

Trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 en ArcelorMittal Costa Rica

Traceability of the steel rod for construction # 3 in ArcelorMittal Costa Rica

Alberto Vásquez-Granados¹, Lilliana Abarca-Guerrero²

*Fecha de recepción: 27 de mayo de 2017
Fecha de aprobación: 9 de setiembre de 2017*

Vásquez-Granados, A; Abarca-Guerrero, L. Trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 en ArcelorMittal Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. Vol. 31-1. Enero-Marzo 2018. Pág 131-143.

DOI: 10.18845/tm.v31i1.3503



- 1 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Ingeniero Ambiental, investigador con licenciatura en Ingeniería Ambiental. Correo electrónico: avasquezgranaodos@gmail.com
- 2 Escuela de Química, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Química, docente e investigadora. Correo electrónico: labarca@itcr.ac.cr

Palabras clave

Análisis de Ciclo de Vida; Declaración Ambiental de Producto; Trazabilidad; Acero Estructural.

Resumen

La industria constructiva transforma materias primas en productos elaborados o semielaborados. Dentro de ésta se encuentra la industria del acero, a la cual se le atribuyen grandes impactos ambientales por la intensidad en el uso de recursos durante su proceso productivo. Para determinar dichos impactos existen hoy día metodologías como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que permite cuantificar y evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a procesos o productos durante las etapas de su existencia. En el presente estudio se determinó la trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 en la empresa ArcelorMittal Costa Rica, en las etapas de producción y transporte del lingote de acero y la producción y transporte de la varilla de acero. Se creó un inventario de las entradas y salidas de cada etapa del ciclo de vida y se evaluó mediante el software SimaPro 8.2.3, empleando las bases de datos de Ecoinvent. Con la evaluación de impacto de ciclo de vida (EICV), se obtuvo que los mayores impactos se produjeron en la etapa de producción del lingote de acero, como consecuencia del uso de materias primas vírgenes. Durante el transporte del lingote se determinó que el transporte en tren genera más impacto que el transporte en buque por kilómetro recorrido transportando una tonelada del material. Para la etapa de producción de la varilla los mayores impactos se asocian a la emisión de gases desde la chimenea del horno. Finalmente, en el transporte de la varilla se demostró que a mayor peso transportado se consume más combustible, por lo que existe una proporcionalidad.

Keywords

Life Cycle Assessment; Environmental Product Declaration; traceability; structural steel rode.

Abstract

The construction industry aims to transform raw materials into semi-finished or finished products. Within this is the steel industry to which major environmental impacts are attributed due to the intensity of use of resources during their raw material extraction, production processes and alike. To determine those impacts some methodologies are available such as Life-Cycle Assessment (LCA), which allows quantifying and assessing the potential environmental impacts associated with processes or products during stages of its existence. In the present study, the traceability of construction steel rod #3 was determined in ArcelorMittal Costa Rica for the stages of production and transportation of raw material and production and transportation of the steel rod. An inventory of inputs and outputs of each stage of the life cycle was created which was evaluated by SimaPro 8.2.3 software, using the Ecoinvent databases. The results of the life cycle impact assessment (LCIA), revealed that the greatest impacts of the entire system occurred at the stage of steel ingots production due to the raw materials. It was also determined that during the transport stage, the use of the train generates more impacts than the transport by boat per kilometer transporting a ton of material. For the rod production phase, the biggest impacts associated are related to the gas emission from the furnace chimney. Finally, in the transport of the steel rod showing proportionality, more fuel is consumed when greater weight is transported.

Introducción

El desarrollo industrial en un territorio puede facilitar la reactivación de la economía y mejorar la calidad de vida de la población. Pero tiene el potencial de modificar significativamente el entorno y causar efectos negativos sobre el agua, suelo, aire y los seres vivos. A partir de ello se define que cualquier alteración ocasionada por la actividad humana sobre el medio ambiente se conoce como *impacto ambiental* [1].

Una de las industrias a las que se le asocian muchos impactos ambientales en la actualidad es la *industria de la construcción*, ya que involucra actividades como la extracción y procesamiento de materias primas vírgenes (desde la naturaleza), transporte de los materiales, construcción de infraestructura, operación, demolición y disposición final de los residuos que se generan en cada actividad. Dichas acciones consumen grandes cantidades de recursos, tanto materiales como energéticos. Esta industria es responsable de al menos la tercera parte de las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, del 40% de los residuos sólidos producidos [2], el consumo del 40% de la energía producida y del 12% del agua potable. Específicamente en Costa Rica este sector contribuye anualmente con 283 000 toneladas de CO₂ eq (unidad comparable para medir impacto ambiental) [3].

El sector de la construcción utiliza el acero intensivamente. Éste es una aleación de hierro, carbono y pequeñas cantidades de otros elementos que le añaden características específicas [4]. Su uso le permite conocerse como *Acero estructural*. Para el año 2014, el 51% de su producción mundial se empleó en la construcción de viviendas e infraestructura [5].

Costa Rica no produce acero, pero empresas como ArcelorMittal Costa Rica importan *lingotes de acero* desde otros países para producir y colocar en el mercado nacional e internacional materiales acabados como las *varillas de acero para la construcción #3*, las cuales son empleadas como refuerzo para el concreto durante la construcción [6].

La fabricación de este producto impacta potencialmente el ambiente debido al uso de recursos energéticos y materiales. Para determinar ese impacto, se pueden utilizar metodologías que permiten medir su calidad ambiental, siendo una de ellas el *Análisis de Ciclo de Vida (ACV)*. El ACV es un proceso objetivo que evalúa las cargas ambientales asociadas con un proceso, producto o servicio, mediante la identificación y cuantificación de la energía, materiales consumidos y de los residuos generados al ambiente, con la finalidad de evaluar e implementar mejoras ambientales [7].

Sin embargo, en Costa Rica la aplicación de los ACV en los diferentes sectores industriales, incluyendo el de construcción, es aún incipiente [8]. Debido a lo anterior, el objetivo del estudio es determinar la trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 y sus impactos ambientales potenciales en las etapas de producción y transporte del lingote de acero y la producción y transporte de la varilla de acero en la empresa ArcelorMittal Costa Rica.

Metodología

La metodología para realizar el estudio se basa en lo establecido en las Normas ISO 14040 y 14044, donde inicialmente se realiza la *Definición del planteamiento y alcance del ACV*. Se especifican los siguientes términos:

Unidad Funcional: Producir una tonelada de Varilla de Acero para Construcción #3 en la empresa ArcelorMittal Costa Rica.

Flujo de Referencia (FR): $FR = \text{Cantidad de Recursos} \times \text{Peso unitario}$

Sistema de Producto: Varilla de acero para construcción #3 para ser empleada como refuerzo en la construcción con concreto.

Límites del Sistema: Los límites del sistema se encuentran definidos en la figura 1.

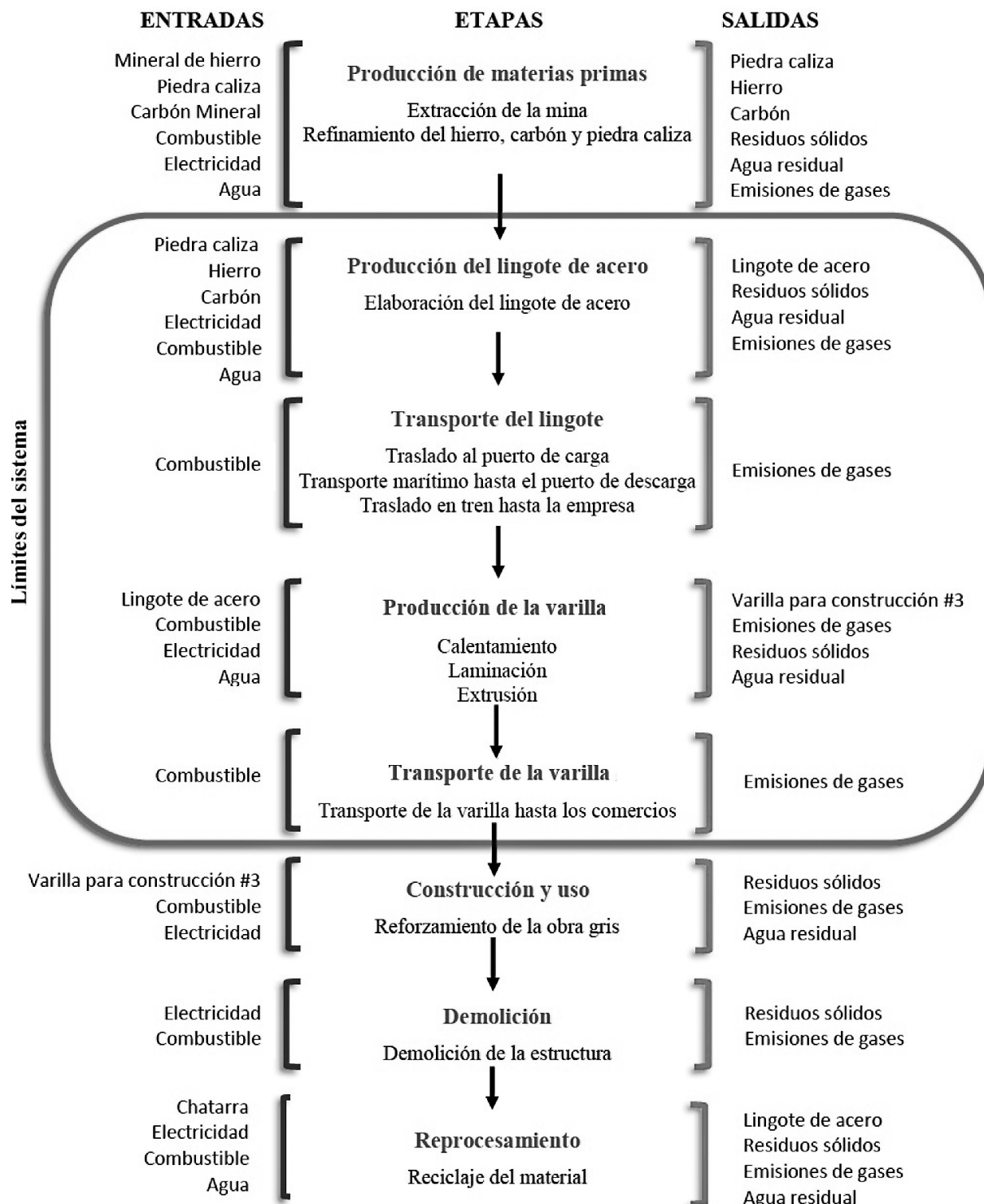


Figura 1. Diagrama de flujo del ACV de la varilla

Procedimientos de Asignación: Con relación a las cantidades en términos de masa y a las entradas significativas de energía en todo el sistema, utilizando los datos aportados por la empresa según el último corte de información del año 2015.

Criterios de Corte: Se promediaron las distancias inferiores al 100 km para obtener el valor de dicha variable en la etapa de distribución de la varilla de acero, puesto que el 80% de su producción anual se distribuyó en distancias inferiores a los 100 km.

Categorías de Impacto Seleccionadas y Metodología de Evaluación de Impacto: El método *ReCiPe* y *Midpoint (H)*. Los factores de caracterización utilizados proceden del método de evaluación seleccionado. Se consideraron las etapas de clasificación y caracterización. Se seleccionaron 14 categorías:

1. Cambio climático
2. Disminución de la capa de ozono
3. Acidificación terrestre
4. Eutrofización de agua dulce
5. Toxicidad humana
6. Formación de oxidantes fotoquímicos
7. Formación de material particulado
8. Ecotoxicidad de agua dulce
9. Ecotoxicidad terrestre
10. Ecotoxicidad marina
11. Transformación de suelo natural
12. Agotamiento del agua
13. Agotamiento de minerales
14. Agotamiento de los combustibles fósiles

Requisitos Iniciales de la Calidad de los Datos:

- Datos aportados por la empresa según el último corte de información del año 2015.
- Datos debidamente respaldados con fichas técnicas e informes de evaluadores contratados por la empresa previo a este estudio.
- Bases de datos empleadas de Ecoinvent versión 3, de la última actualización del Software SimaPro 8.2.3 bajo una licencia académica.
- Cálculo de las distancias recorridas por tierra para el transporte de la varilla mediante Google Maps; para el recorrido marítimo se usó la página web *Sea Rates* con su aplicación "*Port Distances*".

Suposiciones:

- Distancia entre la planta de producción del lingote y el puerto de embarque del mismo es despreciable, ya que el puerto está contiguo a la planta.
- El término *materia prima* hace referencia al lingote de acero o *palanquilla*.
- Cantidades de recursos empleados en producción de palanquilla son establecidas por defecto a partir de las bases de datos de Ecoinvent.



- El término *la empresa* se hace referencia a ArcelorMittal Costa Rica.
- Transporte de lingote por mar mediante buque de carga a base de combustible gasóleo pesado, factor de carga de 80% y para una distancia corta (menor a 5000 km).
- Transporte de lingote en tren es tipo carga a base de diésel de Estados Unidos, modelo 2000, siendo el que se asemeja en las bases de datos al real (GE U11B, año 1979).
- Transporte de carga de 16 a 32 toneladas métricas, según la normativa EURO 3 para el transporte de la varilla desde la empresa hasta los comercios.
- Pérdidas de agua por evaporación durante la producción de la varilla de acero son despreciables, en relación a los volúmenes manejados de este recurso.

Limitaciones:

- Obtención de datos para la producción del lingote desde su origen no pudo realizarse, ya que la fábrica donde anteriormente se producía actualmente no existe.
- Información exacta del buque encargado de traer el lingote hasta Moín, Costa Rica.
- No se encontró un modelo en las bases de datos que se ajustara totalmente al usado en el caso real.
- Análisis de emisiones de gases en chimenea más recientes.
- La licencia académica usada generó limitaciones en análisis como Ponderación y Montecarlo, impidió la manipulación de las gráficas y la exportación de los resultados hacia programas como Excel.
- Inexistencia de elementos relacionados a los tratamientos de aguas residuales y residuos sólidos que emplea la empresa en la base de datos.

Elaboración del inventario de análisis de ciclo de vida

Producción del Lingote de Acero: La empresa indica que la materia prima está compuesta por 10,3% de material reciclado y 89,7% de material virgen. Las entradas para simular esta etapa en SimaPro fueron obtenidas de la base de datos de Ecoinvent versión 3, en contraste con las especificaciones técnicas dadas por la empresa.

Transporte del Lingote de Acero: La distancia marítima recorrida se determinó mediante del sitio web *Sea Rates*, con la herramienta *Port Distantes*. Se omitieron los recursos empleados en la carga y descarga de la materia prima en los puertos.

Producción de la Varilla de Acero: Se realizó una visita guiada a la planta de producción de la empresa en Guápiles. La empresa facilitó los datos de cantidades y tipo de recursos (materiales y energéticos) vinculados a la unidad funcional, proporcionó las especificaciones técnicas de la varilla, certificaciones y protocolos del lingote, estudios y análisis previamente realizados a las emisiones, vertidos y residuos sólidos. Para la variable de energía (electricidad) se creó un modelo en el software, el cual consiste en una matriz energética mixta para Costa Rica y está basada en el Plan de Expansión de la Generación Eléctrica Periodo 2014-2035 proporcionada por el Instituto Costarricense de Electricidad (ICE). La cual se presenta en el cuadro 1 [9].

Transporte de la Varilla de Acero: La información con respecto a modelo de los camiones, las rutas de envío y las cantidades anuales de material distribuido dentro del territorio nacional, fue suministrada por la empresa. Además, empleando la herramienta de *Google Maps* se determinó la distancia recorrida en cada ruta desde la empresa hasta los comercios. Se empleó una plantilla de Excel para trabajar estadísticamente los datos y con esta información se ejecutó el siguiente cálculo:

$$T = P \times D$$

Dónde: T = Transporte de la varilla (tkm)

P = Peso de la carga (ton)⁽¹⁾

D = Distancia recorrida (km)⁽²⁾

⁽¹⁾ El peso de la carga está en relación a la unidad funcional (1 tonelada).

⁽²⁾ La distancia recorrida se tomó como el promedio de las distancias, para las $d < 100$ km, ya que en estas condiciones se presenta el 80% del peso total anual de varilla de acero distribuido.

Cuadro 1. Composición de 1 kWh proporcionado por el ICE en el año 2015 para la etapa de producción de la varilla de acero.

Tipo de generación	Porcentaje de participación (%)	kWh / 1 kWh Mixta
Hidroeléctrica Filo de Agua	34,97	0,3497
Hidroeléctrica Embalse	40,56	0,4056
Térmica (Fuel Oil)	1,05	0,0105
Geotérmica	12,88	0,1288
Eólica	9,81	0,0981
Biomásica	0,72	0,0072
Fotovoltaica	0,01	0,0001

Evaluación del impacto de ciclo de vida del producto

En cada proceso creado en el software se incorporaron los datos obtenidos en el Inventario Ciclo de Vida (ICV), definidos en términos de entradas/salidas. Estos son debidamente convertidos a las unidades requeridas por el software para posteriormente ser asociados a elementos de las bases de datos de los inventarios internacionales disponibles en el software para simular el sistema en estudio. Se asignaron los datos a la designación encontrada bajo el nombre de "Resto del Mundo" (ROW, por sus siglas en inglés), ya que esta designación aplica para países que no cuentan con bases de datos propias.

Interpretación de los resultados del análisis de ciclo de vida

Se analizó la inferencia de las variables del ACV sobre las categorías de impacto seleccionadas. Se logró determinar y analizar en cuáles etapas del ciclo de vida del producto se generaron los principales impactos ambientales potenciales. También permitió explicar el efecto de las limitaciones y suposiciones del estudio.

Verificación de los resultados del análisis de ciclo de vida

Se aplicó un *Análisis de Contribución* de los datos, que está integrado en el software usado, para identificar cuáles entradas/salidas del sistema bajo estudio contribuyeron en mayor o menor medida sobre los procesos o etapas del ciclo de vida. Con esto se verificó si la información obtenida durante la EICV era suficiente para llegar a conclusiones coherentes.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos y encontrados en la figura 2 muestran que durante la fabricación del lingote de acero la mayor carga ambiental corresponde al uso de materia prima virgen la cual se obtiene directamente de la naturaleza. Adicionalmente se le suman los procesos de extracción, el refinamiento del mineral de hierro, el coque y la piedra caliza para la fabricación del hierro. Esto conlleva a una alta demanda de energía eléctrica, gran consumo de combustibles fósiles y la generación de emisiones al aire, suelo y agua afectando en mayor medida la categoría de agotamiento de los minerales (Participación porcentual del 97,7%). El manganeso es el segundo elemento con mayor contribución en esta categoría debido a la extracción del manganeso para ser usado como potenciador de la resistencia mecánica del acero, así como para aprovechar sus propiedades desoxidantes y desulfurantes al fabricar dicho material [10].

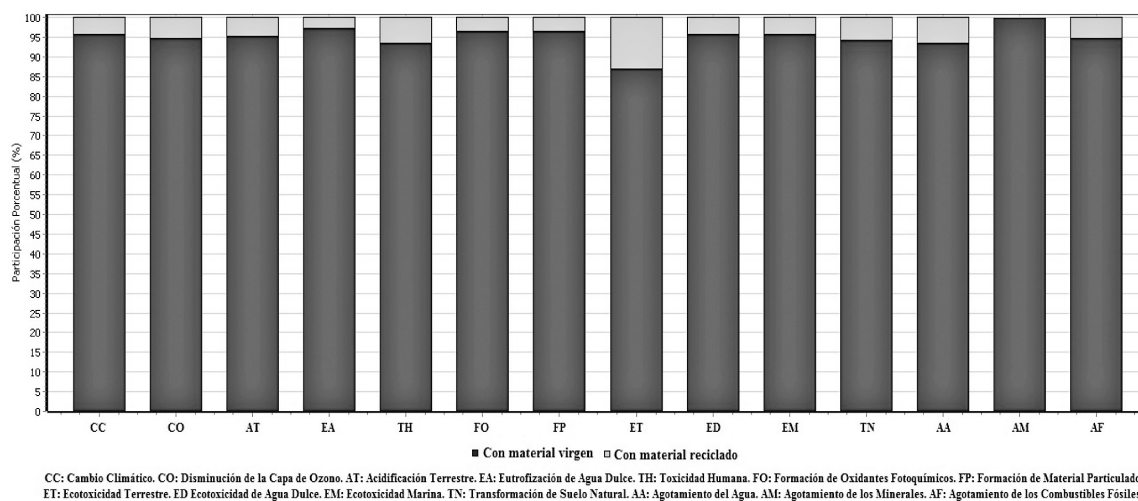
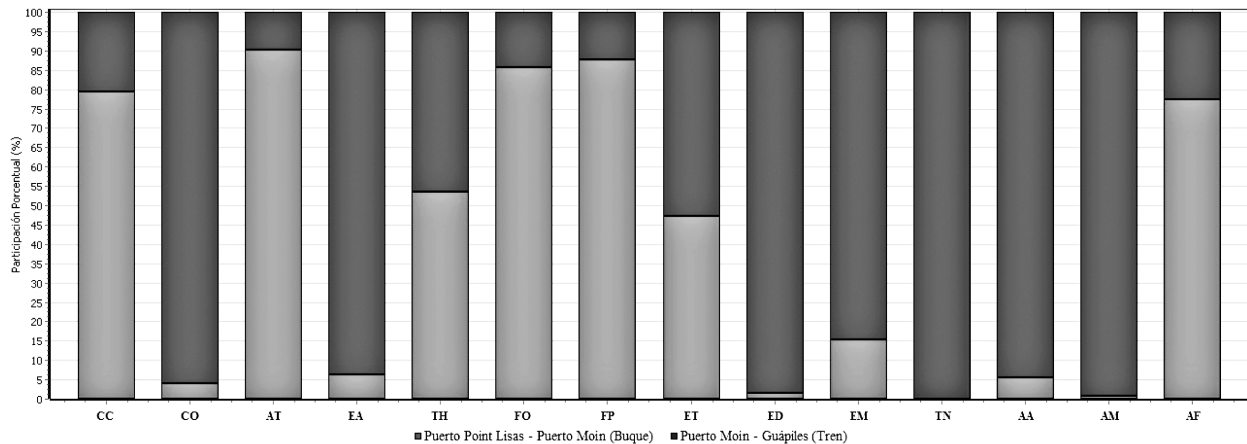


Figura 2. EICV para la Etapa de Producción del Lingote de Acero.

Se observa además que hay impactos importantes en la eutrofización de agua dulce (98%), producto de los fosfatos generados durante la fabricación del acero. Los fosfatos surgen de la combinación del fósforo con el oxígeno del aire. Este es un elemento agregado para aumentar el límite de resistencia, mayor dureza y conceder propiedades anticorrosivas al acero [10]. Los fosfatos deterioran la calidad del agua y aceleran la eutrofización del agua dulce [11]. La figura 2 muestra también que en el proceso de fabricación del acero a partir de material reciclado produce mayor impacto sobre la categoría de ecotoxicidad terrestre (13,4%) ya que el horno de arco eléctrico empleado en esta etapa puede emitir gases y polvo con metales pesados como cadmio, mercurio, plomo, etc., [12]. La sustancia que genera mayor impacto sobre dicha categoría es el mercurio debido a que éste aparece de manera natural en el carbón y demás combustibles fósiles, que al quemarse para producir energía, como materia prima en la producción del lingote de acero, quedando suspendido en la atmósfera y cayendo en el suelo por deposición atmosférica o por arrastre de otras partículas de mayor peso [13].

El transporte marítimo del lingote de acero presenta impactos potenciales importantes sobre la categoría de acidificación terrestre (90,1%) asociándose la deposición atmosférica del NO_x , SO_x , y otras sustancias (figura 3). Los buques usan combustibles a base de petróleo con elevado contenido de azufre para alimentar sus motores liberando dichas sustancias durante la combustión. La deposición de ellas en el suelo se debe a que el lingote provenía desde Trinidad y Tobago donde la ruta marítima recorrida se encontraba relativamente cerca de la

costa, y además que la rotación terrestre desvía los vientos alisios y arrastra las emisiones hacia la costa este del continente. Adicionalmente, se produce acidificación terrestre producto de las actividades terrestres en las zonas portuarias que pueden contaminar el suelo y de los sedimentos [14]. Durante la combustión de los hidrocarburos se emiten a la atmósfera material particulado, oxidantes fotoquímicos y gases de efecto invernadero (GEI) que favorecen al cambio climático. El 80% del comercio mundial se transporta vía marítima, constituyendo el 4% de las emisiones de GEI a mundiales [15].



CC: Cambio Climático. CO: Disminución de la Capa de Ozono. AT: Acidificación Terrestre. EA: Eutrofización de Agua Dulce. TH: Toxicidad Humana. FO: Formación de Oxidantes Fotoquímicos. FP: Formación de Material Particulado. ET: Ecotoxicidad Terrestre. ED: Ecotoxicidad de Agua Dulce. EM: Ecotoxicidad Marina. TN: Transformación de Suelo Natural. AA: Agotamiento del Agua. AM: Agotamiento de los Minerales. AF: Agotamiento de los Combustibles Fósiles.

Figura 3. EICV para la Etapa de Transporte del Lingote de Acero.

El transporte terrestre del lingote de acero se realiza desde el puerto Moín hasta las instalaciones de la planta de producción de la empresa en Guápiles. La categoría que se ve afectada es la de transformación de suelo natural (100%) como consecuencia de los procesos de instalación de la vía ferroviaria, la tala de bosque, desplazamiento de tierra y la construcción de puentes sobre ríos. Dichas actividades generan pérdida de la cobertura vegetal, modifica los drenajes naturales, cambia el nivel freático y erosiona el suelo. En la figura 3 se puede observar un impacto (99,3%) en agotamiento de los minerales ya que al efectuar los cálculos, el software incluye los datos de la producción de la locomotora, vagón y vía del tren, demandando grandes cantidades de minerales como hierro, manganeso, níquel, etc., sumando indirectamente los impactos de esas infraestructuras. Los resultados que se presentan en la figura 3 están basados en el transporte de una tonelada de lingote de acero en buque y tren en sus respectivas distancias. No obstante, los valores numéricos de los impactos ambientales potenciales generados al transportar una tonelada de lingote en un sólo kilómetro en buque y tren varían, puesto que se produce mayor impacto durante el transporte en tren.

Los impactos potenciales asociados a los elementos evaluados en la etapa de producción de la varilla de acero se generan en Costa Rica. En la figura 4 se observa que el uso de bunker (fuel oil) como combustible primario del horno presenta una influencia importante en eutrofización de agua dulce (95,9%) debido a los procesos implícitos de mantenimiento de las maquinarias utilizadas en la quema del combustible, que involucran a la vez su limpieza empleando sustancias como detergentes que contienen fosfatos [16]. En el agotamiento de los combustibles fósiles, el bunker contribuye en un 93,3% debido a que él es un combustible fósil derivado del petróleo y su uso ocasiona su agotamiento.

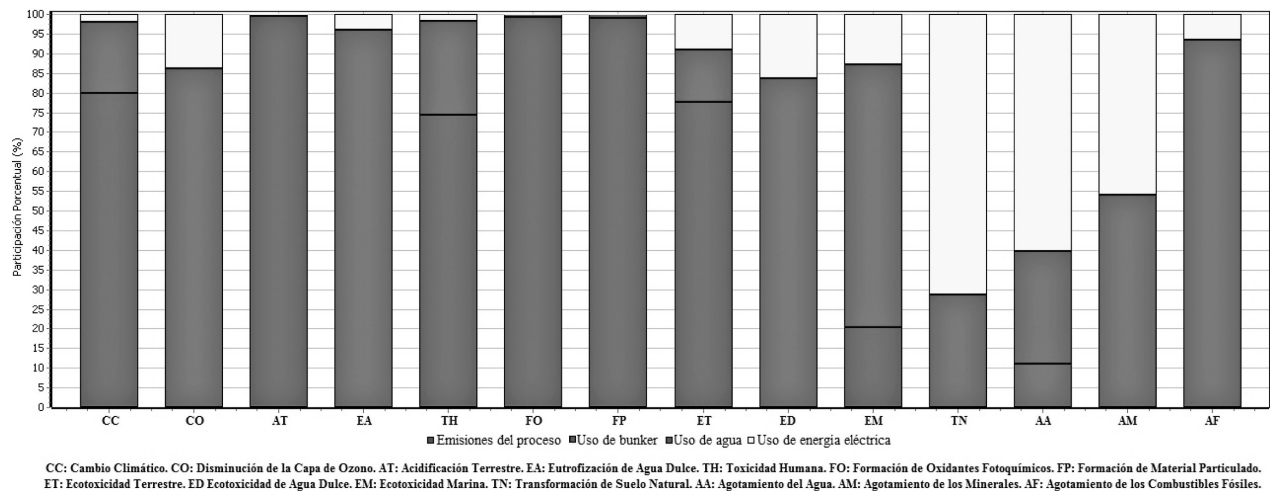


Figura 4. EICV para la Etapa de Producción de la Varilla de Acero.

El consumo de agua genera impacto sobre la categoría de agotamiento del agua, con una participación del 28,7% ya que se utiliza para el enfriamiento del lingote de acero durante el proceso de laminación. El lingote es calentado en el horno para aumentar su maleabilidad, luego se rocía con agua para remover la cascarilla y pasarlo por los rodillos donde se le da forma a la varilla. El agua usada en el proceso proviene de pozo (2%) y de la recolección de agua de lluvia (98%).

El uso de energía eléctrica y su impacto fue analizado. Para lograrlo se determinó la matriz eléctrica del año 2015 en Cosa Rica la cual fue mixta y casi 100% renovable. La entrada de energía para esta etapa se basó en el plan de expansión de la generación eléctrica para el periodo 2014-2035 del ICE. El uso de la energía eléctrica en la producción de la varilla de acero incide en mayor medida sobre la categoría de transformación de suelo natural (71,5%), producto de que al construir una represa hidroeléctrica o de cualquier central de generación eléctrica conlleva una invasión del área natural, movilización de tierra y otros materiales alterando los ecosistemas terrestres. La categoría de agotamiento del agua muestra que el impacto es de 60,4% a causa del uso del agua en las turbinas generadoras de electricidad en el tipo de generación hidroeléctrica, por lo que hay un cambio en el uso del agua y la disminución del caudal natural.

El impacto de las emisiones de gases al producir la varilla muestra la afectación sobre la categoría de acidificación terrestre (99,6%). El análisis de contribución efectuado a esta categoría reveló que el efecto principal es provocado por el NO_2 y el SO_2 . La acidificación terrestre hace referencia a los cambios en las propiedades químicas del suelo. Cuando el NO_2 y el SO_2 en el aire reaccionan con radicales hidroxilos y vapor de agua de la atmósfera pueden generar ácido nítrico y sulfúrico respectivamente, que pueden disolverse en las gotas de agua de la atmósfera y generar lluvia ácida, también puede ocurrir por efecto de la deposición atmosférica, aumentando su potencial de acidificación [17].

La etapa de transporte de la varilla de acero es afectado por una sola variable: transporte en camión. Para la selección de dicha entrada fue necesario usar un criterio de distribución entre las toneladas de varilla (producto terminado) transportadas y la distancia recorrida por dicho producto. Tal criterio se puede apreciar en cuadro 2.

Por otra parte, puesto que en las categorías de impacto seleccionadas el 100% de la participación en cada una de ellas corresponde a la única entrada evaluada, se omitirá la

EICV individual para esta etapa. Sin embargo, se linearizaron los datos de peso transportado y consumo de combustible, de manera que se determinó una relación lineal entre dichos elementos (ver figura 5).

Cuadro 2. Distribución de peso transportado a distintas distancias para la etapa de transporte de la varilla de acero.

Distancia (d) (km)	Promedio de distancias (km)	Promedio de peso transportado (ton)	Peso acumulado (ton)	Porcentaje del peso total (%)
d > 200	252,09	286	2.861	6,81
d > 100	209,94	512	8.701	20,71
d < 100	79,65	1.850	33.308	79,29
d < 50	68,64	1.362	10.896	25,94

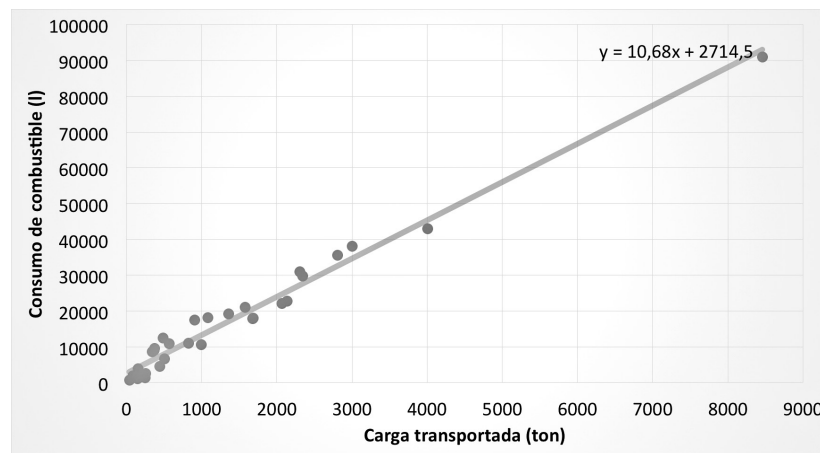


Figura 5. Consumo de combustible por toneladas de varilla transportada.

En la figura 6 se presenta un análisis comparativo entre las distintas etapas analizadas, las categorías evaluadas y la participación porcentual. Se puede apreciar que la etapa de producción del lingote de acero genera el mayor impacto ambiental potencial (100%) en once de las categorías evaluadas. La fabricación de acero primario (materias vírgenes) y secundario (reciclado) produce gran variedad de efectos perjudiciales en el medio ambiente asociado al uso intensivo de energía y materias primas convertidos en emisiones de CO_2 , SO_x , NO_x , material particulado, así como al uso de agua y sus emisiones asociadas [18].

En la figura 6 se puede percibir una leve participación del transporte del lingote y sus efectos, asociándose al uso de combustible en el buque y la locomotora y sus respectivas emisiones a la atmósfera.

La etapa de producción de la varilla de acero tiene una participación mayoritaria (100%) en las categorías de acidificación terrestre, formación de oxidantes fotoquímicos y formación de material particulado, cuyo impacto procede de las emisiones de gases a la atmósfera desde la chimenea.

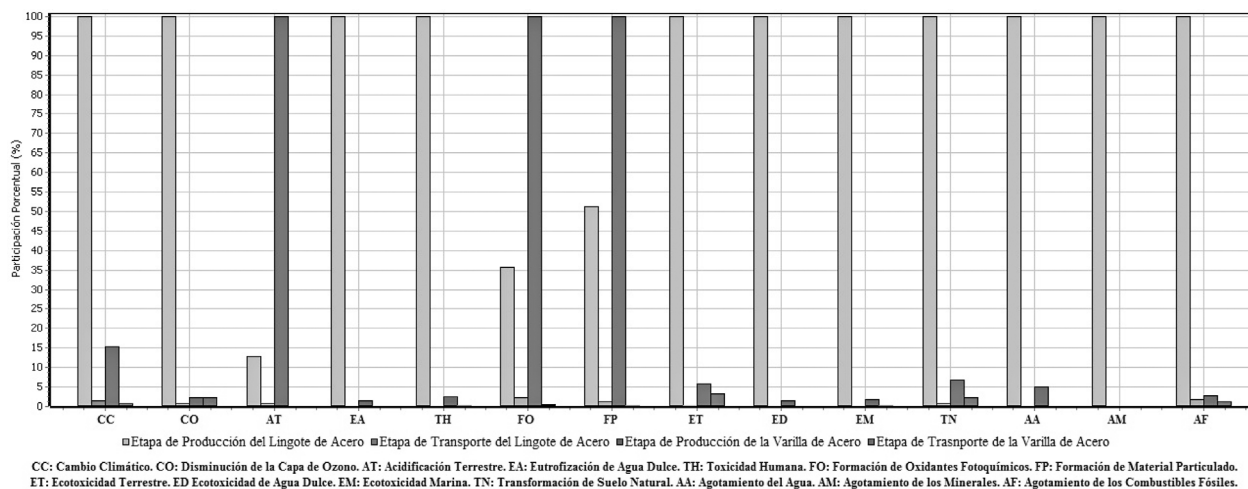


Figura 6. Análisis Comparativo de las Etapas de Producción del Lingote, Transporte del Lingote, Producción de la Varilla y Transporte de la Varilla.

El transporte de la varilla genera un consumo de combustible proporcional a las toneladas de varilla trasladadas en camión. No obstante, la combustión de los combustibles libera a la atmósfera sustancias halogenadas, material particulado y GEI, generando impacto sobre las categorías de cambio climático y agotamiento de la capa de ozono.

Conclusiones

La etapa de producción del lingote es la responsable del 85% del impacto potencial en la mayoría de las categorías evaluadas producto del uso de materias primas vírgenes. Estudios similares reportados en Europa concuerdan con este mismo resultado. Una forma de reducir este impacto sería utilizando más cantidad de material reciclado en el horno de arco eléctrico, pero afectaría las propiedades mecánicas del material.

En la etapa de transporte del lingote de acero, no se puede señalar a uno de los dos medios de transporte, buque o tren, como el más influyente sobre los impactos producidos, ya que cada uno influye de manera distinta sobre las categorías analizadas. El transporte en tren tiene mayor influencia (73%) en una tonelada de acero en un sólo kilómetro recorrido que el transporte en buque.

En la etapa de producción de la varilla de acero, el 43% de los impactos son generados por la emisión de gases a la atmósfera desde la chimenea debido a la ausencia de un sistema de tratamiento de los gases liberados. Otro 43% procede del uso de bunker como combustible para el horno galopante y 14% se asocia al uso de energía eléctrica, aunque este último no es significativo al provenir de una matriz energética casi 100% renovable.

La etapa de transporte de la varilla de acero, genera un impacto ambiental potencial menor al 3% en todo el sistema evaluado.

El enfoque del presente estudio es de la cuna a la puerta, pues comprende información desde la producción de la materia prima hasta la elaboración del producto final. Los resultados generados en la EICV pueden ser empleados como línea base para comparar futuros ACV de productos de acero en Costa Rica. Se concluye además que los valores de participación porcentual no corresponden a la realidad costarricense debido a las limitaciones de la evaluación y las incertidumbres de los datos.

La trazabilidad de la varilla de acero para construcción #3 presentada es de tipo parcial debido a la ausencia de información en ciertas áreas del estudio. Se recomienda continuar con esta línea de investigación y desarrollar una Base de Datos con información relativa a la situación costarricense.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la empresa ArcelorMittal Costa Rica por su apertura para la realización de este proyecto y en especial al señor Mario Brenes por su gran disposición a colaborar. A la Ing. Melissa Díaz e Ing. Natalia Bonilla por su asistencia en todo el proceso y a la Escuela de Química y su Carrera de Ingeniería Ambiental por facilitar acciones que permitieron realizar el presente estudio.

Referencias

- [1] D. Gómez, M. Gómez, *Evaluación de impacto ambiental*. España: Mundi-Prensa, 2013.
- [2] L. Starke, *La situación del mundo, 2007*. Barcelona: Icarí, 2007.
- [3] D. Araujo, C. Coto, D. Guzmán, M. Herrera. (2016) Metodología e instrumentos para la medición de huella de carbono. [Online]. Available: <http://www.bienalcostarica.com/e-0201.html>
- [4] *Manual de Diseño para Construcción con Acero*, AHMSA, México, 2013.
- [5] C. Marín. (2014) Análisis del Mercado del Hierro y Acero. Accessed october 2016. [Online]. Available: http://www.metalactual.com/revista/35/actualidad_analisis.pdf
- [6] Leandro, A.G. (2015). Comunicación personal sobre consumo de varilla de acero #3 en Costa Rica.
- [7] SETAC., "World Congress/SETAC Europe 22nd Annual Meeting: Abstract Book", 2012, Brussels.
- [8] M. Díaz, "Evaluación del desempeño ambiental del edificio de residencias estudiantiles del Instituto Tecnológico de Costa Rica en las etapas de producción de materias primas, construcción y ocupación", Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 2016.
- [9] *Boletín Informativo: Mercado Eléctrico Regional y Sistema Eléctrico Nacional*, ARESEP, San José, Costa Rica, 2015.
- [10] C. Cházaro, O. Alvarez. (s.f) Elección del tipo de acero para estructuras. Accessed march 2015. [Online]. Available:http://www.gerdaucorsa.com.mx/articulos/Eleccion_del_Tipo_de_Acero_para_Estructuras.pdf
- [11] A. Abid, G. Sarvejeet, *Eutrophication: causes, consequences and control*, 2nd ed. New York, USA: Springer, 2013.
- [12] A. Moffit, *Hierro y acero. Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales Subdirección General de Publicaciones, 3rd ed., Madrid, España, 2001.
- [13] EPA. (2016) Información básica sobre el mercurio. Accessed october 2016. [Online]. Available: <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-el-mercurio>
- [14] A. Miola, B. Ciuffo, E. Giovine, M. Marra. (2010) Regulating Air Emissions from Ships: The State of the Art on Methodologies, Technologies and Policy Options. Accessed october 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/jrc_reference_report_2010_11_ships_emissions.pdf
- [15] ONU. (2009) El transporte marítimo y el reto del cambio climático. Accesed october 2016. [Online]. Available: http://unctad.org/es/Docs/cimem1d2_sp.pdf
- [16] M. Capó, *Principios de ecotoxicología: Diagnóstico, tratamiento y gestión del medio ambiente*. Madrid, España: Tébar, 2007.
- [17] L. Azevedo, P. Roy, F. Verones, R. Van Zelm, M. Huijbregts, A. Chaudhary, N. Cosme, P. Fantke, et al. (2015) LC-Impact: Terrestrial Acidification. Accessed october 2016. [Online]. Available: http://www.lc-impact.eu/downloads/documents/Overall_report_Batch_1_FINAL.pdf
- [18] M. Cadavid, "Análisis de ciclo de vida (ACV) del proceso siderúrgico", Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, 2014.