquetado y estandarización.

Rio Tinto es una empresa líder en la producción responsable de aluminio. A lo largo de sus operaciones posee un 60% menos emisiones que el promedio de empresas dentro de la industria del aluminio. En 2016 se lanzó RenewAL, el primer aluminio primario certificado en poseer bajas emisiones de CO<sub>2</sub>. Rio Tinto es pionera en la formación de estándares sobre producción responsable para la industria mundial del aluminio. Es miembro fundador del Aluminium Stewardship Initiative (ASI), una iniciativa para la colaboración en el desarrollo de soluciones responsables en la producción de aluminio, con la cual lanzó al mercado el primer aluminio ASI del mundo en 2018. Finalmente, junto con Alcoa ha lanzado ELYSIS Joint Venture, con la cual pretende desarrollar una tecnología revolucionaria para el proceso de producción de aluminio, libre de emisiones de gases de efecto invernadero [38]. A su vez, Rio Tinto ha comenzado a desarrollar un nuevo estándar en cuanto a transparencia y trazabilidad para la industria del aluminio llamado START, una “etiqueta nutricional” para el aluminio responsable.

START ayudará a satisfacer la demanda de los consumidores de una mayor transparencia y proporciona información detallada de cómo es que los productos han sido manufacturados. Este estándar pretende empoderar a los usuarios finales, para que tomen decisiones informadas acerca de los productos que consumen, permitiéndoles contribuir a un futuro sostenible y a diferenciar productos finales por sus credenciales sociales y medioambientales.

Los clientes recibirán una etiqueta digital de sostenibilidad (similar a una etiqueta nutricional que se podría encontrar en alimentos o bebidas enlatadas), en forma de código QR basado en tecnología black chain. Esta proveerá información clave acerca del sitio donde el aluminio fue producido de manera responsable abarcando 10 principales criterios:

- Huella de carbono
- Huella hídrica
- Contenido de aluminio reciclado
- Fuentes de energía
- Inversión comunitaria
- Rendimiento en la seguridad
- Diversidad de liderazgo
- Integridad del negocio
- Cumplimiento normativo
- Transparencia

Un ejemplo de la etiqueta de sostenibilidad digital se observa en las figuras 19 y 20. Este nuevo estándar ya está disponible para todos aquellos productos fabricados, a partir de aluminio procesado por Rio Tinto [39].

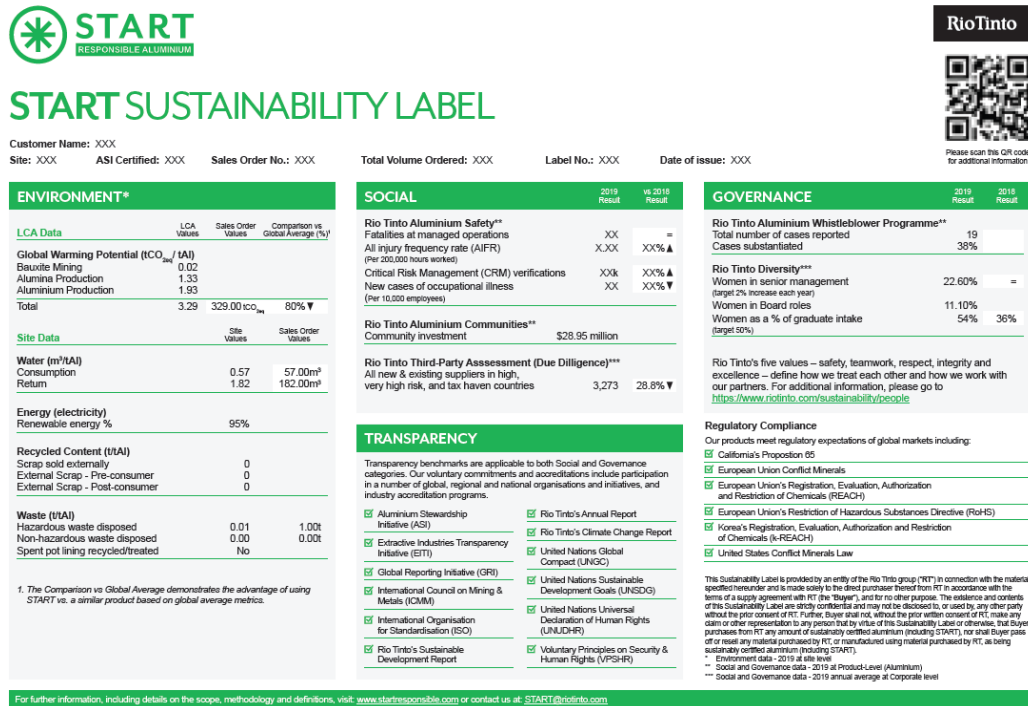


Figura 19. START Sustainability Label. Es la etiqueta nutricional de los productos de Rio Tinto [39].

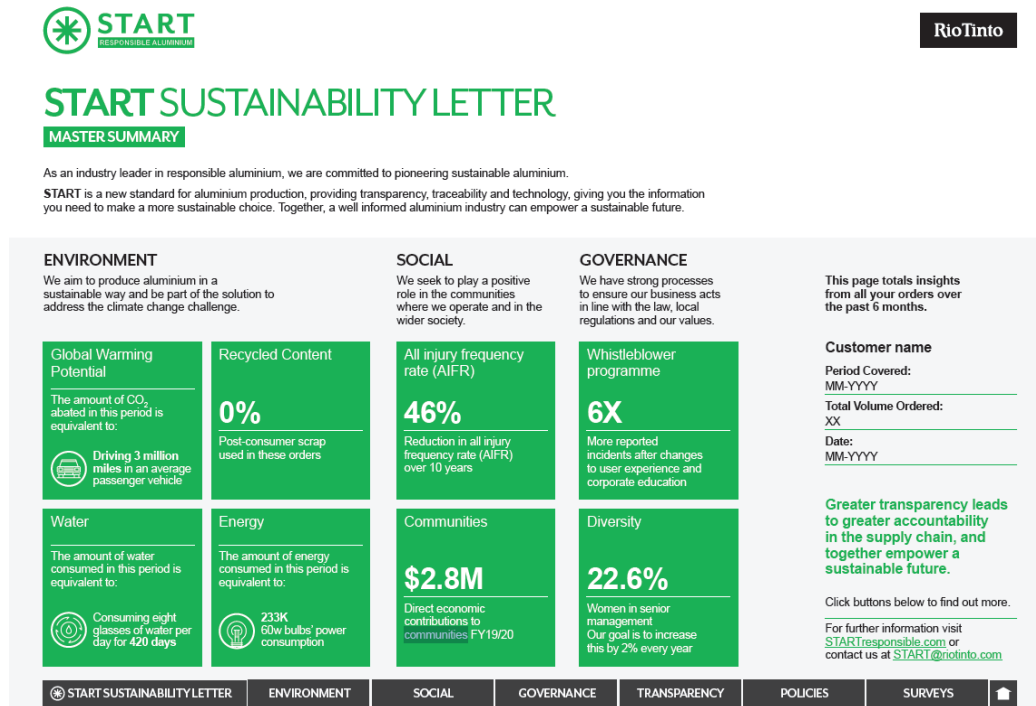


Figura 20. START Sustainability Letter, resumen de los beneficios de START Responsible Aluminium frente a otras alternativas. [39].

## Capítulo 3, Resultados y discusión.

### 3.1 Planteamiento.

Los datos presentados a continuación corresponden al Life Cycle Inventory (LCI) realizado por el International Aluminium Institute (IAI) en el 2015. Debido a la complejidad que resulta la realización del LCA para un producto terminado, solo se plasman y analizan los resultados correspondientes al LCI de los procesos involucrados en la manufactura de lingotes de aluminio primario.

Las fronteras del sistema analizado fueron de la cuna a la puerta, lo cual significa que el análisis se realizó considerando desde la extracción de los recursos requeridos, hasta el fin de la manufactura del producto. El presente reporte además contempla los datos obtenidos para diferentes regiones del mundo.

Con el fin de que el análisis sea lo más general posible, se presentan solamente los datos correspondientes al análisis global y el de Sudamérica (en esta región es donde se engloba a México, junto a Brasil, Surinam y Argentina), esto con el fin de poder realizar una comparación aproximada a la industria, de la región de interés contra el promedio global.

Por último, la unidad de verificación (aquella unidad con la cual se comparan todos los aspectos e impactos ambientales reportados) es de 1,000 [kg] de producto en cada uno de los procesos unitarios, mientras que en el sistema entero es de 1,000 [kg] de lingote de aluminio primario.

### 3.2 Generalidades.

Los datos reportados se dividen en los 5 principales procesos unitarios:

1. Extracción de bauxita.
2. Producción de alúmina (a partir de la bauxita).
3. Producción de ánodos (incluyendo la producción de ánodos prehornados y pasta Söderberg).
4. Electrólisis (incluyen a tecnologías de prehornado y Soderberg)
5. Colada de lingotes (no hay diferencia entre las dimensiones específicas de los mismos).

Los datos reportados para la electrólisis y la producción de ánodos se encuentran divididos en función del uso de ánodos prehornados (P) o pasta Söderberg (S). La electricidad es una entrada significativa en el proceso productivo del aluminio, por lo cual es importante detallar de dónde viene la electricidad usada en esta industria. En la figura 21 y 22 se observan las principales fuentes de energía, utilizadas para la generación de electricidad en la industria del aluminio, mientras que la figura 23 muestra cómo ha aumentado el consumo de electricidad, así como qué tipo de fuentes son las más utilizadas a través de los años.

Distribución de uso de fuente de poder a nivel global

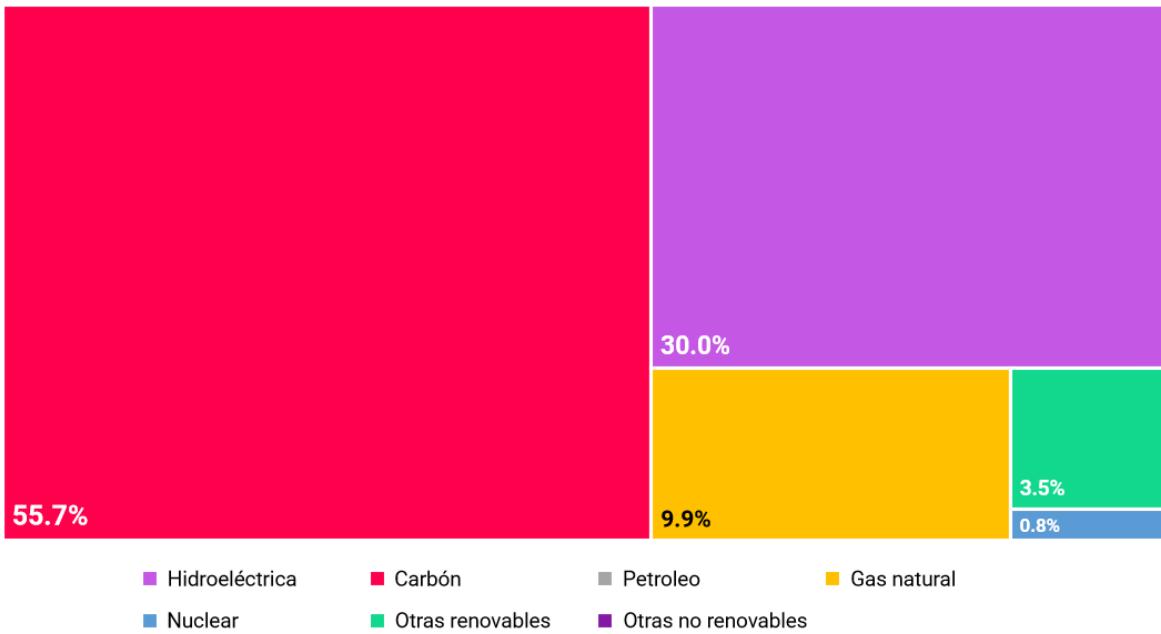


Figura 21. Uso de diferentes fuentes de energía en la industria del aluminio a nivel global en el 2015.

Distribución de uso de fuente de poder en Sudamérica

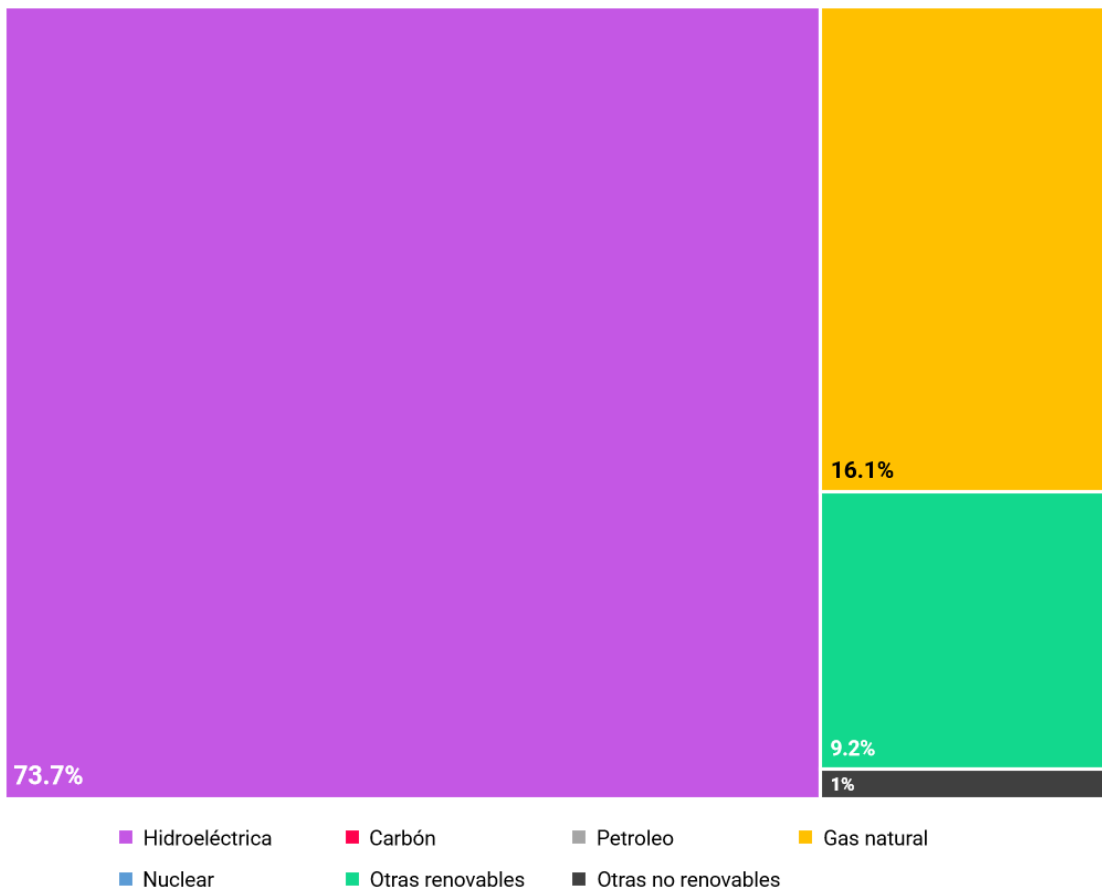


Figura 22. Uso de diferentes fuentes de energía en la industria del aluminio en Sudamérica en el 2015.

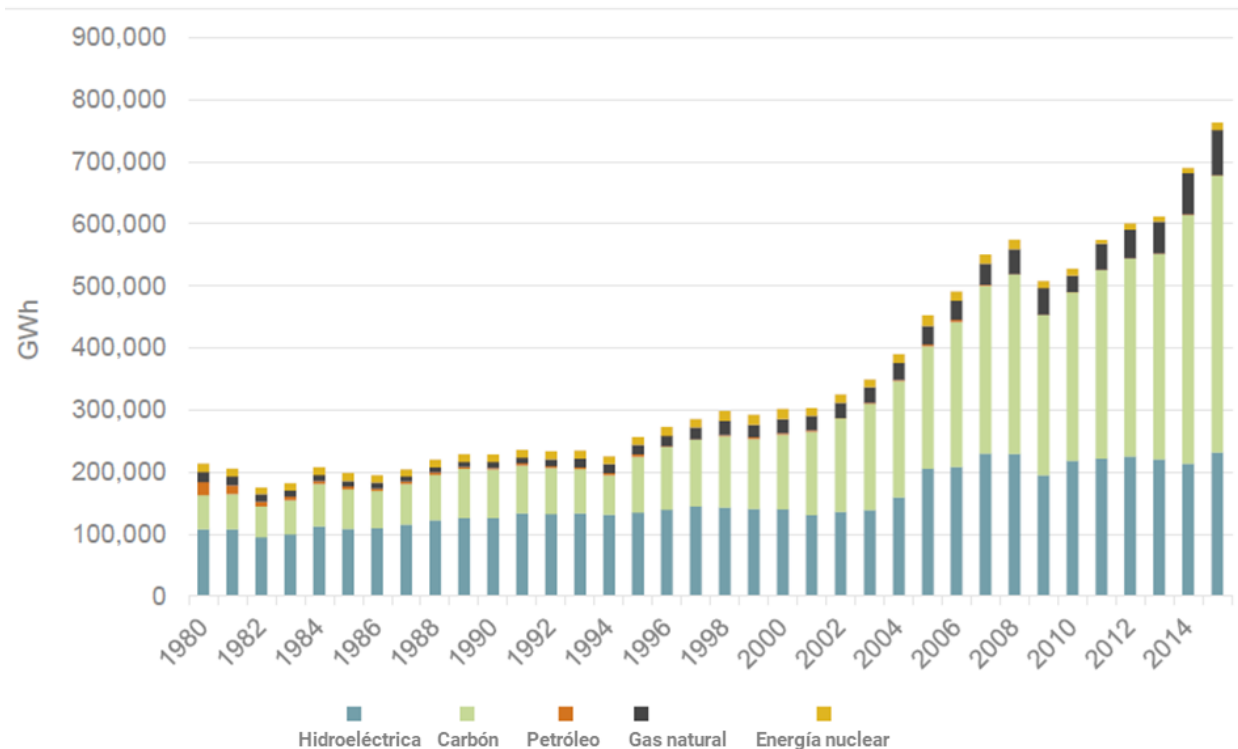


Figura 23. Evolución de la energía utilizada en el periodo 1980-2015 a nivel global [40].

Es importante destacar que la energía consumida, no es necesariamente lo mismo que la cantidad de combustible consumido para la generación de la misma. El consumo de combustibles (en kg para el carbón y petróleo y en m<sup>3</sup> para el gas natural) se muestra más adelante.

A nivel mundial la entrada másica de bauxita al sistema de producción de aluminio es de 5,540 [kg], esto incluye un componente del 10-20 [wt%] de humedad. Durante la producción de alumina parte de la bauxita se deposita como residuo o como reciclado, lo cual equivale a 2,373 [kg] y 57 [kg], respectivamente. En esta parte del proceso la salida de alumina varía entre 2,000-2,500 [kg], dependiendo del contenido de humedad de la misma.

La reducción del aluminio requiere de un mínimo de 1,889 [kg] de alumina para formar 1,000 [kg] de metal. Debido a que una parte del oxígeno contenido en el óxido de aluminio, reacciona formando CO (en lugar de CO<sub>2</sub>) se tiene un consumo neto de ánodo mucho mayor que el predicho por la estequiometría, siendo el consumo real de 460 [kg] frente a 333 [kg] a los teóricos.

### 3.3 Life Cycle Inventory (LCI).

En la tabla 14 se observa el LCI para la extracción de la bauxita. Este incluye todas las entradas al sistema, así como emisiones y uso de diferentes recursos materiales y energéticos.

Tabla 14. Datos del LCI de la extracción de la bauxita [40].

<b>Minado de bauxita</b>			
Material de referencia		Bauxita	
Referencia (ton product por ton de al)		5.5	
Región		Global	Sudamérica
Entradas de material			
Agua fresca	m3/ton product	0.5	
Agua de mar	m3/ton product	0	
Uso de agua y suelo			
Tiempo de regeneracion	años/ton product	4E-07	
Entradas de energía			
Petróleo crudo	kg/ton product	0.5	
Diesel	kg/ton product	1.6	
Gas natural	m3/ton product	0	
Carbón	kg/ton product	0	
Electricidad	kWh/ton product	1.5	
Emisiones al aire			
Partículas	kg/ton product	0.1	
Emisiones al agua			
Agua fresca	m3/ton product	0.03	
Agua de mar	m3/ton product	0	
Residuos sólidos			
Residuos mineros sólidos	kg/ton product	0.1	
Emisiones calculadas			
CO2 no relacionado a combustibles	kg/ton product		
CO2	kg/ton product	7	
Metano	kg/ton product	0.0003	
Óxido nitroso	kg/ton product	0.0001	

Debido a que los datos mundiales fueron replicados para el análisis de Sudamérica (por falta de datos propios), no es posible hacer una comparación entre los procesos de una región y otra. Esta falta de datos puede deberse principalmente a la nula explotación minera de bauxita que existe en algunos países de la zona (debido a la falta de yacimientos relevantes) o a la ineficiencia de las industrias extractivas locales.

Así mismo los datos no incluyen ningún transporte, ya que el material de referencia del proceso (la bauxita) no es transportada una distancia relevante durante su extracción.

Es importante destacar que, la extracción de la bauxita es de las partes menos energéticas de la manufactura del aluminio, así como de las que menos gasta recursos. La emisión más importante es la correspondiente al CO<sub>2</sub> generado por combustibles, así como las entradas de electricidad y diesel (requeridos para hacer funcionar la maquinaria). El gasto de bauxita para la producción de 1 [ton] de aluminio es similar a los datos reportados, tanto en el marco teórico como en el balance de masa anterior.

Es importante aclarar cómo es que cada una de las emisiones o residuos que se tienen impacta al medio ambiente. Enfocándose solamente en los residuos sólidos no aprovechables, se encuentran los residuos sólidos mineros [41], los cuales corresponden a los estériles y las colas resultantes del proceso de conminución y concentración. Estos suelen ser llevados a vertederos y confinamientos donde su impacto se ve reducido, debido a la poca utilidad que poseen o a la falta de procesos existentes para tratarlos. En cuanto a las emisiones producidas, todas son correspondientes a la quema de combustibles (mismos que se utilizan para la maquinaria de la mina), que en este caso, corresponden a diesel y petróleo crudo.

En cuanto a las emisiones, se observa que en general el gas emitido más relevante es el CO<sub>2</sub>. También se emiten otras especies como óxido nitroso y metano, estas 2 poseen un GWP<sub>100</sub> mucho mayor que el del CO<sub>2</sub> (tabla 7) por lo que no debe de ser despreciado su impacto medioambiental.

Un punto a aclarar es el uso de agua de mar. En ocasiones en plantas cercanas a la costa se utiliza para el lavado de la bauxita. De todas las instalaciones analizadas, solamente una reportó el uso de agua de mar, por lo que no se considera relevante para el análisis.

En la tabla 15 se reporta el LCI de la producción de alúmina. En este caso si es posible hacer una comparación entre una zona y otra, ya que si existen datos para las 2 regiones analizadas. Debido a que algunos países solo se dedican a la extracción y exportación de la bauxita pero no a la fabricación de alúmina ni a su reducción en aluminio, es que se reportan distancias marítimas tan altas. La diferencia existente a nivel global y en Sudamérica puede deberse a que dentro de esta región se engloba a Brasil, uno de los principales productores de bauxita en el mundo.

En cuanto a las entradas de materias primas, Sudamérica posee una mayor eficiencia en el uso de las mismas, requiriendo una menor cantidad de sosa, cal y bauxita para producir una misma cantidad de alúmina. Esto se replica en la mayoría de recursos energéticos menos el petróleo crudo, donde el consumo en Sudamérica resulta ser más de 5 veces mayor que el promedio mundial. Debido a que el petróleo es de los combustibles fósiles que más emisiones genera, esto se ve reflejado en las emisiones al aire y al agua, que resultan ser el doble que las reportadas a nivel global. Esta mayor eficiencia de recursos materiales se traduce en una menor cantidad de residuos de bauxita y lodos rojos, así como en emisiones de gases de efecto invernadero.

Los lodos rojos son de especial interés, debido al problema ambiental que conllevan (se componen principalmente de óxidos de hierro y al no tener utilidad alguna y ser altamente contaminantes, deben de ser confinados y almacenados de tal manera que no puedan tener contacto con suelos y cuerpos de agua). Este es uno de los puntos más críticos en la producción de aluminio debido a los altos volúmenes que se producen. En la actualidad existen proyectos que se basan en la reutilización de estos lodos en la industria cementera [42].

Tabla 15. Datos del LCI de la fabricación de alúmina [40].

Producción de alúmina			
Material de referencia		Alúmina	
Referencia (ton product por ton de al)		2	
Región		Global	Sudamérica
Transporte (promedio)			
Marítimo	km/ ton product	2,804	1,985
Carretera	km/ ton product	2	2
Vía ferrea	km/ ton product	71	137
Banda transportadora	km/ ton product	119	220
Entradas de material			
Bauxita	kg/ton product	2,847	2,395
Sosa cáustica	kg/ton product	73	95
Cal	kg/ton product	32	13
Agua fresca	m3/ton product	2	2
Agua de mar	m3/ton product	0	0
Uso de agua y suelo			
Consumo de agua fresca	m3/ton product	0.6	0.9
Consumo de agua de mar	m3/ton product	0	0
Ocupación de suelo	m2/ton product	0.001	0
Tipo de suelo anterior a la ocupación	Tipo de suelo	Pastizal	Bosque tropical
Tipo de suelo anterior a la ocupación	Tipo de suelo	Tratado y vegetado	Tratada y vegetada
Tiempo de regeneracion	años/ton product	0.00001	0.00001
Entradas de energía			
Petróleo crudo	kg/ton product	25	112
Diesel	kg/ton product	1	0
Gas natural	m3/ton product	68	18
Carbón	kg/ton product	295	97
Electricidad	kWh/ton product	218	88
Emisiones al aire			
Partículas	kg/ton product	0.5	0.8
Dióxido de azufre	kg/ton product	1.1	2.6
Óxido nitroso	kg/ton product	0.6	1
Mercurio	g/ton product	0.12	0.2
Emisiones al agua			
Sólidos suspendidos	kg/ton product	0.04	0.01
Aceite y grasa	kg/ton product	1.7	3
Agua fresca	m3/ton product	2	2
Agua de mar	m3/ton product	0	0
Mercurio	g/ton product	0.0005	0.001
Residuos reciclables			
Residuos de bauxita	kg/ton product	29	0
Residuos sólidos			
Lodos rojos	kg/ton product	1,231	737
Emisiones calculadas			
CO <sub>2</sub> no relacionado a combustibles	kg/ton product	237	96
CO <sub>2</sub>	kg/ton product	826	643
Metano	kg/ton product	0.0686	0.0405
Óxido nitroso	kg/ton product	0.0104	0.0068

Aun con todo esto, es relevante denotar el inmenso incremento que existe en emisiones respecto a la extracción de bauxita. La comparación entre los diferentes procesos se realiza más adelante.



La tabla 16 muestra el LCI de los procesos de fabricación de ánodos. Mientras que a nivel regional en Sudamérica no se hace distinción según el tipo de ánodo, en los datos globales si se hace esta separación entre pasta Soderberg y ánodos prehornados.

Tabla 16. Datos del LCI de la fabricación de pasta Soderberg y ánodos [40].

<b>Ánodos</b>				
Material de referencia		Ánodo	Pasta Soderberg	Pasta y ánodos
Referencia (ton product por ton de al)		0.46	0.515	0.475
Región		Global		Sudamérica
Entradas de material				
Material refractario	kg/ton product	7	-	-
Coque	kg/ton product	675	702	450
Acero	kg/ton product	6	-	1
Agua de mar	m3/ton product	2	-	-
Brea	kg/ton product	146	306	128
Agua fresca	m3/ton product	2	5.0	0.3
Uso de agua y suelo				
Consumo de agua fresca	m3/ton product	0.9	0.5	0.3
Consumo de agua de mar	m3/ton product	0.003	-	-
Entradas de energía				
Petróleo crudo	kg/ton product	17	9.00	41
Gas natural	kg/ton product	47	-	-
Electricidad	kWh/ton product	111	78	176
Emisiones al aire				
Partículas	kg/ton product	0.2	-	0.1
Dióxido de azufre	kg/ton product	4.3	0.1	0
Óxido nitroso	kg/ton product	0.5	0.01	0.01
Fluoruros particulados	kg/ton product	0.007	-	0.018
Fluoruros gaseosos	kg/ton product	0.02	-	0.03
Hidrocarburos aromáticos policíclicos totales	kg/ton product	0.05	0.0001	-
Benzopireno	g/ton product	0.05	0.02	-
Emisiones al agua				
Sólidos suspendidos	kg/ton product	0.09	0.11	-
Aceite y grasa	kg/ton product	0.02	0.02	0.07
Fluoruros	kg/ton product	0.009	0.1	-
Agua de mar	m3/ton product	1.6	-	-
Agua fresca	m3/ton product	1.7	4.2	-
Hidrocarburos aromáticos policíclicos totales	g/ton product	0.01	0	-
Residuos reciclables				
Acero	kg/ton product	4	-	2
Refractarios	kg/ton product	8	-	-
Otros	kg/ton product	6	0.02	26
Residuos sólidos				
Residuos De carbono	kg/ton product	12	3.0	14
Refractarios	kg/ton product	5	-	0.2
Lodos de depuladores	kg/ton product	0.05	0.7	-
Otros desperdicios sólidos industriales	kg/ton product	4.2	1.0	-
de los cuales son peligrosos	kg/ton product	2.50	0.02	-
Emisiones calculadas				
CO2 no relacionado a combustibles	kg/ton product	235	2.0	236
CO2	kg/ton product	151	14	216
Metano	kg/ton product	0.0039	0.0006	0.0088
Óxido nitroso	kg/ton product	0.0006	0.0001	0.0018

Esta separación provoca que los datos de Sudamérica se comparen con los datos globales de los ánodos y de la pasta al mismo tiempo. La misma situación ocurre con los datos del proceso de electrólisis, donde se realiza el mismo ajuste.

Una de las diferencias entre los procesos se encuentra en las entradas de material, ya que, si bien a nivel global la fabricación de ánodos requiere materias primas (tales como material refractario y agua de mar) los demás procesos no los requieren. Esto mismo provoca que los residuos y emisiones sean diferentes, no sólo en magnitud, sino también en la naturaleza química, física y biológica de los mismos.

La cantidad de materiales de referencia son muy parecidos entre sí. Se observa que la fabricación de pasta Soderberg es la que más recursos materiales requiere, en cambio, la producción de Sudamérica es la que menor eficiencia tiene en uso de recursos energéticos, tanto en petróleo crudo como en electricidad.

El uso de una fuente de energía u otra normalmente depende de la disponibilidad que tenga cierta región, se suele utilizar la fuente de poder más abundante o asequible en cada región. Es por esto que existe una variación entre la fuente de poder utilizada entre Sudamérica y el promedio global. El mayor uso de petróleo crudo en Sudamérica provoca una mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

El uso de material refractario provoca que la fabricación de ánodos tenga emisiones y residuos extra que deben ser considerados. Estas emisiones incluyen una mayor cantidad de partículas, óxido nitroso, óxido de azufre, fluoruros particulados y gaseosos, hidrocarburos aromáticos, grasas y aceites, mientras que los desechos van desde residuos de carbono, de refractarios y lodos.

Las emisiones más importantes son las correspondientes a gases de efecto invernadero. Estas son comparables en magnitud a las emisiones provocadas por la fabricación de la alúmina.

En la tabla 17 se observan los datos del LCI correspondientes a la electrólisis. Lo primero que se debe aclarar es que ya no existe una diferencia entre los materiales de referencia (que en este caso es el metal líquido) entre una región y otra o entre un tipo de ánodo y otro.

Las entradas de recursos materiales no son muy diferentes entre los 3 procesos, con las excepciones de la alúmina (donde la producción de Sudamérica posee la mayor eficiencia en el uso de la misma) y la cantidad de ánodos/pasta requeridos (siendo igualmente la producción de Sudamérica y con ánodos preheated los más eficientes). Esta misma eficiencia se observa en el consumo de recursos energéticos.

Tabla 17. Datos del LCI de la electrólisis [40].

<b>Electrólisis</b>				
Material de referencia		Metal líquido		
Referencia (ton product por ton de al)		1 (Pasta)	1 (Ánodo)	1
Región		Global		Sudamérica
<b>Transporte (promedio)</b>				
Marítimo	kg/ton product	757	10,933	-
Carretera	kg/ton product	1	7	3
Vía ferrea	kg/ton product	0	73	-
<b>Entradas de material</b>				
Alúmina	kg/ton product	2,105	1,919	1,897
Ánodos/Pasta Soderberg	kg/ton product	515	460	475
Cátodos de carbono	kg/ton product	7	6	6
Fluoruro de aluminio	kg/ton product	21	16	21
Material refractario	kg/ton product	3	8	5
Acero	kg/ton product	5	5	5
Agua de mar	m3/ton product	0	42	-
Agua fresca	m3/ton product	28	4	2
<b>Uso de agua y suelo</b>				
Consumo de agua fresca	m3/ton product	0.7	0.9	2.2
Consumo de agua de mar	m3/ton product	0	0	0
<b>Entradas de energía</b>				
Electricidad	kWh/ton product	16,951	14,066	15,751
<b>Emisiones al aire</b>				
Partículas	kg/ton product	2	1	2
Dióxido de azufre	kg/ton product	8	13.2	-
Óxido nitroso	kg/ton product	0.4	0.3	-
Fluoruros particulados	kg/ton product	0.4	0.2	0.5
Fluoruros gaseosos	kg/ton product	0.7	0.4	0.3
Hidrocarburos aromáticos policíclicos totales	kg/ton product	0.28	0.0042	-
Benzopireno	g/ton product	3	0.08	-
Tetrafluorometano	kg/ton product	0.1	0.07	0.1
Hexafluoroetano	kg/ton product	0.008	0.004	0.006
<b>Emisiones al agua</b>				
Sólidos suspendidos	kg/ton product	2	0.18	-
Aceite y grasa	kg/ton product	-	0.0025	0.0126
Fluoruros	kg/ton product	1.4	0.1	0.02
Agua de mar	m3/ton product	-	41.59	-
Agua fresca	m3/ton product	67.22	7.76	10.74
Hidrocarburos aromáticos policíclicos totales	g/ton product	6.68	0	-
<b>Residuos reciclables</b>				
Carbón usado en revestimiento de ollas	kg/ton product	20.1	8.60	-
Refractario usado en revestimiento de ollas	kg/ton product	15.3	7.00	-
Refractario	kg/ton product	0.9	5.80	-
Acero	kg/ton product	5.6	6.20	7.5
<b>Residuos sólidos</b>				
Revestimiento de ollas	kg/ton product	11	7.50	-
Alumina gastada	kg/ton product	19	3.40	13
Residuos de carbono	kg/ton product	25	8.20	5.4
Residuos de carbono	kg/ton product	18	2.90	26.7
Refractario	kg/ton product	0.90	0.30	-
<b>Emisiones calculadas</b>				
CO <sub>2</sub> no relacionado a combustibles	kg/ton product	1,849	1,503	1,724

Las emisiones al aire son muy parecidas entre sí, en esta las especies como fluoruros, compuestos fluorados e hidrocarburos se deben principalmente al uso de refractarios y al desgaste de los ánodos durante la electrólisis. En cuanto a desechos reciclables y residuos sólidos el proceso que utiliza ánodos es el que menos subproductos produce, ya sea en residuos de carbono como de refractarios.

El desgaste de los ánodos produce grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, así como de CO (aunque datos de emisiones de esta especie química no se encuentran reportados). Este punto junto con los grandes requerimientos de electricidad durante la electrólisis son los más críticos en la manufactura del aluminio primario. Para la reducción de forma sustancial de las emisiones del proceso, se requiere que esta electricidad venga de fuentes renovables y además, se eficiente el consumo de ánodos. Estas pueden considerarse las principales áreas de oportunidad para que la producción del aluminio sea más sostenible. Debido a que no existe una quema de combustibles, no existen emisiones adicionales de óxido nitroso o metano.

En la tabla 18 se reportan los datos del LCI correspondiente a la colada de lingotes. Este no hace distinción alguna respecto a las dimensiones o geometría de los lingotes, además, no se menciona si la solidificación de los mismos fue por colada continua, se asume esta situación ya que es la que menos tiempo requiere.

Al igual que en la electrólisis, la cantidad de metal utilizada para el proceso fue la misma para ambos casos. Se observa que las entradas de material para el análisis de Sudamérica son mayores, lo que habla de un uso de materia prima menos eficiente. El gasto de agua se asume que se ha utilizado para el enfriamiento de los rodillos y los moldes durante la colada.

Como en otros procedimientos, los datos correspondientes a Sudamérica arrojan una mayor eficiencia en los recursos energéticos, y en este caso, en la misma no se considera el uso de petróleo ni el diesel. Aun con este uso de combustibles menos contaminantes, las emisiones de gases de efecto invernadero y las emisiones al aire, son muy parecidas entre sí. No es posible hacer una comparación con las emisiones al agua y los residuos sólidos, debido a la falta de datos en la industria sudamericana.

En este caso, el parámetro más importante a controlar resulta ser el uso de recursos energéticos. Las pérdidas de calor deben ser mínimas durante el tiempo en que el metal permanece en los hornos de mantenimiento, al mismo tiempo que la eficiencia energética de todo el sistema de colada debe maximizarse. Con esto es posible reducir el gasto de recursos energéticos, ya sea electricidad, petróleo, diesel o gas natural.

Tabla 18. Datos del LCI de la colada de lingotes [40].

<b>Colada</b>			
Material de referencia		Lingote	
Referencia (ton product por ton de al)		1	
Región		Global	Sudamérica
<b>Entradas de material</b>			
Cloro	kg/ton product	0.01	0.00195
Metal de electrólisis	kg/ton product	1,000	1,000
Agua fresca	m3/ton product	2	4.58
<b>Uso de agua y suelo</b>			
Consumo de agua fresca	m3/ton product	1.1	2.4
Consumo de agua de mar	m3/ton product	0.1	-
<b>Entradas de energía</b>			
Petróleo crudo	kg/ton product	1	-
Diesel	kg/ton product	0.4	-
Gas natural	m3/ton product	21	17
Electricidad	kWh/ton product	53	34
<b>Emisiones al aire</b>			
Partículas	kg/ton product	0.04	0.5
Dióxido de azufre	kg/ton product	0.03	0.02
Óxido nitroso	kg/ton product	0.08	0.19
Cloruro de hidrógeno	kg/ton product	0.02	-
Dioxinas y furanos	kg/ton product	7.00E-10	-
<b>Emisiones al agua</b>			
Sólidos suspendidos	kg/ton product	0.27	-
Aceite y grasa	kg/ton product	0.034	-
Agua fresca	m3/ton product	1.89	-
<b>Residuos reciclables</b>			
Refractario	kg/ton product	0.32	1.3
Escoria	kg/ton product	13.29	17.52
Polvo de filtros	kg/ton product	0.53	-
<b>Residuos sólidos</b>			
Refractario	kg/ton product	0.47	-
Escoria	kg/ton product	1	-
Polvo de filtros	kg/ton product	0.03	-
Otros desperdicios sólidos industriales	kg/ton product	1	-
de los cuales son peligrosos	kg/ton product	1	-
<b>Emisiones calculadas</b>			
CO <sub>2</sub>	kg/ton product	46	50
Metano	kg/ton product	0.0009	0.002
Óxido nitroso	kg/ton product	0.0001	0.0004

A partir de las emisiones de gases de efecto invernadero reportadas en el LCI de cada proceso, junto con los valores de  $GWP_{100}$  anteriormente mencionados en la tabla 7, se calcularon las emisiones de  $CO_2eq$  de cada uno de los procesos de la manufactura del aluminio. La comparación entre estos, así como su distribución, se reportan en las figuras 24-27.

Comparación de emisiones de los diferentes procesos de la manufactura del aluminio primario a nivel global y regional (Sudamérica)

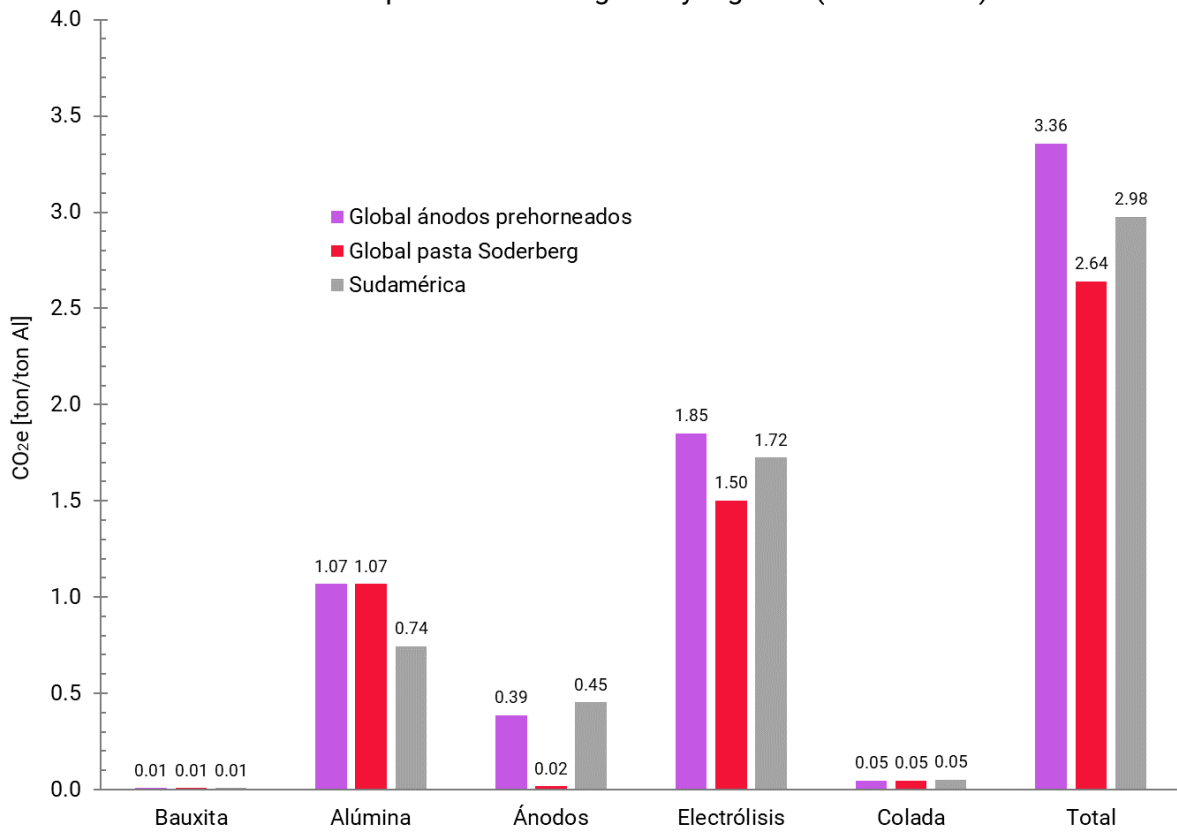


Figura 24. Comparación de las emisiones en los diferentes procesos del aluminio primario a nivel global y en Sudamérica.

Distribución de las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e a nivel global con ánodos prehorneados

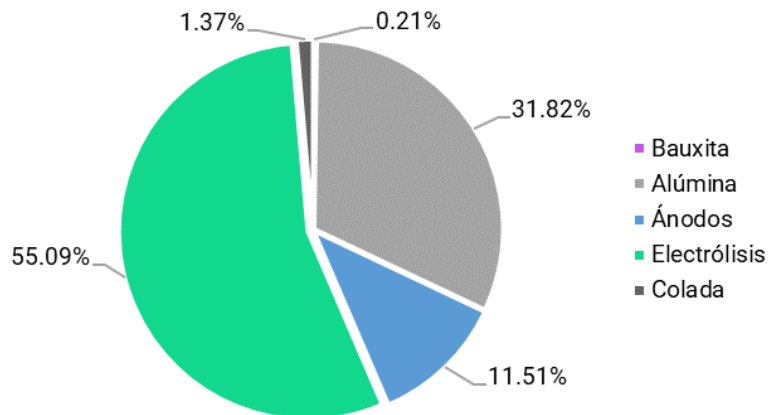


Figura 25. Distribución de las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e a nivel global utilizando ánodos prehorneados.

Distribución de las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e a nivel global con pasta Soderberg

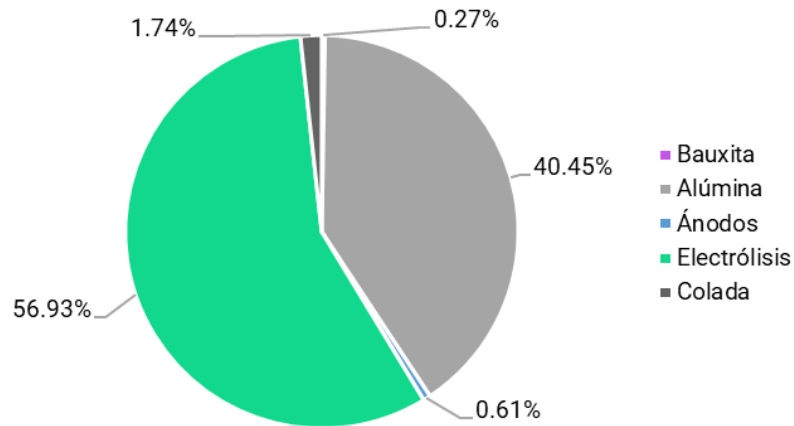


Figura 26. Distribución de las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e a nivel global utilizando pasta Soderberg.

Distribución de las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e a nivel regional (Sudamérica)

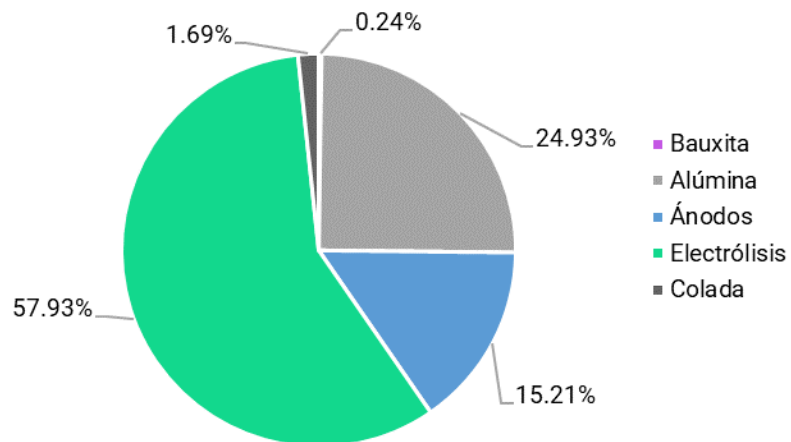


Figura 27. Distribución de las emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e a nivel regional (Sudamérica).

Tabla 19. Emisiones liberadas de CO<sub>2</sub>e de cada uno de los procesos productivos del aluminio primario tanto a nivel global como en Sudamérica.

Proceso	Emisión [CO <sub>2</sub> e/ton Al]		
	Global		Sudamérica
	Prehorneados	Pasta	
Bauxita	0.0070	0.0070	0.0070
Alúmina	1.0678	1.0678	0.7420
Ánodos	0.3863	0.0160	0.4528
Electrólisis	1.8490	1.5030	1.7240
Colada	0.0461	0.0461	0.0502
<b>Total</b>	<b>3.3562</b>	<b>2.6399</b>	<b>2.9760</b>

Es importante notar una peculiaridad en los datos correspondientes a las emisiones de CO<sub>2</sub>eq en la fabricación de ánodos utilizando pasta Soderberg. Estos muestran emisiones casi nulas respecto a los otros 2 procesos con los que fue comparado. Se debe a problemas en la metodología con la que se realizó el LCI, según la International Aluminium Institute [40].

Hasta cierto punto es posible comparar los resultados obtenidos en las figuras 24-27 con aquellos reportados en la figura 9, realizando la aclaración que si bien, ambos muestran la emisiones de diversos procesos productivos, la figura 9 lo hace respecto a unidades de masa de gases de efecto invernadero, mientras que las figuras 24-27 lo hacen respecto a emisiones de CO<sub>2</sub>eq, por lo cual habrá cierta diferencia entre uno y otro. Aun con todo esto, es de utilidad la comparación entre ambas.

Como se reporta en la bibliografía, los principales procesos responsables de las altas emisiones de la manufactura del aluminio primario son: la electrólisis, la fabricación de ánodos y la producción de alúmina. Las 3 juntas representan casi el 97% de las emisiones totales reportadas en el LCI.

Existen además diferencias respecto a otros datos reportados. Una de estas, se encuentra en otros procesos complementarios que acompañan a la manufactura del aluminio primario, y si bien pueden no ser críticas durante la manufactura, si lo son en cuanto a emisiones se refiere. Pero la principal diferencia recae en los datos del total de emisiones de CO<sub>2</sub>eq en la producción de aluminio primario. Anteriormente se había mencionado que todo aluminio primario que su manufactura emitiera una cantidad de 4 [ton CO<sub>2</sub>e/ton Al] se podía considerar como verde, por lo que, según la figura 24 y la tabla 19, los 3 procesos comparados corresponden a fabricación de aluminio verde.

Cabe mencionar que la aseveración anterior es errónea, ya que se debe de comprender que esta huella de carbono no solamente debe involucrar a las emisiones directas de la fabricación del aluminio, sino también a las indirectas, es decir, a aquellas emisiones liberadas en la generación de la electricidad consumida en la industria del aluminio, (anteriormente al inicio del LCI se había mencionado que estos datos no fueron contemplados por el IAI), aun con esto es posible realizar la comparativa entre los 3 procesos, siendo los datos mundiales con pasta Söderberg y las correspondientes a Sudamérica, los que poseen una menor huella de carbono y podrían considerarse como “más verdes”.

Tanto la electrólisis, la fabricación de ánodos y la fabricación de alúmina son las principales áreas de oportunidad en la industria del aluminio, y es aquí donde las innovaciones y futuras investigaciones deben centrarse, con el fin de eficientar tanto el gasto energético como las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por último, es importante aclarar que la reducción de emisiones de estos procesos, no solamente se deben llevar a cabo mediante el uso de energías limpias y ya, existe una gran cantidad de posibles soluciones que prometen disminuir la huella de carbono en la industria del aluminio, en el futuro.



### 3.4 Diseño y elaboración de plataforma digital.

Uno de los puntos más importantes del presente proyecto fue la realización de una plataforma digital (una página web). El propósito de la misma es hacer un resumen general de la importancia del aluminio no solo en las industrias manufactureras, sino también en la economía, en la vida diaria y en el medio ambiente. También se aborda el peso que están teniendo las innovaciones dentro de la industria, las cuales están permitiendo tener procesos de manufactura cada vez menos contaminantes y más eficientes.

Todo esto con un enfoque general, el cual permita que no solo gente involucrada dentro del sector metalúrgico lo pueda entender, sino también que cualquier individuo que se encuentre interesado en dichos temas lo comprenda, sin que sea necesario que tenga una formación o conocimientos previos, dentro de la industria manufacturera.

Además de esto, se buscó siempre que la plataforma tuviera un diseño claro y conciso, con lo cual la navegación sea rápida e intuitiva dentro de la misma y favorezca el entendimiento de los temas abordados.

El acceso a dicha plataforma se puede realizar mediante el QR de la figura 28.

Figura 28. QR de la plataforma virtual del presente proyecto.



## Capítulo 4, Conclusiones y trabajos futuros

- Se logró la realización de una revisión bibliográfica del aluminio verde, desde un punto de vista global.
- En México el desarrollo del aluminio verde se encuentra en una etapa incipiente, siendo las empresas CUPRUM, ALMEXA y AZINSA, las pioneras en dicho tópico.
- En la actualidad no es posible la fabricación de aluminio secundario con purezas especialmente altas debido a limitaciones existentes en el proceso de separación y reciclaje.
- No fue factible un análisis en cuanto a aspectos económicos como la oferta, demanda y precio del aluminio primario y secundario, debido a la dificultad para la obtención de dichos datos.
- La normatividad del aluminio verde es actualmente casi inexistente, debido a la novedad que este producto representa.
- El proceso productivo que más emite gases de efecto invernadero es la electrólisis de la alúmina, con aproximadamente más del 55% de emisiones totales de la fabricación de lingotes de aluminio primario.
- Las principales áreas de oportunidad para reducir el gasto energético y las emisiones de gases de efecto invernadero son la electrólisis (especialmente en el desgaste de ánodos) y la refinación de la alúmina.
- En general el uso de ánodos prehornados lleva consigo una huella de carbono mayor que el uso de pasta Söderberg.
- La industria sudamericana de aluminio primario posee menos emisiones de CO<sub>2</sub>eq, una mayor eficiencia de uso de materias primas y una menor eficiencia energética que el promedio global.
- La plataforma desarrollada cuenta con los datos más relevantes de esta industria y puede ser consultada a través del código QR.
- Las principales iniciativas que se requieren tomar para la creación de una industria verde son el uso de energías renovables, el aumento de la circularidad y el fomento a la innovación y la investigación.

En la presente tesina solamente se realizó la recopilación de datos correspondientes del LCI de la producción del aluminio primario, sin embargo, este es solo un paso de todo lo que involucra la realización de un LCA.

Es por esto que se considera que esta sería un área de oportunidad muy importante, en la cual se puedan realizar investigaciones futuras, en donde no solo se hable de datos concretos, sino también de la delimitación de las fronteras, así como de objetivos más específicos y un análisis que incluya a otras regiones del mundo, con lo cual se pueda obtener un panorama más completo de la industria del aluminio a nivel global.

Con la realización de un completo LCA, además sería posible considerar la metodología reportada en la ISO 14040 (norma correspondiente al análisis de ciclo de vida) de cada uno de los pasos necesarios a realizar.

## Capítulo 5, Referencias.

- [1] Majumder, R. (2020, 9 junio). Carbon Trust: Common standards and clear labelling for Green Aluminium should be the way ahead. AlCircle. Recuperado 6 de enero de 2022, de <https://t.ly/4W9z>
- [2] Melanie Williams. How to green your aluminium products [Webinar]. Melanie Williams CONSULTING.
- [3] Hugh Jones (2020). Driving Recognition for Lower Carbon Products: Lower Carbon Aluminium [Webinar]. CARBON TRUST.
- [4] The growing need for green aluminium. (2021, 17 marzo). LOMBARD ODIER. Recuperado 6 de enero de 2022, de <https://t.ly/cj7S>
- [5] Jérôme Lucaes (2020). Green Aluminium Webinar [Webinar]. ALLOW.
- [6] Bloxsome, N. (2020, 4 septiembre). Bauxite recognised as «critical raw material». ALUMINIUM INTERNATIONAL TODAY. Recuperado 6 de enero de 2022, de <https://t.ly/u40d>
- [7] Bjørn Kjetil Mauritzen. Green aluminium. How and why? [Webinar]. Hydro.
- [8] Roh, M. (2020, 24 octubre). Rusal America signs 'green' aluminium contracts in Mexico. Fastmarkets. Recuperado 16 de enero de 2022, de <https://t.ly/7ouun>
- [9] Dotaniya, M. & Meena, Vasudev & Saha, Jayanta & S, Rajendiran & Patra, Ashok & Dotaniya, C.K. & Meena, H M & Kumar, Kuldeep & Meena, Bharat. (2018). Environmental Impact Measurements: Tool and Techniques. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1\\_60-2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-48281-1_60-2).
- [10] Klemeš, Jiri. (2015). Assessing and Measuring Environmental Impact and Sustainability. Clean Technologies and Environmental Policy. <https://doi.org/10.1007/s10098-015-0930-0>.
- [11] Stanford University. (2017, abril 20). What is sustainability? A conversation with Stanford Earth Dean Pamela Matson. Stanford News. Recuperado 18 de febrero de 2022, de [t.ly/myMp](https://t.ly/myMp)
- [12] Sustentabilidad UANL. (2020, 27 octubre). What is sustainable development? Recuperado 18 de febrero de 2022, de [t.ly/mp8r](https://t.ly/mp8r)
- [13] Ahsby, M. F., Balas, D. F., & Coral, J. S. (2016). Materials and Sustainable Development. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2014-0-01670-X>
- [14] Ashby, M. F. (2013). Materials and the Environment (2.<sup>a</sup> ed.) [Libro electrónico]. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66554-0>
- [15] Jensen, A. A., Hoffman, L., Møller, B. T., & Schmidt, A. (1997, agosto). Life Cycle Assessment (N.o 6). European Environment Agency. [t.ly/CWqz](https://t.ly/CWqz)
- [16] European Aluminium. (2020, abril). Circular Aluminium Action Plan | A strategy for achieving aluminium's full potential for a circular economy by 2030. <https://t.ly/U7bj>
- [17] The role of aluminum in the challenge of circular economy. (s. f.). Laminazione Sottile. Recuperado 7 de abril de 2022, de <https://t.ly/dB5q>
- [18] CIRCULAR ECONOMY | Closed loop recycling. (s. f.). ALMEXA. Recuperado 7 de abril de 2022, de <https://t.ly/ymhu>
- [19] Product Markets - Aluminum. (2021). The Aluminum Association. Recuperado 20 de febrero de 2022, de [t.ly/YAW8](https://t.ly/YAW8)

- [20] Ministerio de Industria y Energía. (1996). Directiva 96/61 relativa a la prevención y control integrados de la contaminación (2.5). Fundación Entorno, Empresa y Medio Ambiente. <https://t.ly/RJ9m>
- [21] Sistema Español de Inventario de Emisiones. (2019). FABRICACIÓN DE ALUMINIO (EMISIONES DE PROCESO). MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO. <https://t.ly/AHZG>
- [22] Aluminum Industry. (2021, 23 noviembre). US EPA. Recuperado 28 de febrero de 2022, de <https://t.ly/3SPK>
- [23] Understanding Global Warming Potentials. (2021, 18 octubre). US EPA. Recuperado 28 de febrero de 2022, de <https://t.ly/pEs0>
- [24] European Commission. (2001). Glossary: Carbon dioxide equivalent - Statistics Explained. Eurostat. Recuperado 28 de febrero de 2022, de <https://t.ly/xKqlp>
- [25] Gautam, M., Pandey, B., & Agrawal, M. (2018). Carbon Footprint of Aluminum Production: Emissions and Mitigation. En S. S. Muthu (Ed.), Environmental Carbon Footprints (pp. 206–2012). Butterworth-Heinemann. <https://t.ly/myRY>
- [26] Energy Technology Systems Analysis Programme. (2012, marzo). Aluminium Production. Energy Technology Network. <https://t.ly/SY5V>
- [27] International Aluminium Institute. (2021, 10 agosto). Primary Aluminium Smelting Energy Intensity. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://t.ly/IWM6>
- [28] International Aluminium Institute. (2021a, agosto 10). Metallurgical Alumina Refining Energy Intensity. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://t.ly/5ABb>
- [29] Ecofys, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research, & Öko-Institut. (2009, noviembre). Sector report for the aluminium industry. European Commission. <https://t.ly/uCeuj>
- [30] Statista. (2021, 25 noviembre). Global end use of primary aluminum by sector 2020. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://t.ly/TL5P>
- [31] Statista. (2021a, mayo 25). The world's leading exporters of aluminum and aluminum products in 2020, by country. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://t.ly/wHt11>
- [32] Government of Canada. (2022, 22 febrero). Aluminum facts. Natural Resources Canada. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://t.ly/7KzH>
- [33] OEC. (2020). Desperdicios y desechos de aluminio (HS: ) Product Trade, Exporters and Importers | OEC. OEC - The Observatory of Economic Complexity. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://t.ly/7dNA>
- [34] Mexico relies on imported aluminum. (2019, 1 agosto). WEDC. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://t.ly/kO6O>
- [35] Mexico 's Aluminum Industry. (2017, 21 marzo). @MeetBuyers. Recuperado 6 de abril de 2022, de <https://t.ly/kOxp>
- [36] «Green» Aluminum and its Potential Price Effects. (2022). AEGIS Hedging. Recuperado 11 de abril de 2022, de <https://t.ly/amJr>
- [37] En+ Group. (2020, julio). En+ Group Manifiesto | THE GREEN ALUMINIUM VISION. <https://t.ly/YgV5>
- [38] Rio Tinto. (2021, 3 febrero). Rio Tinto launches START: the first sustainability label for aluminium using blockchain technology. Recuperado 11 de abril de 2022, de <https://t.ly/la1R>

- [39] Rio Tinto. (2021a). START RESPONSIBLE ALUMINIUM Empowering a sustainable future. START Responsible Aluminium. <https://t.ly/RrHj>
- [40] International Aluminium Institute. (2017, junio). Life Cycle Inventory (LCI) Data and Environmental Metrics. International Aluminium. Recuperado 23 de mayo de 2022, de <https://t.ly/FIOr>
- [41] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (s. f.). Residuos mineros. Recuperado 30 de mayo de 2022, de <https://t.ly/kMDu>
- [42] Martínez Martínez, S. & Universidad de Jaén. (2014). Valorización de lodos rojos residuales de la producción de aluminio para la fabricación de cementos belíticos. conama2014. <https://t.ly/tLk8>