

	<b>UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA</b>			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
<b>FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO</b>	<b>F-AC-DBL-007</b>	<b>10-04-2012</b>	<b>A</b>	
Dependencia	Aprobado		Pág.	
<b>DIVISIÓN DE BIBLIOTECA</b>	<b>SUBDIRECTOR ACADEMICO</b>		<b>i(115)</b>	

### RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	<b>YURGEN ELI PEDROZA PALLARES, YINETH XIMENA ARENA PAEZ</b>		
FACULTAD	<b>INGENIERIAS</b>		
PLAN DE ESTUDIOS	<b>INGENIERIA CIVIL</b>		
DIRECTOR	<b>MSc ALEXANDER ARMESTO ARENAS</b>		
TÍTULO DE LA TESIS	<b>ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO Y ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN EN EL USO DE LOS MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN LA CONSTRUCCIÓN</b>		
RESUMEN (70 palabras aproximadamente)			
<p>EN EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACIÓN, SE DESARROLLÓ UN ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO Y ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN A LOS 5 MATERIALES PRINCIPALES DE LA CONSTRUCCIÓN (CEMENTO, ACERO, ALUMINIO, PVC Y MAMPOSTERIA), QUE GENERAN MÁS IMPACTO AMBIENTAL Y SE IMPLEMENTÓ COMO CASO DE ESTUDIO EN EL BLOQUE DE FACULTAD DE INGENIERÍAS DE LA UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA, CON LA FINALIDAD DE OBTENER LA HUELLA DE CARBONO GENERADA DURANTE SU CONSTRUCCIÓN.</p>			
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 115	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM: 1



**ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO Y ALTERNATIVAS DE MITIGACIÓN EN  
EL USO DE LOS MATERIALES MÁS UTILIZADOS EN EL SECTOR DE LA  
CONSTRUCCIÓN**

**AUTORES**

**YURGEN ELI PEDROZA PALLARES**

**YINETH XIMENA ARENAS PAEZ**

**Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR**

**ALEXANDER ARMESTO ARENAS**

**MAGISTER**

**UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**INGENIERIA CIVIL**

**Ocaña, Colombia**

**Agosto, 2019**

## DEDICATORIA

Mi proyecto se lo dedico primero a Dios, porque él fue la luz que me guio en este largo camino...

A mis padres Yohana Páez Rincón y Libardo Arenas Gómez, porque ellos fueron mi mayor fuente de motivación para superarme y salir adelante, aunque el camino fue duro, nunca perdieron la esperanza en mí.... Sus voces de aliento me ayudaban a salir de cada obstáculo que la vida me presentaba, gracias por su confianza, comprensión, cariño y amor... Este triunfo es de ustedes.

A mis abuelos, Ramón Torrado, Cecilia Rincón, Apolinar Arenas y María Estela Gómez, muchas gracias por su apoyo en mi formación como Ingeniera Civil.

A mis amigos Remy Herrera Peinado, Karen Lorena Arias y a mi ahijada Janna Sofía, gracias por su ayuda y motivación.

¡A todos, muchas gracias!

Yineth Ximena Arenas Páez

Este proyecto es el resultado de un arduo esfuerzo y dedicación. Gracias Dios por bendecirme siempre en mi vida y más en esta etapa que comienzo.

A mí mamá, María Trinidad Pallares, que con su amor me ha enseñado a salir adelante, por la paciencia que me ha tenido para enseñarme, por el amor incondicional que me ha dado, por el cuidado y atención que me brinda en el tiempo que hemos vivido juntos, por los regaños que merecía y que no entendía, sobre todo, por estar en este momento tan importante de mi vida.

A mi hermana, Marilú Pedroza Pallares, gracias por su paciencia, gracias por preocuparse por mí, y por tantas ayudas y tantos aportes no solo para el desarrollo de mi proyecto de grado, sino también para mi vida.

A mi amigo Albert Arley Pino a quien le debo muchísimo por su amistad y por haberme acompañado y aconsejado a lo largo de este camino.

Yurgen Eli Pedroza Pallares

## AGRADECIMIENTOS

Gracias a nuestro director Alexander Armesto Arenas, por su colaboración y dedicación.

¡¡¡A mi compañero Yurgen Eli Pedroza, gracias por su amistad y dedicación... lo logramos!!!

Yineth Ximena Arenas Páez

Doy mis más sinceros agradecimientos a todas las personas y aquella persona que estuvo involucrada en un inicio de este proyecto de grado y por circunstancia de la vida no me pudo acompañar en el desarrollo del mismo...

Al ingeniero Alexander Armesto Arenas, por su tiempo y dedicación en la elaboración de este trabajo, quien estuvo al tanto de todo el proceso que se llevó a cabo en el proyecto, dando sus consejos y recomendaciones.

Yurgen Eli Pedroza Pallares

## Índice

<b>Capítulo 1. Fundamento de la Investigación</b> .....	1
<b>Capítulo 2. Factores de Emisión de Carbono</b> .....	8
2.1 Cemento.....	8
2.1.1 Caracterización del producto.....	8
2.1.2 Factor de emisión del cemento.....	10
2.2 Aluminio.....	19
2.2.1 Caracterización del producto.....	19
2.2.2 Factor de emisión del aluminio.....	21
2.3 Acero .....	31
2.3.1 Caracterización del producto.....	31
2.3.2 Factor de emisión del acero.. ..	34
2.4 Tubería PVC.....	45
2.4.1 Caracterización del producto.....	45
2.4.2 Factor de emisión de la tubería PVC.....	46
2.5 Mampostería .....	54
2.5.1Caracterización del producto. ....	54
2.5.2 Factor de emisión de la mampostería. ....	57
<b>Capítulo 3. Análisis de Varianza</b> .....	65

<b>Capítulo 4. Estudio de Resultados</b> .....	70
4.1 Área de estudio .....	70
4.2 Evaluación de impacto .....	74
4.3 Emisiones de CO2 incorporadas en los materiales de construcción .....	77
4.4 Análisis de la huella de carbono .....	78
4.5 Alternativa de mitigación .....	79
<b>Capítulo 5. Conclusiones</b> .....	82
Recomendaciones .....	85
Referencias .....	87

## Lista de Tabla

Tabla 1. Cantidad de cemento producido por región, por etapa de proceso para el año 2017 .....	11
Tabla 2. Emisiones estimadas de contaminantes del aire de la industria del cemento de China (2005e2008) .....	13
Tabla 3. Emisiones estimadas de la etapa de proceso del cemento .....	13
Tabla 4. Emisiones de tonCO <sub>2</sub> /ton relacionadas con el proceso de producción de cemento por región .....	15
Tabla 5. Estimaciones de factores de emisiones de tonCO <sub>2</sub> /ton por regiones clave productoras de cemento .....	16
Tabla 6. Estimaciones de factores de emisiones de los GEI para Colombia en el 2008 .....	17
Tabla 7. Factores de emisión de tonCO <sub>2</sub> /ton de cemento por etapas de proceso .....	18
Tabla 8. Factores de emisión ponderados en la producción de cemento por región .....	18
Tabla 9. Cantidad de aluminio producido por región, por etapa de proceso y tipo de tecnología .....	22
Tabla 10. Emisiones de GEI por tipo de tecnología y cantidad producida de aluminio .....	23
Tabla 11. Emisiones de GEI del sector de alúmina y aluminio (MMTCO <sub>2</sub> E) .....	24

Tabla 12. Emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes procesos de producción de aluminio.....	25
Tabla 13. Emisiones de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), metano(CH <sub>4</sub> ), tetrafluorometano(CF <sub>4</sub> ), tetrafluoroetileno(C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) a partir de diversos procesos de producción de aluminio.....	26
Tabla 14. Factores de emisión de CO <sub>2</sub> e promedio de las etapas de producción de aluminio.....	27
Tabla 15. Energía incorporada, emisiones y combinación de energía de la producción de aluminio de diferentes bases de datos de ACV.....	28
Tabla 16. Energía incorporada y emisiones de CO <sub>2</sub> de la producción de aluminio de diferentes bases de datos de ACV.....	30
Tabla 17. Factores de emisión de PFC ponderados en la producción por región.....	30
Tabla 18. Factores de emisión ponderados en la producción de aluminio por región.....	31
Tabla 19. Cantidad de acero producido por regiones para los últimos ocho años.....	36
Tabla 20. Cantidad de acero producido por regiones, por etapa de proceso en millones de toneladas para el 2017.....	36
Tabla 21. Comparación del consumo de energía en las etapas de proceso (Gj/ton) para el año 2008.....	38
Tabla 22. Comparación de las emisiones de tCO <sub>2</sub> /t en la producción de Hierro-acero.....	38

Tabla 23. Intensidades de CO2 relacionadas con la energía para la industria del hierro y el acero en China, Alemania, México y los EE. UU. (2010) .....	40
Tabla 24. Intensidades de energía y emisiones de CO2 de los procesos de producción de acero. ....	42
Tabla 25. Energía incorporada y emisiones de CO2 de la de producción de acero.....	43
Tabla 26. Energía incorporada y emisiones de CO2 de la producción de acero de diferentes bases de datos de ACV .....	44
Tabla 27.. Factores de emisión ponderados en la producción primaria de acero por región .....	44
Tabla 28 Cantidad de tubería de PVC producido por regiones para el año 2017 .....	48
Tabla 29. Energía incorporada y emisiones de CO2 de la de producción de acero 2017.....	49
Tabla 30. Factores de emisiones de CO2 del PVC en España.....	51
Tabla 31. Factores de emisión de SEFA para el cloruro de polivinilo .....	52
Tabla 32. Factores de emisión de SEFA para el cloruro de polivinilo .....	53
Tabla 33. Energía incorporada y emisiones de CO2 de la producción de acero de diferentes bases de datos de ACV .....	53
Tabla 34. Factores de emisión ponderados en la producción primaria de PVC por región.....	54
Tabla 35. Producción de ladrillo mundial.....	58

Tabla 36. Resumen de los factores de emisión basados en el combustible (ton / ton de combustible) de diferentes contaminantes en este estudio en comparación con estudios anteriores.....	60
Tabla 37. Factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero del proceso de producción del ladrillo (ton/Ton Ladrillo producido).....	61
Tabla 38. Energía incorporada, emisiones y combinación de energía de la producción de ladrillos cerámicos de diferentes bases de datos de ACL. ....	62
Tabla 39. Factores de emisión basados en la producción de ladrillos con y sin biosólidos .....	63
Tabla 40. Factores de emisión ponderados en la producción primaria de mampostería por región .....	64
Tabla 41. Resumen de factores de emisión promedio del cemento .....	65
Tabla 42. Análisis de varianza del cemento.....	66
Tabla 43. Resumen de factores de emisión promedio del aluminio .....	66
Tabla 44. Análisis de varianza del aluminio .....	66
Tabla 45. Resumen de factores de emisión promedio del acero.....	67
Tabla 46. Análisis de varianza del acero .....	67
Tabla 47. Resumen de factores de emisión promedio del PVC.....	67

Tabla 48. Análisis de varianza del PVC .....	68
Tabla 49.. Resumen de factores de emision promedio de la mampostería .....	68
Tabla 50. Análisis de varianza de la mampostería.....	68
Tabla 51. Factor de emisión determinado para cada material .....	69
Tabla 52. Cantidades de obra cimentaciones y estructura principal piso 1 .....	75
Tabla 53. Cantidades de obra estructura principal piso 2,3 y cubierta .....	76
Tabla 54. Cantidad total de material .....	77
Tabla 55. Emisiones de CO2 incorporadas en los materiales de construcción.....	78

## Lista de Figura

Figura 1. Producción anual global de aluminio en los últimos 11 años. ....	20
Figura 2. Producción de acero bruto 2001-2008 (1000 toneladas métricas) .....	32
Figura 3. Producción mundial de acero inoxidable desde 2005 hasta 2017 (en 1,000 toneladas métricas).....	32
Figura 4. Intensidades de CO2 para la producción de EAF y BF / BOF en China, Alemania, México y los Estados Unidos en 2010. ....	40
Figura 5. Planta estructural piso 2 y 3 edificio facultad de ingenierías .....	71
Figura 6. Planta estructural cubierta edificio facultad de ingenierías .....	71
Figura 7. Corte típico longitudinal edificio facultad de ingenierías .....	72
Figura 8. Planta arquitectónica cubierta edificio facultad de ingenierías .....	72
Figura 9. Planta arquitectónica piso 1 y 2 edificio facultad de ingenierías.....	73
Figura 10. Sistema hidrosanitario piso 1,2 y 3 edificio facultad de ingenierías .....	73
Figura 11. Sistema sanitario y de aguas lluvias edificio facultad de ingenierías.....	74

## Introducción

La adaptación al cambio climático a lo largo del tiempo se ha convertido en unas de las principales problemáticas ambientales para la comunidad internacional debido a los efectos drástico que han generado las emisiones continuas de gases de efecto invernadero(GEI). De acuerdo a estudios recientes, la acumulación de gases en la atmósfera es la principal causa de este calentamiento (Arroyo et al., 2015, p. 18). Si bien los gases del efecto invernadero son necesarios para conservar la temperatura adecuada para el desarrollo de la vida tal como se conoce, según Arroyo (2015, p. 18) explica que las emisiones de carbono, que en su mayoría se derivan de diferentes sectores aumentan la proporción de estos gases en niveles que le dificultan a los sistemas de vida lograr una pronta adaptación a las condiciones que los rodean.

Uno de los sectores que causan más impacto en el medio ambiente es la construcción, donde la mayor parte de los materiales utilizados provienen de la minería y de la tala de árboles, además del uso de grandes extensiones de terreno y maquinaria pesada. United Nations Environment Programme (UNEP, 2012) afirma “El sector de la construcción, a nivel mundial, contribuye hasta en un 40% de las emisiones de GEI, principalmente por el uso de energía de los materiales empleados durante la vida útil de los edificios durante su construcción”. Las emisiones de GEI procedentes de la fase de construcción están generalmente relacionadas con la energía incorporada en el edificio y se pueden generar en dos etapas de su ciclo de vida: a) durante la fabricación de los materiales y b) durante la construcción del edificio(Roche, 2010).

Los materiales que necesitan más energía para producirse, como el acero, la mampostería, las tuberías PVC, el aluminio y el cemento, por lo general son responsables de un mayor número de emisiones que materiales como la piedra, la grava, arena o la madera.

Los materiales locales generalmente producen menos emisiones que los materiales que tienen que ser transportados desde distancias mayores. El proceso de construcción que generalmente se concentra en un corto período de tiempo (1-2 años), causa el impacto ambiental más intenso, afecta a las emisiones incorporadas en el material, y un sistema de construcción eficiente, racional y de semi-prefabricados generará menos emisiones que un proceso de construcción ineficiente. Este impacto se reduce cuanto más se considera la vida útil del edificio; sin embargo, las decisiones tomadas durante esta fase influyen en gran medida en los resultados de las otras fases del ciclo de vida del edificio.

Por tal motivo es importantes que las emisiones procedentes de los materiales en la construcción sean controladas. En los últimos años se han desarrollado varias herramientas de cuantificación y metodologías para determinar el nivel de emisiones de individuos, organizaciones y unidades administrativas o territoriales, y la huella de carbono es una de ellas (Padgett, Steinemann, Clarke, & Vandenberg, 2008). La huella de carbono es una herramienta que se encarga de analizar y cuantificar la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), actualmente en la UFPSO no se registran ningún estudio de análisis de la huella de carbono a los materiales de construcción más utilizados en las obras que se han ejecutado.

En el presente proyecto se plantea el análisis de la huella de carbono y alternativas de mitigación en el uso de los materiales de construcción más utilizados, por los métodos de

revisiones bibliográficas y tablas de datos de estudios realizados, con el objetivo de obtener los factores de emisión CO<sub>2</sub> producido por cada material de construcción principales en obra (cemento, mampostería, tubos de PVC, acero y aluminio), para ello se extrae la información para cada región, por etapas de proceso o por energía consumida (Gigajoule por Ton) en la fabricación de dicho material, luego se estructura una tabla general donde contendrá los factores de emisión resumidos para la producción primaria para cada región del correspondiente material.

Al determinar los factores de emisión de CO<sub>2</sub> por ambos métodos, se hacen un análisis estadístico comparativo entre los factores de emisiones presentados para cada región por cada material de estudio mediante un análisis de varianza, y posteriormente se muestra una aplicación de un estudio de caso al bloque de Facultad de Ingenierías de la UFPSO como escenario para el análisis del cálculo de la huella de carbono.

La metodología a desarrollar se basa en la recopilación de información de estudios de diferentes regiones (América del norte, América del sur, Asia, Oceanía y Europa), realizados sobre el cálculo de la huella de carbono y la selección de los materiales para la construcción, basado en la metodología del cálculo de la huella de carbono Pas 2050 en dicha guía se describen las formulas a emplear. El método no incluye base de datos de factores de emisión (salvo para el cambio de uso de suelo en algunos países), por eso en los estudios se justifican el origen de los factores de emisión utilizados para los materiales de construcción más utilizados.

Estos estudios serán extraídos de bases de datos científicas reconocidas internacionalmente (Web of Science, Research Gate, Sience Direct, Scopus, CSIC), en la cual, la información depositada es analizada y verificada para posteriormente ser aplicada. La utilización de estas

bases de datos es fundamental para buscar, encontrar y consultar las publicaciones científicas más significativas para la elaboración y desarrollo de nuestro proyecto.

Se abordarán publicaciones realizadas a partir del año 2005, año en que entro en vigor el convenio de las naciones unidas sobre el cambio climático (Protocolo de Kyoto), hasta el año actual, donde se analizaran y se clasificaran los diferentes estudios de acuerdo a los materiales de investigación, el país de origen y su autor, con la finalidad de obtener valores de factores de emisión recientes, confiables y tener un mejor control de los datos obtenidos mediante esta metodología.

## Capítulo 1. Fundamento de la Investigación

Para la elaboración de esta investigación se hace necesario los antecedentes de estudios similares sobre el análisis de la huella de carbono de diferentes materiales de construcción o el análisis de la huella de carbono en la etapa de construcción de un edificio de estudio de caso como modelos que fundamenten el presente estudio, como se relacionan a continuación:

(Syngros, Balaras, & & Koubogiannis, 2017), realizó un estudio sobre “Emisiones de CO<sub>2</sub> incorporadas en materiales de construcción de edificios de viviendas helénicas” de la ciudad de Atenas-Grecia, en su trabajo los autores describen la importancia de minimizar el consumo total de energía y el impacto ambiental de un edificio durante su ciclo de vida. Este documento identifica los materiales de construcción básicos y estima su impacto ambiental en términos de CO<sub>2</sub>. Los resultados proporcionan indicadores de línea de base prácticos para la contribución de cada material en términos de masa y CO<sub>2</sub>. Finalmente, en uno de los casos se demuestra el tiempo de recuperación de CO<sub>2</sub> relacionado con el reemplazo de las aperturas de edificios para mejorar su rendimiento energético.

Así mismo (Biswas, 2014, págs. 179–186), realizó un estudio sobre “Huella de carbono y evaluación del consumo de energía incorporada en obras de construcción en Australia Occidental”, de la ciudad de Western –Australia, en su trabajo el autor describe una metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA) para las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del ciclo de vida y el análisis de energía del Pabellón de Ingeniería (en adelante, Edificio 216), en la Universidad Curtin, en el oeste de Australia. La universidad utiliza un sistema de gestión de edificios (BMS) para reducir su consumo de energía operacional este sistema ha desempeñado

un papel importante en la reducción del consumo total de energía del edificio (es decir, un 20% menos que el promedio de la universidad).

De igual manera (Yan, Shen, Fan, Wang, & Zhang, 2010, págs. 949–955), realizo un estudio sobre “Emisiones de gases de efecto invernadero en la construcción de edificios: un estudio de caso de One Peking en Hong Kong”, de la ciudad de Hong Kong-Japón, en su trabajo los autores describen cuatro fuentes de emisiones de GEI en la construcción de edificios, que son: fabricación y transporte de materiales de construcción; consumo de energía de equipos de construcción; consumo de energía para el procesamiento de recursos; y la eliminación de los residuos de construcción, y luego establece el método de cálculo de las emisiones de GEI.

Los resultados muestran que el 82–87% del total de las emisiones de GEI provienen de las emisiones de GEI incorporadas de los materiales de construcción, el 6–8% provienen del transporte de materiales de construcción y el 6–9% se deben al consumo de energía del equipo de construcción y concluye indicando que las emisiones de GEI incorporadas de concreto y acero reforzado representan el 94–95% de todos los materiales de construcción, y por lo tanto el uso de materiales de construcción reciclados, especialmente acero reforzado, disminuiría las emisiones de GEI en una cantidad considerable.

Por otra parte (Huang, Li, Cui, Huang, & Lin, 2017, págs. 1007–1017), realizo un estudio sobre “Huella de carbono y reducción de emisiones de carbono en edificios urbanos: un caso de estudio en la ciudad de Xiamen, China”, en su trabajo los autores describen que el sector de la construcción es uno de los mayores contribuyentes a la emisión de gases de efecto invernadero en áreas urbanas. Este estudio desarrolla una metodología de cálculo para la contabilidad de la

huella de carbono de los edificios urbanos y una estrategia de baja emisión de carbono en el sector de la construcción, como diseño de mayor eficiencia energética para los edificios nuevos y la modernización del ahorro de energía para los edificios existentes.

Las emisiones de carbono de la producción de materiales de construcción y el uso de energía en la construcción contribuyeron con el 45% y el 40% de la huella de carbono en la construcción, respectivamente. La tasa de crecimiento del consumo de energía de los edificios urbanos disminuiría 2.98% para 2020, con un ahorro de energía de 1.66 millones de toneladas y una reducción de emisiones de carbono de 3.15 millones de tCO<sub>2</sub>, en un escenario de desarrollo bajo en carbono.

Y finalmente (Fay, Treloar, & Iyer-Raniga, 2000, págs. 31–41), realizo un estudio sobre “Análisis energético del ciclo de vida de edificios: un estudio de caso”, en este trabajo los autores describen el método para evaluar la energía del ciclo de vida de una construcción de por vida y las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel nacional. Este documento explica brevemente algunos de los problemas teóricos asociados con el análisis de energía del ciclo de vida y luego utiliza un estudio de caso basado en Australia para demostrar su uso en la evaluación de estrategias de diseño alternativas para un edificio residencial de eficiencia energética.

Después de presentar los estudios que se han realizado internacionalmente, se hace necesario estudiar las temáticas que se involucran en el análisis de la huella de carbono que contribuyan con el desarrollo del caso de estudio y de la totalidad de nuestro proyecto, como se relaciona a continuación.

Huella de carbono: Para (Minx, Peters, & Wiedmann, 2008, pág. 37), la huella de carbono se define como la cantidad de emisión directas e indirectas de gases relevantes al cambio climático asociada a las actividades de producción o consumo de los seres humanos, incluyendo la elaboración de las materias primas y el destino final del producto.

A juicio de (Carballo, Doménech, & García, 2009) la HdC nace huérfana, sin un concepto claro ni una metodología definida, lo que ha posibilitado que surjan diferentes interpretaciones del indicador. Una de estas diferencias se relaciona con los diferentes gases de efecto invernadero incluidos en el análisis.

Algunos estudios optan porque la HdC incluya varios gases de efecto invernadero, expresando la huella del carbono en toneladas equivalentes de CO<sub>2</sub> (Doménech, 2007); (Wiedmann, 2008, págs. 1–11) Otros prefieren limitarse exclusivamente a un único gas, el CO<sub>2</sub> (Wiedmann, 2008). Los GEI considerados usualmente son los establecidos en el Protocolo de Kioto del año 1997 y consideran los siguientes: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), hidrocarburos perfluorados (PFC), y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). Esto no significa que no haya otros gases contaminantes, pero éstos son los criterios actuales; incluso hay criterios de cálculo que no consideran todos estos gases, y esto es también parte del debate.

Gases de efecto invernadero (GEI): El rápido incremento de la temperatura global es producto del “efecto invernadero”, debido a la liberación de GEI de origen antropogénico a la atmósfera. No todos los GEI tienen la misma capacidad de provocar calentamiento global, pero su intensidad depende de su poder de radiación y el tiempo promedio que la molécula del gas

permanece en la atmósfera. Según (Henry, 2007, págs. 1–102) los principales gases de efecto invernadero (GEI) son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>). Además del CO<sub>2</sub>, el N<sub>2</sub>O y el CH<sub>4</sub>, el Protocolo de Kyoto establece normas respecto al hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC) que son otros gases de efectos invernadero presentes en la atmósfera.

Cambio climático: Este proceso, se ha dado de forma natural por millones de años sin embargo la acelerada actividad industrial de los últimos siglos lo han vuelto una amenaza para la vida humana. Nicholas Stern (2008) en su publicación *The Economics of climate Change*, califica el fenómeno como una crisis con un impacto persistente a largo plazo cuyas consecuencias se vuelven exponenciales con el paso del tiempo. Gran parte de esta problemática se debe a que la generación de los GEI está estrechamente relacionada con el crecimiento económico mundial; por lo que se ha vuelto una ardua tarea la mitigación de dichos efectos.

Análisis del ciclo de vida: Es una herramienta metodológica que “se basa en la recopilación y análisis de las entradas y salidas del sistema para obtener unos resultados que muestren sus impactos ambientales potenciales, con el objetivo de poder determinar estrategias para la reducción de los mismos.

Las áreas de aplicación habituales del ACV son los sistemas de gestión ambiental y evaluación del desempeño ambiental, el etiquetado ambiental y las declaraciones ambientales, la integración de los aspectos ambientales en el diseño y desarrollo de un producto, la inclusión de aspectos ambientales.

PAS 2050 (2011): El documento “Publicly Available Specification 2050” se refiere a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), cuantificadas en emisiones de CO<sub>2</sub> emitidas a lo largo del ciclo de vida del producto o servicio, y abarca todas las actividades desde la adquisición de las materias primas hasta su gestión como residuo, permitiendo a los consumidores decidir que alimentos comprar.

PAS 2050 es una especificación de British Standards Institute (BSI, 2011, págs. 1–45), Carbon Trust y Defra (Department for Environment, Food and Rural Affairs), se elaboró para proporcionar a las organizaciones un método claro y coherente para medir la huella de carbono de los productos, que proporcione confianza a los consumidores.

Huella ecológica: Es una herramienta contable que permite estimar los requerimientos en términos de recursos relacionados con la tierra y el agua, y la asimilación de los residuos para satisfacer las necesidades de una determinada población, entidad, región o país, expresadas en áreas productivas globales (Ren & Wang, 2011, págs. 1636–1641). Su modelo de cálculo que fue aplicado a países con alto grado de desarrollo concluyendo que éstos presentaban importantes déficits ecológicos, dado la necesidad que tienen de recursos de otros países para solventar la carencia de recursos internos en función de su población. El concepto fue diseñado como una herramienta de planificación para medir la sostenibilidad ecológica con el propósito de estimar la magnitud del consumo humano que excede la capacidad de regeneración de la biosfera. (Carballo, Doménech, & García, 2009)

Protocolo de Kioto: El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es un tratado firmado por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC). Es un

acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, causantes del calentamiento global. Además se incluyen también otros gases industriales: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>). El protocolo fue inicialmente adoptado en diciembre de 1997 en Kioto, Japón, pero no fue hasta 2005 que entro en vigor.

**Dióxido de Carbono CO<sub>2</sub>:** Es un gas que se forma en la combustión de todo combustible, por oxidación de los átomos de carbono, los organismos vivos lo emiten como producto final de la oxidación de azúcares y otros compuestos orgánicos que contienen carbono. La emisión de origen antropogénico se debe fundamentalmente a los procesos de generación de energía tanto eléctrica como de calefacción y otros en instalaciones industriales, así como en los vehículos de transporte, en plantas de tratamientos de residuos, etc.

**Índice de calidad del aire:** El Índice de Calidad del Aire (AQI, por sus siglas en inglés) es una herramienta usada por la EPA y otras agencias para proveerle al público información oportuna y fácil de comprender sobre la calidad del aire local. También indica si los niveles de polución son perjudiciales a la salud. El AQI informa al público si la condición del aire debe preocuparle por su salud. El AQI se enfoca en los efectos de salud que pueden pasar dentro unas horas o días después de respirar el aire.

## Capítulo 2. Factores de Emisión de Carbono

En el presente capítulo se procede a estructurar los resúmenes del proceso de análisis de los factores de emisión por unidad funcional de los materiales de acuerdo a los trabajos de investigaciones de revisiones bibliográficas abordadas.

La información extraída que se resume a continuación para cada material muestra: una detallada caracterización del producto, es seguida por la presentación de las fuentes de datos y los factores de emisión con su tabla de datos representativa de cada material. Es importante mencionar que si bien existen observaciones o premisas y autores que se repiten en cada una de estas secciones, la información es organizada de tal forma que cada una pueda entenderse sin la necesidad de estudiar la otra, lo que permite mayor facilidad al lector en el acceso a información específica. A continuación, se explica el contenido y el propósito de estas tres secciones.

### 2.1 Cemento

**2.1.1 Caracterización del producto.** El cemento es un ingrediente primordial para el concreto, actualmente es el material más usado en todo el mundo con una producción anual en 2009, de 2.8 Gtons (World Business Council for Sustainable development., 2009). No obstante, también es el componente que mayor impacto ecológico produce sobre el medio ambiente.

En la producción del cemento común, diferentes materias primas como la piedra caliza y arcilla deben extraerse, mezclarse, molerse y calentarse a altas temperaturas, siendo este un proceso que consume demasiada energía y recursos, generando así innumerables emisiones de CO<sub>2</sub>, debido a la descomposición de la piedra caliza. El promedio global de emisiones brutas de

CO<sub>2</sub> por tonelada de cemento se estima en alrededor de 900 kg, lo que representa entre el 5% y el 8% de la emisión total de CO<sub>2</sub> en la atmósfera (Habert, Billard, Rossi, & C. Chen, 2010, págs. 820-826), lo que nos indica la industria del cemento es un importante contaminante en términos de GEI, y las reducciones de emisiones en este sector pueden llevar a una disminución significativa de las emisiones generales de GEI.

El desmesurado crecimiento de las emisiones de GEI y la demanda global del cemento ha motivado a la búsqueda de soluciones para la gestión de las emisiones de GEI en la industria del cemento, por consiguiente, es de suma importancia examinar el estado actual sobre la producción del cemento y buscar alternativas de mitigación que ayuden a disminuir la contaminación.

En la producción del cemento el proceso más antiguo es el húmedo, en este proceso el material de alimentación se prepara mediante una molienda conjunta del mismo con agua, obteniendo una pasta cuyo contenido de agua oscila entre 30 y 40% que es alimentada en el extremo más elevado del horno del Clinker, este proceso es el que mayor cantidad de energía consume, es por ello que muchas empresas trabajan en acomodarse a otros procesos que no generen tanta energía, como por ejemplo el proceso seco, es más eficiente que el húmedo ya que genera menos cantidad de energía 720-800 MJ/ton de Clinker, frente a 1300-1500 MJ/ton de Clinker del proceso húmedo.

La cantidad de energía empleada, depende del tipo de cemento y los constituyentes puzolánicos como humo de sílice, cenizas volantes, entre otros, las cuales, mezclas con menores cantidades de cemento y mayores cantidades de estos constituyentes puzolánicos, presentan una menor cantidad de energía y emisiones de CO<sub>2</sub>.

**2.1.2 Factor de emisión del cemento.** Para la estimación de la huella de carbono del cemento, se recopilará información de diferentes estudios sobre los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del material para cada región, por etapa de proceso o por energía consumida durante su fabricación. En esta recopilación se detallará la información precisa de estudios realizados que describan el factor de emisión de CO<sub>2</sub> del cemento tipo I. Los valores de factores de emisión para el material de estudio serán en tonCO<sub>2</sub>/por su unidad de producción, en estos valores no se contemplarán las emisiones de los demás GEI, pero, aun así, solo se detallarán en la etapa de producción de cada material de estudio.

Sobre la base del marco descrito anteriormente, las emisiones se estimaron de la siguiente manera.

Paso 1. Estimar la producción por etapa de proceso y por región: Para cada región, los niveles de producción se estiman por cada etapa del proceso.

(Zhang, Han, Yu, & Wei, 2018, págs. 451–465), realizó un estudio sobre “Emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso contable de la producción global de cemento bajo Caminos Socioeconómicos Compartidos”, en este trabajo los autores describen, Las etapas de proceso de producción del cemento y la trayectoria de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con los procesos industriales en la industria del cemento bajo diferentes vías socioeconómicas compartidas basándose en los datos históricos de 1950-2014 en 31 países desarrollados y las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso de producción de cemento de 175 países en 12 regiones del mundo durante 2015-2100.

La producción de cemento incluye tres etapas principales: Preparación de materia prima, quema de Clinker y molienda del cemento. De acuerdo a datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA), la producción de cemento creció de 594 Mton en 1970 a 2084 Mton en 2005, siendo China el país con mayor participación dado que para el año 2005, produjo 1064 Mton lo cual comprende el 47% de la producción mundial de cemento (Darío, Hernández, & Pinzón, 2017). La tabla 1 describe la cantidad de cemento producido en diferentes regiones para cada etapa de proceso para el año 2017.

Tabla 1

Cantidad de cemento producido por región, por etapa de proceso para el año 2017

Región	Obtención materias primas (Mton)	Producción Clinker (Mton)	Molienda cemento (Mton)
Asia	234.5	634.6	654.4
Oceanía	24.5	35.6	36.3
América del Norte	45.7	37.8	37,00
Europa	126.6	132.4	85.2
América del sur	23.4	25.4	22
global(Mton)	454.7	865.4	834.9

Nota. La tabla muestra la producción total de cemento en millones de toneladas del año 2017 reportado por las diferentes regiones teniendo en cuentas las diferentes etapas de proceso. Fuente (Darío et al., 2017), (Andrew, 2018).

Paso 2. Desarrollar los factores de emisión por región. Se estimaron los factores de emisión para el CO<sub>2</sub> relacionados con la combustión de combustibles y las emisiones relacionadas con el proceso.

Factores de emisión de CO<sub>2</sub> relacionados con la energía, la electricidad, el combustible o el recurso utilizado para generar electricidad es el factor más importante que influye en las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía. Los factores de emisión de electricidad promedio

ponderados se desarrollaron utilizando datos para cada tipo de tecnología, para cada etapa del proceso y para cada región.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso son solamente los que resultan del consumo del ánodo de carbono durante la reducción electrolítica en el proceso de producción primaria.

(Zhang, Han, Yu, & Wei, 2018), realizó un estudio sobre “Un inventario de contaminantes primarios del aire y emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de cemento en China, 1990 y 2020”, en este trabajo los autores describen Las emisiones directas de contaminantes del aire de la industria del cemento en China, una metodología basada en la tecnología que utiliza información sobre la proporción de cemento producido a partir de diferentes tipos de hornos y los estándares de emisión para la industria del cemento, las emisiones históricas de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), óxidos de nitrógeno (NO<sub>X</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y la importancia de implementan tecnologías avanzadas relacionadas con la energía para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de esta industria en aproximadamente 12.8% de China.

La producción de cemento también libera grandes cantidades de CO<sub>2</sub> tanto de la combustión del combustible como del proceso químico que produce el Clinker, donde el carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) se calcina y reacciona con minerales que contienen sílice. El inventario de emisiones desarrollado en este estudio incluye cuatro gases contaminantes del aire (SO<sub>2</sub>, NO<sub>X</sub>, CO y CO<sub>2</sub>). Solo las emisiones directas de la producción de cemento fueron consideradas las más altas comparadas en este inventario con las emisiones indirectas, que son las que provienen del consumo de energía durante la fabricación y el transporte de materias

primas y productos finales. Los factores de emisión utilizado en trabajo son basado en el estudio de Cui y Liu (2008) que siguieron el enfoque recomendado por el Panel Internacional sobre el Cambio Climático (Yan, Shen, Fan, Wang, & Zhang, 2010, pág. 149)

La tabla 2 muestra los factores de emisión de los GEI emitido por la producción del cemento para el año 2005-2008 y la tabla 3 las emisiones de CO<sub>2</sub> producida en la etapa de proceso y por energía consumida.

Tabla 2

Emisiones estimadas de contaminantes del aire de la industria del cemento de China (2005e2008)

Año	SO <sub>2</sub>	Nox	CO	CO <sub>2</sub>
2005	0,00129	0,00126	0,01283	0,70483
2008	0,00121	0,00192	0,01141	0,89214

Nota. Las emisiones antropogénicas de GEI en China, produce aproximadamente un octavo de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> dela producción de cemento en China. Fuente (Zhao et al., 2009) y (Y Lei et al., 2011).

Tabla 3

Emisiones estimadas de la etapa de proceso del cemento

Región	Energía consumida	Obtención materia prima	Producción Clinker	Molienda cemento
Asia	0,248	0,122	0,395	0,149

Nota. Las emisiones de CO<sub>2</sub> presentadas son valores obtenidos de la producción de cemento en las distintas etapas de proceso en China en tonCO<sub>2</sub>/ton y una parte de las emisiones indirectas. Fuente (Yu Lei et al., 2010).

Así mismo (Zhang, Han, Yu, & Wei, 2018), realizo un estudio sobre “Emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso contable de la producción global de cemento bajo Caminos Socioeconómicos Compartidos”, en este trabajo los autores describen, las etapas de proceso de

producción del cemento y la trayectoria de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con los procesos industriales en la industria del cemento bajo diferentes vías socioeconómicas compartidas basándose en los datos históricos de 1950-2014 en 31 países desarrollados y las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso de producción de cemento de 175 países en 12 regiones del mundo durante 2015-2100.

En este trabajo se describen 5 escenarios relacionadas con los procesos industriales provenientes de la producción de cemento de diferentes países en el mundo, estos escenarios se diseñan reflejando diferentes circunstancias de desarrollo y diferentes niveles de desafíos globales para la mitigación y adaptación en el cambio climático incluyendo el escenario que sigue una estrategia de crecimiento verde (SSP1), (Van Vuuren, y otros, 2012), que ha bajado un nivel de desafíos no solo para la mitigación sino también para la adaptación, un patrón de desarrollo más intermedio (SSP2) (Fricko, 2017, págs. 42, 251–267), así mismo tiene un nivel medio de desafíos tanto para la mitigación como para la adaptación, una mayor fragmentación entre regiones (SSP3) (Fujimori et al., 2017), por otra parte representan los dos extremos en términos de desafíos para la mitigación y adaptación, un aumento de la desigualdad entre las regiones (SSP4) (Calvin et al., 2017) y finalmente que significa un alto nivel de desafío para la adaptación pero un bajo nivel de desafío para la mitigación y el desarrollo económico basado en combustibles fósiles (SSP5) (Kriegler, Edmonds, & Hallegatte, 2014, págs. 401–414)

En la tabla 4 se muestra los factores de emisión desarrollado en los distintos escenarios para las cinco regiones de estudio, se consideró en el resultado de estos valores, las emisiones relacionadas con las tres etapas principales del proceso en la producción del cemento, incluyendo

las emisiones directas de la combustión de combustibles fósiles y la indirecta causada por el consumo de electricidad.

Tabla 4

Emisiones de tonCO<sub>2</sub>/ton relacionadas con el proceso de producción de cemento por región

Región	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5
Asia	0,672	0,823	0,93	0,728	0,607
Oceanía	0,135	0,147	0,1	0,119	0,142
América del Norte	1,496	1,60	1,30	1,302	1,528
Europa	0,353	0,36	0,33	0,31	0,358
América del sur	0,266	0,323	0,42	0,292	0,235

Nota. Las emisiones de CO<sub>2</sub> presentadas son valores totales obtenidos de la producción de cemento en las distintas etapas de proceso y una parte de las emisiones indirectas. Fuente (Van Vuuren et al., 2012), (Fricko et al., 2017), (Fujimori et al., 2017), (Calvin et al., 2017) y (Kriegler et al., 2014).

Por otra parte (Worrell, Price, Martin, Hendriks, & Meida, 2005), realizo un estudio sobre “Emisiones de dióxido de carbono de la industria mundial del cemento”, en su trabajo los autores describen que la industria del cemento contribuye aproximadamente el 5% a las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub>, cuantifica las emisiones totales de CO<sub>2</sub> de la fabricación de cemento, incluidas las emisiones relacionadas con la etapa de proceso y la energía, las opciones de mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> para la industria del cemento.

Las opciones de mitigación de emisiones incluyen la mejora de la eficiencia energética, nuevos procesos, un cambio a combustibles con bajo contenido de carbono, la aplicación de combustibles de desecho, un mayor uso de aditivos en la fabricación de cemento y, eventualmente, cementos alternativos y la eliminación de CO<sub>2</sub> de los gases de combustión en hornos de Clinker.

Las fuentes antropogénicas de CO<sub>2</sub> son la combustión de combustibles fósiles y la descarbonización de piedra caliza, debido a que demanda grandes cantidades de energía los factores de emisión de CO<sub>2</sub> de la preparación de materias prima, producción de Clinker y finalmente molienda de cemento varían de acuerdo a las etapas de proceso 0,45-0,92tonCO<sub>2</sub>/ton para el proceso de calcinación y al consumo de energía un factor de intensidad de 5,9 GJ / ton de Clinker para hornos húmedos y 3,5 GJ / ton de Clinker para hornos secos(ver tabla 5).

Tabla 5

Estimaciones de factores de emisiones de tonCO<sub>2</sub>/ton por regiones clave productoras de cemento

Región	Factor de emisión por etapas de proceso	Factor de emisión por energía consumida	Total factor de emisión
Asia	0,750	0,240	0,99
Oceanía	0,450	0,220	0,67
América del Norte	0,690	0,24	0,93
Europa	0,480	0,19	0,67
América del sur	0,450	0,200	0,65

Nota. La tabla proporciona el total de emisiones para el año 2005. Fuente (Worrell et al., 2005).

Y finalmente (Emilio, Barreto, María, Ortiz, & Montes, 2008), realizo un estudio sobre “Tecnologías para la reducción de emisiones de gases contaminantes en plantas cementeras”, en este trabajo los autores describen los procesos de formación de SOX, NOX y CO<sub>2</sub>, los principales contaminantes y varias tecnologías para reducir dichas emisiones en hornos cementeros húmedos.

El objetivo principal del artículo es determinar cuáles alternativas de control son más apropiadas para reducir la contaminación en plantas cementeras. Según la experiencia de la planta Cementos Boyacá (CNPMLYTA, 2002), la transformación de una planta de proceso húmedo a proceso seco demanda una gran inversión pero reduce el consumo de energía en

aproximadamente 50% y las emisiones de NOX y SO2 en 58% y 91% respectivamente. Entre las alternativas para evitar o reducir las emisiones de CO2 se encuentran: la sustitución del carbón por fuentes renovables de energía, mejoras en la eficiencia energética en la combustión de combustible fósil, reemplazo de la materia prima por materiales de desecho ricos en CaO((BGS), 2005). La tabla 6 muestra los factores de emisión de los diferentes GEI generados por la producción de cemento en Colombia para el año 2008.

Tabla 6

Estimaciones de factores de emisiones de los GEI para Colombia en el 2008

Región	SO2(mg/m3)	Nox(mg/m3)	CO2(t/ton)
América del sur	28,7	454,4	0,904

Nota. La tabla proporciona el total de emisiones para el año 2008 para una planta de producción de cemento de Colombia, para el desarrollo del estudio solo se contemplará los datos de CO2. Fuente (Alicia & Angelica, 2008).

Pasó 3. Factores de emisiones de CO2 regionales generales. Para cada región por etapa del proceso y tipo de tecnología.

A continuación, se estructurará la tabla 7 que contendrán los factores de emisión presentada anteriormente por región teniendo en consideración las emisiones de CO2 relacionadas con la energía, factores de emisión de CO2 por producto de las distintas etapas de proceso y los GEI emitidos durante la producción del aluminio.

Tabla 7

Factores de emisión de tonCO<sub>2</sub>/ton de cemento por etapas de proceso

Región	Obtención materias primas	Producción Clinker	Molienda cemento (Mton)
Asia	0,170	0,52	0,22
Oceanía	0,09	0,175	0,082
América del Norte	0,210	0,51	0,21
Europa	0,137	0,3	0,1
América del sur	0,207	0,500	0,197
Global(Mton)	0,81	2,049	0,8180

Nota. Los valores de energía están distribuidos en las diferentes etapas de proceso, el valor total del factor de emisión por región es la suma de las diferentes etapas de proceso por región. Fuente Autor del proyecto.

La tabla 8 muestra en la primera columna los factores de emisión general emitidos por región de las diferentes industrias de cemento teniendo en consideración solo la etapa de proceso e incluyen dos columnas más que describen los factores de emisiones de CO<sub>2</sub> presentadas por diferentes bases de datos y revisión bibliográfica de estudios similares.

Tabla 8

Factores de emisión ponderados en la producción de cemento por región

Región	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)
Asia	0,914	1,006	0,98
Oceanía	0,347	0,544	0,760
América del Norte	0,930	0,97	0,897
Europa	0,537	0,780	0,688
América del sur	0,904	1,096	0,766
Promedio global(tonCO <sub>2</sub> /t)	0,73	0,879	0,818

Nota. Los valores de energía están distribuidos en las diferentes etapas de proceso. Fuente (Shen et al., 2014), (Lisa, Pedro, Eiichi, & Milos, 2006), (Hurme & Kajaste, 2012), (Australian National Greenhouse Accounts, 2017), (European Commission(EU), 2012) y (Castaño, García, & Escobar, 2016), (Yu Lei et al., 2010), (Zhang et al., 2018), (Worrell et al., 2005) y (Emilio et al., 2008).

## 2.2 Aluminio

**2.2.1 Caracterización del producto.** El aluminio se ha convertido en las últimas décadas en un material muy utilizado en estructuras y construcciones, es un material importante en la ingeniería y arquitectura. Su bajo peso y alta resistencia, es uno de sus principales ventajas en la industria de la construcción. El aluminio tiene una densidad de  $2,7\text{Kg/m}^3$ , lo que significa que es un tercio de la densidad del acero. La resistencia del aluminio se puede ajustar para adaptarse a cualquier uso y aplicación mediante el mezclado con pequeñas cantidades de otros metales, se obtiene una amplia gama de aleaciones con propiedades específicas para un sinnúmero de aplicaciones.

El aluminio es el segundo metal con mayor demanda después del acero para las sociedades modernas, la producción anual de aluminio es de 417,712 mil toneladas métricas, y China contribuye con la proporción máxima, seguida por el Consejo de Golfo de Cooperación y Norteamérica (Gautam, Pandey, & Agrawal, 2017, pág. 5). Un aumento sucesivo en la demanda de aluminio causó un aumento significativo en su producción en los últimos 10 años (Fig. 1). Para satisfacer la creciente demanda de aluminio, hay un aumento continuo en su producción, que se proyecta que aumentará de 51 Mton en 2014 a 89e122 Mton en 2050 (Gautam, Pandey, & Agrawal, 2017, pág. 5). En cambio (Fishedick & Roy, 2014, págs. 739–810) dice que la producción anual de metales no ferrosos es pequeña en comparación con el acero, y está dominada por el aluminio, con 56 Mton fabricados a nivel mundial en 2009, de los cuales 18 Mt se realizaron a través de la producción secundaria (reciclada). Se espera que la producción aumente a 97 Mt para 2020 (IAI, 2009).

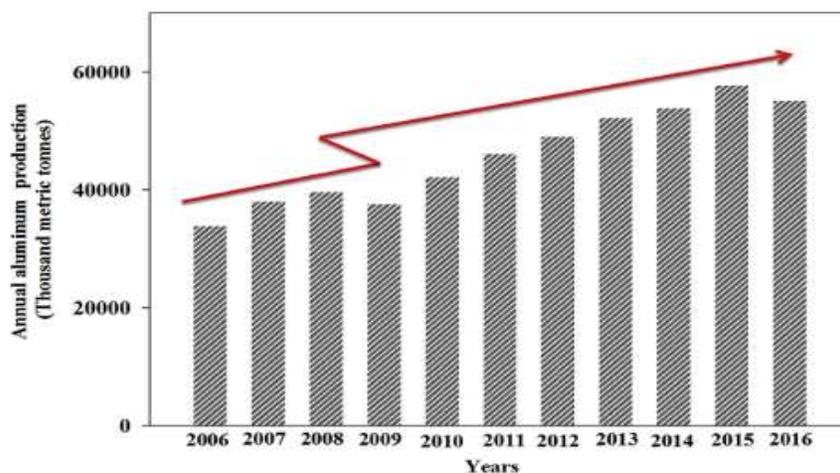


Figura 1. Producción anual global de aluminio en los últimos 11 años.

Fuente: <http://www.world-aluminium.org/statistics/#data>.

El proceso de fabricación del aluminio (código NAICS 3313: Alúmina y Aluminio) produce tanto el aluminio primario y el aluminio secundario (partir de chatarra de aluminio). Las mejores prácticas de producción de aluminio primario, desde la producción de aluminio hasta la fundición de lingotes, consumen 174 GJ / t de energía primaria (lo que representa la producción de electricidad, la transmisión, las pérdidas de distribución) y 70,6 GJ / t de energía final, para la producción de aluminio reciclado es de 7.6 GJ / ton de energía primaria y 2.5 GJ / ton de energía final (Fischedick & Roy, 2014, pág. 32)

En cambio (Bakshi, 2005) afirma que los valores por producción de un lingote de aluminio primario requiere aproximadamente 120 Gigajoules (esto incluye la excavación de materia prima, procesamiento de alúmina, transporte y producción de aluminio en la etapa de electrólisis) y el insumo de energía en el proceso final 95 GJ por tonelada,. En contraste, la producción secundaria de aluminio requiere solo 6 GJ por tonelada.

Sin embargo, en la actualidad, no existen procesos de producción alternativos que puedan desplazar el proceso existente de Hall-Hérout. Bakshi (2005, p. 6) en su escrito describe que “Un proceso, la reducción carbotérmica directa, ha demostrado potencial y, si se desarrolla con éxito para operar a escala comercial, ahorraría aproximadamente el 25 por ciento de la energía utilizada en las células Hall-Hérout”. Sin embargo, el interés de la industria es limitado debido a los altos costos de reacondicionamiento involucrados.

**2.2.2 Factor de emisión del aluminio.** Para la estimación de la huella de carbono del aluminio, se recopilará información de diferentes estudios sobre los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del material para cada región, por etapa de proceso o por energía consumida durante su fabricación. En esta recopilación se detallará la información precisa de estudios realizados que describan el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de perfiles de aluminio para ventanas. Los valores de factores de emisión para el material de estudio serán en tonCO<sub>2</sub>/por su unidad de producción, en estos valores no se contemplarán las emisiones de los demás GEI, pero, aun así, solo se detallarán en la etapa de producción de cada material de estudio.

Sobre la base del marco descrito anteriormente, las emisiones se estimaron de la siguiente manera:

Paso 1. Estimar la producción por etapa de proceso y por región: Para cada región, los niveles de producción se estiman por cada etapa del proceso.

(Bakshi, 2005), realizó un estudio sobre “ Emisiones de gases de efecto invernadero de las principales fuentes industriales”, en este trabajo el autor describe que la mayoría de las emisiones de GEI son el resultado de la combustión de combustibles fósiles utilizados para proporcionar

energía para la extracción, el procesamiento de materias primas, la energía para la reducción electrolítica de alúmina al aluminio, el metal fundido en cada una de las etapas y procesos del aluminio y los tipos de tecnologías implementados para la producción del aluminio.

En 2005, se produjeron 22 millones de toneladas de aluminio primario y 8,5 millones de toneladas aproximadas en todo el mundo. La descripción de la producción se realizó en poco más de 200 fundiciones ubicadas en 46 países productores. En 2005, la capacidad nominal de todas las fundiciones existentes era de aproximadamente 25 millones de toneladas por año (Bakshi, 2005, pág. 32). La tabla 9 muestra la producción relativa por región para cada etapa del proceso y por cada tipo de tecnología implementada.

Tabla 9

Cantidad de aluminio producido por región, por etapa de proceso y tipo de tecnología

Región	Bauxita	Alumina	Producción Primaria					Producción	
	Mining	Refining	Total	% Por tipo de tecnología				Secundaria	
	Total	Total (ton)	Total	CWPB	HSS	PFPB	SWPB	VSS	Total (ton)
	(ton)		(ton)						
Asia	16.588	6.908	4.766	20%	9%	43%	0%	28%	1.371
Oceanía	51.282	15.968	2.279	40%	0%	53%	6%	0%	49
América del Norte	111	6.292	7.109	24%	6%	49%	6%	15%	3.454
Europa	22.013	6.074	3.988	0%	8%	15%	13%	63%	131
América del sur	4.562	5.653	3.823	4%	0%	62%	18%	16%	2.511
Total (ton)	94.556	40.895	21.965	18%	5%	39%	11%	275	7.516

Nota. La tabla muestra la producción total de aluminio en millones de toneladas del año 2005 reportado por las diferentes regiones teniendo en cuentas las diferentes etapas de proceso. Fuente <http://www.world-aluminium.org/statistics/#data>.

Tabla 10

Emisiones de GEI por tipo de tecnología y cantidad producida de aluminio

Tipo de tecnología	Producción	CF4	C2F4	PFC
	Total (ton Al)	Gg	Gg	(Kt CO2e)
CWPB	2,68	0,06	0,007	0,487
PFPB	15,517	2,8	0,13	4,854
SWPB	0,539	0,26	0,1	2,668
HSS	0,102	0,03	0,003	0,267
VSS	3,12	0,422	0,06	3,815
Total (tonCO2/t)	21,96	3,52	0,26	12,091

Nota: La tabla muestra la producción total de aluminio por tipo de tecnología del año 2005 reportado por las diferentes regiones teniendo en cuentas las emisiones de PFC. Fuente (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2009).

La anterior tabla 10 muestra los valores incorporados de los distintos GEI en la producción del aluminio por tipo de tecnología para el mismo año.

Paso 2. Desarrollar los factores de emisión por región. Se estimaron los factores de emisión tanto para el CO2 relacionados con la energía y/o proceso.

Factores de emisión de CO2 relacionados con la energía, la electricidad, el combustible o el recurso utilizado para generar electricidad es el factor más importante que influye en las emisiones de CO2 relacionadas con la energía. Los factores de emisión de electricidad promedio ponderados se desarrollaron utilizando datos para cada tipo de tecnología, para cada etapa del proceso y para cada región.

Las emisiones de CO2 relacionadas con el proceso son solamente los que resultan del consumo del ánodo de carbono durante la reducción electrolítica en el proceso de producción primaria. No se asocian emisiones relacionadas con el proceso con la minería de bauxita, el refinado de alúmina o la producción secundaria.

(EPA, 2008), realizó un estudio sobre “Cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero de sectores industriales clave en los Estados Unidos”, en este trabajo el autor describe el perfil energético y ambiental de la industria de aluminio de los EEUU, información sobre el consumo de electricidad y combustible fósil en las etapa de los procesos de producción de aluminio primario, la cantidad de producción para las diferentes etapas de proceso y las emisiones directas e indirectas de GEI generadas por el consumo nacional de combustible fósil.

Todas las emisiones de GEI en su estudio se estiman en unidades de millones de toneladas métricas de dióxido de carbono equivalente (MMTCO<sub>2</sub>E), una unidad de medida que tiene en cuenta la potencia relativa del combustible fósil al aplicar los potenciales de calentamiento global (GWP) de cada gas. Se presenta un resumen de las estimaciones de emisiones de GEI para el aluminio para el año 2002 de los factores de CO<sub>2</sub> generados por el consumo de energía. En la tabla 11 se muestra las emisiones de GEI del sector de alúmina y aluminio se estimaron en 57 MMTCO<sub>2</sub>E en 2002.

Tabla 11

Emisiones de GEI del sector de alúmina y aluminio (MMTCO<sub>2</sub>E)

Fuente de energía	CO <sub>2</sub>	PFC	Total
Combustión de combustible fósil	11		11
No combustión	5	5	10
Electricidad comprada	36		36
<b>Total</b>	<b>52</b>	<b>5</b>	<b>57</b>

Nota. Tenga en cuenta que, las emisiones calculadas en base a la Encuesta de Consumo de Energía de Manufactura del DOE de 2002 y al Inventario de Emisiones y Fregaderos de Gases de Efecto Invernadero de los EE. UU, una celda en blanco no indica necesariamente cero emisiones; más bien, indica que el análisis no abordó esa fuente de emisión.

Así mismo (Gautam, Pandey, & Agrawal, 2017), realizó un estudio sobre “Huella de carbono de la producción de aluminio”, en este trabajo los autores describen que el consumo de

energía en los sectores industriales representó más del 70% de la producción total de energía, las emisiones de GEI de diversas etapas de los procesos involucrados en refinerías de alúmina y producción de aluminio, los impactos consiguientes en el sistema ecológico con las medidas de mitigación tomadas por las industrias y los responsables de las políticas en la reducción de emisiones de carbono.

Para cumplir con el compromiso del esfuerzo global por reducir las emisiones de GEI, muchas empresas están integrando los problemas ambientales en sus sistemas de gestión, con efectos potenciales en todas sus cadenas de producción de minería de bauxita, el refinado de alúmina y la producción de aluminio, estos procesamientos de minerales producen menos emisiones de GEI relacionadas con la energía de consumo. La tabla 12 resume una gama de emisiones de GEI de diferentes procesos involucrados en la fabricación de aluminio. Por otra parte, las concentraciones de GEI emitidos por los demás factores de proceso se muestran en la tabla 13, en las diferentes etapas de la producción de aluminio.

Tabla 12

Emisiones de gases de efecto invernadero de diferentes procesos de producción de aluminio.

Proceso	Emisiones GEI (TonCO <sub>2</sub> /Ton Aluminio)	
	Mínimo	Máximo
Bauxita Mining	0,28	0,74
Alumina Refining	0,48	0,62
Producción Primaria	5,92	41,1
Producción Secundaria	0,32	0,74

Nota. Los valores de la tabla son extraído de diferentes trabajos con el propósito de unificarlos en los diferentes procesos de producción del aluminio. Fuentes (European Aluminium Association, 2013),(Green J.A.S, 2010), (Schmidt & Thrane, 2009) y (Gautam et al., 2017).

Tabla 13

Emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano(CH<sub>4</sub>), tetrafluorometano(CF<sub>4</sub>), tetrafluoroetileno(C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>) a partir de diversos procesos de producción de aluminio

Proceso	CO <sub>2</sub> kg/t	CH <sub>4</sub> kg/t	CF <sub>4</sub> kg/t	C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> kg/t
Bauxita Mining	22,9	0,028	0	0
Alumina Refining	4682,4	4,3	0	0
Produccion Primaria	12150,8	35,7	0,35	0,035
Produccion Secundaria	821,5	0,92	0	0

Nota. El trabajo muestra las emisiones presentadas en las diferentes etapas de proceso; para el presente trabajo solo se contemplaran los valores de CO<sub>2</sub>. Fuente (Gao, F., Nie, Z., Wang, Z., Li, H., Gong, X., Zuo, T., 2009) Emisiones de gases de efecto invernadero y potencial de reducción de la producción de aluminio primario en China. Ciencia en China Serie E: Ciencias tecnológicas 52 (8), 2161e2166.

Por otra parte (Ciacci, y otros, 2014, págs. 84(1), 540–549) en su estudio sobre “Evolución histórica de las emisiones de gases de efecto invernadero de la producción de aluminio a nivel nacional”, en su trabajo los autores describen la importancia de adoptar prácticas más ecológicas en varios puntos a lo largo del ciclo de vida del metal, la implementación de la metodología MFA en la etapa de proceso del aluminio para mejorar las emisiones GEI generadas durante la producción del aluminio y las trayectorias futuras probables de la producción de aluminio a nivel nacional.

Para satisfacer la creciente demanda nacional de metales, la estructura de la industria de producción de aluminio cambió significativamente, pasando del material primario al secundario, esto género que los procesos se centraran en la fase de fundición de aluminio, ya que alrededor del 60% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub>e del proceso ocurren durante la fundición de aluminio debido a la combustión de combustibles fósiles y las emisiones de PFC (Ciacci, y otros, 2014, pág. 4) Si bien la producción italiana de aluminio primario se limitó a una sola planta, la producción secundaria de aluminio operó ampliamente en el país, e Italia comparte con

Alemania el primer lugar en Europa por el número de refinadores y remodeladores y la producción total (European Aluminium Association., 2013). Así mismo la emisión de carbono durante la fundición secundaria de aluminio es contribuida casi por igual a la energía eléctrica, que es la etapa con mayor consumo de carbono que cubre hasta el 80% del factor de emisión acumulado, y por las emisiones relacionadas con el proceso, específicamente los PFC, un resultado que justifica las iniciativas dirigidas.

La tabla 14 muestra los factores de emisión promedio y los resultados resumidos para las etapas de producción del aluminio para la región de Europa occidental, donde la contribución del proceso principal relacionado con el CO<sub>2</sub>e de la producción de aluminio primario refleja la tendencia de la industria mundial del aluminio en la actualización a procesos de producción estandarizados en todo el mundo, y confirman cómo los desafíos de sostenibilidad se enfrentan todas las naciones e industrias.

Tabla 14

Factores de emisión de CO<sub>2</sub>e promedio de las etapas de producción de aluminio

Año	kgCO <sub>2</sub> e/t Al			
	Bauxita Mining	Alumina Refining	Producción primaria	Producción secundaria
2000-2009	30,1	2430,6	7300	118

Nota. La tabla muestra las emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de aluminio en el periodo 2000-2009 Basado en el trabajo (Classen, M y Althaus, HJ y Blaser, S y Tuchschnid, M y Jungbluth, N y Doka, G y Faist Emmenegger, M y Scharnhorst, 2009).

Y finalmente (Sabnis & Pranesh, 2017, págs. 8(2), 203–217) en su estudio sobre “Evaluación de materiales de construcción para la construcción sostenible basada en la figura del mérito como concepto”, en su trabajo los autores describen una herramienta como solución para

la selección de un material de construcción más adecuado y las técnicas de construcción que producen resultados óptimos en términos de sostenibilidad.

Esta herramienta “figura de mérito” (FoM), se aplicó en un estudio sobre los materiales de construcción de uso común y los resultados obtenidos en su comparación de los valores de energía incorporada, carbono incorporado y densidad del material indico en cada etapa de proceso de la producción del aluminio un incremento en el consumo de energía antes de llegar al punto de implementación. Esta energía consumida durante los diferentes procesos involucrados, es directamente proporcional a las emisiones de gases de efecto invernadero que conducen al calentamiento global en la tabla 15 se puede apreciar la energía incorporada, carbono incorporado medidos por medio de la herramienta FoM para el aluminio.

Tabla 15

Energía incorporada, emisiones y combinación de energía de la producción de aluminio de diferentes bases de datos de ACV.

Proceso	Energía incorporada Gj/Ton	Emisiones GEI (TonCO <sub>2</sub> /Ton Aluminio)	Mezcla de energía
Bauxita Mining	15,5	0,729	63,20% Fósil 29,3% Nuclear 8,5% Electricidad
Alumina Refining	43,8	7,13	100% Fósil
Producción Primaria	136	8,54	66,17% Fósil 16,67% Electricidad 16,69% Nuclear
Producción Secundaria	76,7	2,39	61,87% Fósil 22,60% Nuclear 13,86% Electricidad

Nota. La tabla muestra los datos que provienen de la Asociación Europea de Aluminio: un organismo especializado que proporciona una mayor confiabilidad. Fuente Ecoinvent website. (<http://www.ecoinvent.org/database/database.html>); 2015 [accessed 25.08.15].

Paso 3. Factores de emisión de CO<sub>2</sub> regionales generales. Para cada región, etapa del proceso, tipo de tecnología.

A continuación, se estructurarán dos tablas que contendrán los factores de emisión presentado anteriormente por región teniendo en consideración las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía, factores de emisión de CO<sub>2</sub> por producto de las distintas etapas de proceso y los GEI emitidos durante la producción del aluminio.

En la tabla 16 se muestra el factor de emisión de CO<sub>2</sub> por producto y energía para cada región, estas emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso son los que resultan del consumo del ánodo de carbono durante la reducción electrolítica en el proceso de producción primaria.

La tabla 17 presenta los factores de emisión estimados de PFC ponderados por tipo de producción y tecnología para cada región Según el informe de la EPA, en agosto del 2016, ocho países han emprendido iniciativas de la industria y el gobierno para reducir las emisiones de PFC de la producción de aluminio primario: Australia, Canadá, Francia, Alemania, Nueva Zelanda, Noruega, Reino Unido, Chile y Estados Unidos. Estos países representaron más del 50 por ciento de la producción mundial de aluminio en 2014 (Purohit & Höglund-isaksson, 2017, págs. 2795–2816)

Tabla 16

Energía incorporada y emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de aluminio de diferentes bases de datos de ACV

Región	Bauxita	Aluminio	Total	Producción Primaria					Producción
	Mining	Refining		% Por tipo de tecnología					Secundaria
	Total	Total	(tonCO <sub>2</sub> /t)	CWPB	HSS	PFPB	SWPB	VSS	Total
	(tonCO <sub>2</sub> /t)	(tonCO <sub>2</sub> /t)							(tonCO <sub>2</sub> /t)
Asia	0,28	0,48	5,920	20%	9%	43%	0%	28%	0,32
Oceanía	0,022	4,682	12,150	40%	0%	53%	6%	0%	0,821
América del Norte	0,301	2,40	7,3	24%	6%	49%	6%	15%	0,11
Europa	0,729	7,13	8,54	0%	8%	15%	13%	63%	2,39
América del sur	0,52	5,633	8,56	4%	0%	62%	18%	16%	2,51
Total									
(tonCO <sub>2</sub> /t)	2	18	42,47	18%	5%	39%	11%	275	6

Nota. La tabla esta complementada por los valores de bases de datos de diferentes organizaciones Ecinvent, GaBi database, U,S life Cycle inventory, Base carbone Bsedec database. Fuente (Springer & Hasanbeigi, 2016), (Purohit & Höglund-isaksson, 2017), (INTERNATIONAL, 2015) y (Classen M, Althaus HJ, Blaser S, 20009).

Tabla 17

Factores de emisión de PFC ponderados en la producción por región

Región	Total	Total	Total	Total
	(tonCO <sub>2</sub> /t)	(kgCH <sub>4</sub> /t)	(kgC <sub>2</sub> F <sub>6</sub> /t)	(kgCF <sub>4</sub> /t)
Asia	1,99	0,03	0,010	0,32
Oceanía	1,870	0,1	0,02	0,26
América del Norte	2,31	0,06	0,0	0,33
Europa	4,080	0,07	0,04	0,57
América del sur	3,42	0,100	0,05	0,46
Total	13,67	0,330	0,1400	1,94

Nota. No todos los GEI tienen la misma capacidad para causar el calentamiento global, pero. Los efectos combinados de estos dos juntos deciden el potencial de calentamiento global (GWP) de un gas. La fundición de aluminio contribuye con el 72% del GWP general, seguido del refinado de alúmina y la fundición de lingotes. Fuente (Sanchez & Stern, 2016).

La tabla 18 muestra en la primera columna los factores de emisión general emitidos por región de las diferentes industrias del aluminio teniendo en consideración las emisiones de GEI asociadas con la producción primaria incluyen emisiones de CO<sub>2</sub> y energía consumida de la combustión de combustible fósil e incluye dos columnas más que describen los factores de

emisiones de CO<sub>2</sub> presentadas por diferentes bases de datos y revisión bibliográfica de estudios similares.

Tabla 18

Factores de emisión ponderados en la producción de aluminio por región

Región	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)
Asia	7,91	16,50	15,00
Oceanía	11,770	13,2	13,9
América del Norte	9,6	7,07	0,54
Europa	12,570	12,70	6,70
América del Sur	11,98	14,300	13,600
Promedio global(tonCO <sub>2</sub> /t)	10,77	12,750	9,948

Nota. Las variaciones por región se pueden atribuir a la eficiencia de las etapas de proceso en la producción primaria y la tasa actual de aluminio reciclado. Para las emisiones de CO<sub>2</sub> no se tiene encuenta la equivalencia de los contaminantes atmosféricos (CO<sub>2</sub>). Fuente (Han Hao, Yong Geng, 2016),(Ning Ding, Feng Gao, Zhihong Wang, Xianzheng Gong, 2012),(Turton, 2004),(Nawshad Haque, 2013),(Matthias Koch and Jochen Harnisch, 2010),(Kornélúsdóttir, 2014),(Mc Millan Colin, 2009), (Gautam et al., 2017), (Ciacci et al., 2014) y (Sabnis & Pranesh, 2017).

## 2.3 Acero

**2.3.1 Caracterización del producto.** El hierro y el acero son metales duraderos y fuertes que se utilizan para muchos fines, en el sector de la construcción el acero se emplea como refuerzo estructural por sus propiedades mecánicas en vigas, columnas y zapatas como varillas, y en obras públicas como esqueletos y soportes para ferrocarriles, túneles y puentes.

El acero es el metal de mayor demanda mundial, con una producción total de acero bruto de alrededor de 190 millones de toneladas métricas de acero en durante los primeros ocho años (ver la Figura 2). El crecimiento en el uso del acero ha sido el mayor de cualquier material en el mundo (Société de Calcul Mathématique SA., 2009)

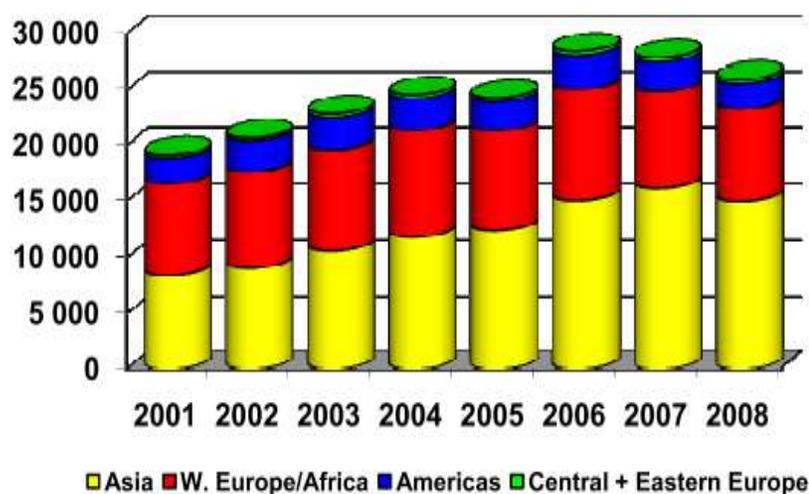


Figura 2: Producción de acero bruto 2001-2008 (1000 toneladas métricas)

Fuente: Foro Internacional de Acero Inoxidable (2009)

La siguiente estadística de la figura 3 representa la producción mundial de acero entre 2005 y 2017. En 2017, se produjeron alrededor de 48.1 millones de toneladas métricas de acero inoxidable en todo el mundo (Manuel, 2018)

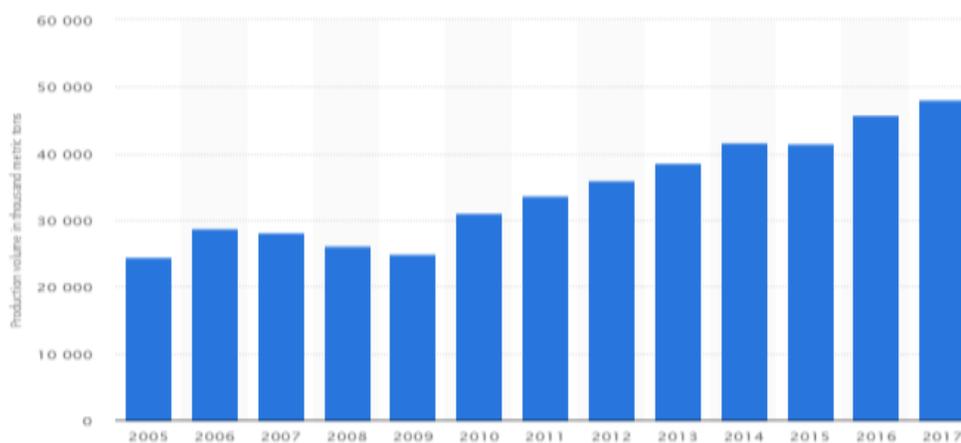


Figura 3. Producción mundial de acero inoxidable desde 2005 hasta 2017 (en 1,000 toneladas métricas)

Fuente: <https://www.statista.com/statistics/223028/world-stainless-steel-production/>

La tasa crecimiento anual promedio de la producción de acero bruto fue de 18.5% entre 2000 y 2009, China produjo el 46% del acero del mundo. Otros productores importantes incluyen la EU-27 (12%), los Estados Unidos (8%), Japón (7%), India (5%) y Rusia (5%) (World Steel Association, 2018) . (EPA, 2008) afirma que “El setenta por ciento (70%) de todo el acero está hecho de arrabio producido al reducir el óxido de hierro en un alto horno con coque o carbón antes de la reducción en un horno de oxígeno básico (BOF) y el resto del acero también se fabrica a partir de chatarra (23%) o de óxido de hierro reducido en estado sólido (hierro reducido directamente, 7%) fundido en Hornos de arco eléctrico (EAFs)”. La intensidad energética específica de la producción de acero varía según la tecnología y la región.

Los procesos de reducción de fundición del acero son el último desarrollo en la producción de arrabio y omiten la producción de coque al combinar la gasificación del carbón con la reducción de la fusión del mineral de hierro. Actualmente, solo el proceso COREX utiliza mineral aglomerado, que se reduce previamente por los gases que provienen de un baño caliente. Un exceso de gas, que se utiliza para la generación de energía, la producción de DRI o como gas combustible. Se estima que el proceso COREX utiliza un consumo energético neto de acero de 15 a 18 GJ / tonelada. (Price, Phylipsen, & Worrell, 2009)

Para los países en desarrollo, el cambio hacia la producción de acero a base de chatarra condujo a una fuerte reducción en el uso de energía por tonelada de acero producido desde alrededor de 25–30 GJ / tonelada hasta 12–14 GJ / tonelada para 2016, valores observados actualmente en Europa y Estados Unidos (Van Ruijven, y otros, 2016, págs. 112, 15–36) . Un cambio similar ocurre para la intensidad de carbono, bajando de 2.7 a 2.9 tCO<sub>2</sub> / tonelada de acero a alrededor de 1.2-1.4 tCO<sub>2</sub> / tonelada para 2016, comparable a los valores actuales en los

países industrializados. Según la (World Steel Association, 2018) al reciclar una tonelada de acero se evita el consumo de 1,4 toneladas de mineral de hierro, de 0,74 toneladas de carbón y de 0,12 toneladas de piedra caliza, además se dejan de liberar 1,5 toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y se ahorran 13 GJ de energía. Lo anterior sugiere que al reciclar los recortes de la varilla de acero se está minimizando el impacto en el proceso de fabricación del acero.

**2.3.2 Factor de emisión del acero.** Para la estimación de la huella de carbono del acero, se recopilará información de diferentes estudios sobre los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del material para cada región, por etapa de proceso o por energía consumida durante su fabricación. En esta recopilación se detallará la información precisa de estudios realizados que describan el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la producción de varillas de acero. Los valores de factores de emisión para el material de estudio serán en tonCO<sub>2</sub>/por su unidad de producción, en estos valores no se contemplarán las emisiones de los demás GEI, pero, aun así, solo se detallarán en la etapa de producción de cada material de estudio.

Sobre la base del marco descrito anteriormente, las emisiones se estimaron de la siguiente manera:

Paso 1. Estimar la producción por etapa de proceso y por región: Para cada región, los niveles de producción se estiman por cada etapa del proceso.

(Hasanbeigi, Arens, Cardenas, Price, & Triolo, 2016, págs. 113, 127–139 ) en su estudio “Comparación de la intensidad de las emisiones de dióxido de carbono de la producción de acero en China, Alemania, México y los Estados Unidos”, en este trabajo los autores describen la producción hierro y acero comparada de manera precisa y más justa, la intensidad de las

emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) relacionadas con la energía de la producción de acero en diferentes países y demostrar la aplicación de su metodología en un análisis de la industria del acero en China. , Alemania, México y los EE. UU.

La producción de acero en la etapa de proceso de horno de alto rendimiento / horno de oxígeno básico (BF / BOF) y horno de arco eléctrico (EAF) requiere una gran cantidad de mineral de hierro para producir acero. La reducción del mineral de hierro en un BOF es el proceso más intensivo en energía dentro de la industria del acero por lo cual requiere la mayor cantidad de mineral, por otra parte, la producción de acero en la etapa de proceso EAFs solo requiere una pequeña parte de mineral debido a que la mayor parte de la materia prima es reciclada y la energía liberada durante este proceso es mínima comparada con el BOF.

En 2019, se estima que el uso aparente de acero en todo el mundo aumentará a alrededor de 1.600 millones de toneladas métricas. El aumento probablemente se verá impulsado por las ganancias en las regiones del TLCAN y de la UE, así como por la creciente demanda en las economías emergentes. Mientras tanto, se espera que China experimente un crecimiento en el uso aparente del acero entre 2016 y 2017 (Manuel, 2018). Se prevé que el mercado de chatarra y reciclaje de acero supondrá un problema para el sector de producción de acero. En la tabla 19 se muestra la producción de acero en los últimos 8 años hasta el 2017 por regiones en millones de toneladas.

Tabla 19

Cantidad de acero producido por regiones para los últimos ocho años

Región	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Asia	638.743	701.968	731.040	822.000	822.306	803.825	807.609	831.728
Oceanía	8.149	7.248	5.805	5.588	5.466	5.717	5.837	5.985
América del Norte	111.562	118.675	121.586	118.978	121.093	110.938	110.638	115.761
Europa	172.911	177.791	168.589	166.356	169.301	166.115	162.024	168.305
América del sur	141.850	151.742	50.656	147.035	144.453	137.330	139.709	143.136
Total (ton)	1.073.215	1.157.424	1.077.676	1.259.957	1.262.619	1.223.925	1.225.817	1.264.915

Nota: Las variaciones por región se pueden atribuir a la eficiencia de las etapas de proceso en la producción primaria. Fuente (World Steel Association, 2018).

Para las distintas etapas de proceso la producción de acero se estimó para el año 2017 en 1.264 millones de tonelada la cual se muestra en la tabla 20 que se muestra a continuación.

Tabla 20

Cantidad de acero producido por regiones, por etapa de proceso en millones de tonelada para el 2017

Región	Producción primaria		Producción secundaria
	BOF	EAFs (DRI)	EAFs (Scrad based)
Asia	754.148	90	77.490
Oceanía	4.761	1	1.224
América del Norte	37.780	5.628	72.353
Europa	100.408	27	67.870
América del sur	81.289	6.265	55.572
Total (ton)	978.386	12.011	274.509

Nota. En la etapa de proceso no se contabiliza la cantidad de mineral coque extraído, necesario en el proceso de sinterización para la producción y preparación de hierro. Fuente (World Steel Association, 2018, pp. 18–19).

Paso 2. Desarrollar los factores de emisión por región. Se estimaron los factores de emisión tanto para el CO<sub>2</sub> relacionados con la energía y/o proceso.

Factores de emisión de CO<sub>2</sub> relacionados con la energía, la electricidad, el combustible o el recurso utilizado para generar electricidad es el factor más importante que influye en las

emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía. Los factores de emisión de electricidad promedio ponderados se desarrollaron utilizando datos para cada tipo de tecnología, para cada etapa del proceso y para cada región.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso son solamente los que resultan del consumo del ánodo de carbono durante la reducción electrolítica en el proceso de producción primaria.

(Ren & Wang, 2011) realizó un estudio “Análisis de problemas existentes y reducción de emisiones de carbono en la industria del hierro y el acero de Shandong”, en este trabajo los autores describen la importancia de mejorar la capacidad técnica a los equipos de producción, optimizar las etapas de proceso, disminuir la relación hierro-acero, mejorar la estructura energética y finalmente, de acuerdo con el análisis anterior, se propusieron los enfoques de reducción de emisiones de carbono. Es esencial que los gobiernos pertinentes tomen decisiones científicas y racionales y, además, establezcan una base teórica para alcanzar el objetivo del desarrollo económico sostenible y bajo en carbono en la industria del hierro y el acero.

La industria del hierro y el acero es una de las industrias más básicas con un alto consumo de energía y altas emisiones de carbono en la industria del hierro y el acero, para el desarrollo de este estudio los autores precisaron lo importante de analizar los problemas existentes en la producción y el estado de las emisiones de carbono de la industria del hierro y el acero en la provincia de Shandong. El consumo energético por tonelada de acero es un índice importante.

En 2008, el consumo energético global en Shandong fue de 40.37Gj/ ton (Ren & Wang, 2011, pág. 3) y el consumo energético global promedio de las industrias de acero asiático fue de

36.55Gj / ton. En la tabla 21 se detalla el consumo de energía en las etapas de proceso en la producción de acero para Asia en 2008.

Tabla 21

Comparación del consumo de energía en las etapas de proceso (Gj/ton) para el año 2008

Región	Producción de hierro	BOF	EAFs (DRI)	EAFs (scrap based)
Asia	38,1	24,2	30	12,5

Nota. Aunque la proporción de consumo de energía de la fabricación de acero BOF y EAFs fue relativamente pequeña, fue muy inferior al nivel avanzado nacional en 2007. Además, el proceso anterior de fabricación de hierro y el consumo de energía del sistema de fabricación de hierro (incluida la coquización, la sinterización, la granulación y la fabricación de hierro) consumieron alrededor del 78,87% del total, revela que todavía existen grandes espacios para el ahorro de energía y la reducción de emisiones en el hierro de Asia. Fuente (Ren & Wang, 2011).

Las emisiones causadas por el consumo de energía se deben principalmente a la fabricación de acero de BOF y EAFs, aunque el consumo de energía fue relativamente pequeño, posee hasta un 90% de emisiones de CO<sub>2</sub> acero (ver tabla 22). Según los datos, la emisión de CO<sub>2</sub> de BF-BOF es de aproximadamente 1700kg / t (acero) y la Scrap-EAF es de aproximadamente 400kg / t (acero) (Ren & Wang, 2011, pág. 5)

Tabla 22

Comparación de las emisiones de tCO<sub>2</sub>/t en la producción de Hierro-acero

Región	BOF	EAFs (DRI)	EAFs (scrap based)
Asia	1,745	0,941	0,339

Nota. Gran parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la producción de acero provienen de la combustión del combustible. Diferentes tipos de la energía tiene una intensidad de emisión de CO<sub>2</sub> diferente. Fuente (Ren & Wang, 2011).

Así mismo (Hasanbeigi, Arens, Cardenas, Price, & Triolo, 2016) realizó un estudio sobre “Comparación de la intensidad de las emisiones de dióxido de carbono de la producción de acero en China, Alemania, México y los Estados Unidos”, en su trabajo los autores describen una

metodología para comparar de manera precisa y más justa la intensidad de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) , los factores de conversión relacionadas con la energía de la producción de acero en diferentes países y la estructura de la industria.

La producción de hierro y acero es un proceso de fabricación intensivo de energía y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en las distintas etapas de proceso, la metodología que describen en el estudio es implementar la reducción del mineral de hierro y otras tecnologías en el proceso más intensivo de energía dentro de la industria del acero (BFO) y realizar una comparación de la intensidad de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía de la industria del hierro y el acero en cuatro países.

En el presente estudio se evidencia los consumos de energía y combustible para la etapa de proceso de fabricación del acero (ver figura 4). Los resultados en los factores de conversión de worldsteel pueden ser ligeramente diferentes de la intensidad de CO<sub>2</sub> de la industria siderúrgica para cada país utilizando factores de conversión exactos que toman en cuenta el origen de todos los productos intermedios y la intensidad de CO<sub>2</sub> de los productos en esos países (ver tabla 23)

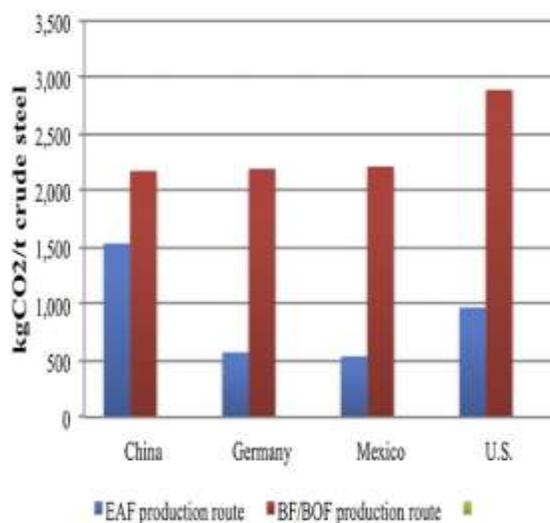


Figura 4 Intensidades de CO2 para la producción de EAF y BF / BOF en China, Alemania, México y los Estados Unidos en 2010.

Fuente : (Ali Hasanbeigi, Lynn Price, Zhang Chunxia, Nathaniel Aden , Li Xiuping, 2014)

Tabla 23

Intensidades de CO2 relacionadas con la energía para la industria del hierro y el acero en China, Alemania, México y los EE. UU. (2010)

País de estudio	Escenario	Intensidad total de CO2 relacionada con la energía (kgCO2 / t acero)
China	VNC específicas de cada país para combustibles	2148
	Factor de emisiones de CO2 de electricidad específico del país	
Alemania	Factores de conversión de worldsteel producto específicos del país	1708
	VNC específicas de cada país para combustibles	
México	Factor de emisiones de CO2 de electricidad específico del país	1080
	Factores de conversión de worldsteel producto específicos del país	
EE.UU	VNC específicas de cada país para combustibles	1736
	Factor de emisiones de CO2 de electricidad específico del país	
	Factores de conversión de worldsteel producto específicos del país	

Nota. Como se señaló anteriormente, el propósito del análisis presentado en este documento es probar una metodología para cuantificar y comparar las intensidades de CO2 de la producción de

acero en China, Alemania, México y los EE. UU., Utilizando límites definidos y factores de conversión. Fuentes (Ali Hasanbeigi, Lynn Price, Zhang Chunxia, Nathaniel Aden , Li Xiuping, 2014).

Por otra parte (Morfeldt, Nijs, & Silveira, 2015, págs. 103, 469–482) realizo un estudio sobre “El impacto de los objetivos climáticos en la producción futura de acero: un análisis basado en un modelo de sistema energético global”, en su trabajo los autores describen la importancia de implementar un sistema de energía global ETSAP-TIAM, que pueda influir en el despliegue de la tecnología de producción de hierro-acero y permita reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>. En la UE, el sector es responsable del 4,7% de las emisiones totales, lo que equivale a un total de 182 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> (Morfeldt, Nijs, & Silveira, 2015, pág. 5). El modelo se usó para encontrar vías tecnológicas rentables, recursos de mineral de hierro y la disponibilidad de chatarra, lo que permite las discusiones sobre la acumulación de acero en uso en la sociedad y las implicaciones para las futuras elecciones de tecnología.

Algunas de las tecnologías de producción primaria utilizan una cantidad limitada de chatarra para complementar el mineral de hierro (EAFs DRI) y el resto de la producción mineral de hierro. Las tecnologías de producción primaria tradicionales producen altas emisiones de CO<sub>2</sub> (ver Tabla 24), pero la investigación y el desarrollo en el sector apunta a reducir las emisiones optimizando los procesos actuales y desarrollando enfoques innovadores (Silveira, Morfeldt, Nijs, & Lodewijks, 2012)

La ruta de producción secundaria utiliza chatarra de acero como recurso ferroso y consume menos energía que la ruta primaria. La chatarra se refina en acero usando un horno de arco eléctrico (EAFs). La producción de acero basada en chatarra consume menos energía, ya que el

recurso de chatarra ya pasó por el proceso de reducción durante su ciclo de vida anterior (ver Tabla 24).

Tabla 24

Intensidades de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> de los procesos de producción de acero.

Proceso		Energía específica (Gj/ton acero)	Emisiones específica CO <sub>2</sub> (tonCO <sub>2</sub> /ton acero)
Producción primaria	BOF	19,8-31,2	1,5-1,8
	EAFs (DRI)	28,3-30,9	0,7-1,2
Producción secundaria	EAFS (scrap based)	9,1-12,5	0,3-0,5

Nota. El rango en la demanda de energía depende de la tecnología utilizada y del producto de acero destinado. Las emisiones específicas de CO<sub>2</sub> son promedios de los países para las distintas rutas y los rangos explican la diferencia en las emisiones de CO<sub>2</sub> para la generación de electricidad sin carbón en comparación con la generación de electricidad a base de carbón. Fuentes (World Steel Association, 2009).

Y finalmente (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, & Marrero, 2016, págs. 58, 565–573) realizo un estudio sobre “Bases de datos de ACV centradas en materiales de construcción: una revisión”, en su trabajo los autores describen la evaluación del impacto ambiental causado por los materiales de construcción.

La evaluación del impacto ambiental causado por los materiales de construcción según A. (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, & Marrero, 2016) a menudo presenta obstáculos tales como el desajuste entre la ubicación del proyecto de construcción y el lugar donde se realizó la base de datos de ACV. Se ha realizado una revisión de las bases de datos de ACV existentes que contienen datos para materiales de construcción, GaBi Database y Ecoinvent se destacan por su integridad, facilidad de uso y recursos dedicados.

El ACV del acero se ha tomado de bases de datos, Ecoinvent, ELCD y Eurofer (ver Tabla 25) para las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en la etapa de proceso que proporciona información de

alta calidad, un índice de reciclaje promedio del 80% para barras de acero reforzado y especifica que el consumo de energía es del 100% de los combustibles fósiles y los datos obtenidos son proporcionados por la Asociación Mundial del Acero; sin embargo, los datos de ELCD proporcionan una mayor transparencia mientras se ajustan al material de construcción exacto, presentan los mejores datos a pesar de la diferencia en la energía incorporada en comparación con las otras fuentes.

Tabla 25

Energía incorporada y emisiones de CO<sub>2</sub> de la de producción de acero.

Proceso		Energía incorporada Mj/Kg	Emisiones GEI (kgCO <sub>2</sub> /kg)	Mezcla de energía
Producción primaria	BOF	2,9	1,71	100% Fósil
	EAFs (DRI)	10,6	1,03	84,23% Fósil 14,87% Electricidad
Producción secundaria	EAFS (scrap based)	6,4	0,62	13% Fósil 83,24% Electricidad 2,36% Nuclear

Nota. La tabla muestra los datos de Ecoinvent Centre. Ecoinvent website. (<http://www.ecoinvent.org/database/database.html>); 2015 [accessed 25.08.15]. Que provienen de la Asociación Europea de Aluminio: un organismo especializado que proporciona una mayor confiabilidad.

Pasó 3. Factores de emisiones CO<sub>2</sub> regionales generales. Para cada región, etapa del proceso, tipo de tecnología.

A continuación, se muestra la tabla 26 que contendrán los factores de emisión de CO<sub>2</sub> presentado anteriormente por región y la energía incorporada en las distintas etapas de proceso.

Tabla 26

Energía incorporada y emisiones de CO<sub>2</sub> de la producción de acero de diferentes bases de datos de ACV

Región	Producción primaria		Producción secundaria
	BOF	EAFs (DRI)	EAFs (Scrad based)
Asia	1,745	0,94	0,34
Oceanía	1,8	1,20	0,50
América del Norte	2,70	1,20	0,90
Europa	1,71	1,03	0,62
América del sur	2,2	0,80	0,50
Total (ton)	10,155	5,1710	2,8590

Nota. La tabla esta complementada por los valores de bases de datos de diferentes organizaciones Ecoinvent, GaBi database, U,S life Cycle inventory, Base carbone Bsedec database. Fuente (Springer & Hasanbeigi, 2016), (Purohit & Höglund-isaksson, 2017), (INTERNATIONAL, 2015), (Classen M, Althaus HJ, Blaser S, 20009) y (World Steel Association, 2018).

La tabla 27 muestra en la primera columna los factores de emisión general emitidos por región de las diferentes industrias del acero teniendo en consideración las emisiones asociadas con la producción primaria, incluyen dos columnas más que describen los factores de emisiones de CO<sub>2</sub> presentadas por diferentes bases de datos y revisión bibliográfica de estudios similares.

Tabla 27

Factores de emisión ponderados en la producción primaria de acero por región

Región	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)
Asia	2,686	16,50	15,00
Oceanía	3,000	13,2	2,16
América del Norte	3,900	3,81	0,54
Europa	2,740	12,70	6,70
América del sur	3,000	2,7	13,600
Promedio global(tonCO <sub>2</sub> /t)	3,07	12,750	9,948

Nota. Las variaciones por región se pueden atribuir a la eficiencia de las etapas de proceso en la producción primaria. Para las emisiones de CO<sub>2</sub> no se tiene en cuenta la equivalencia de los contaminantes atmosféricos (CO<sub>2</sub>). Fuente (Ghg Inventory for Australia, 2006) (Société de Calcul Mathématique SA, 2009<sup>a</sup>) (Castaño et al., 2016), (Ren & Wang, 2011), (Hasanbeigi et al., 2016), (Silveira et al., 2012) y (Martínez-Rocamora et al., 2016)

## 2.4 Tubería PVC

**2.4.1 Caracterización del producto.** Las tuberías de PVC son un elemento fundamental en la industria y construcción, este material se usa principalmente para transportar todo tipo de fluidos bajo presión o por efecto de la gravedad de un punto a otro. La fabricación de tubos de PVC es un proceso muy eficiente. Requiere bajos insumos de energía y agua y tiene la capacidad de devolver inmediatamente los materiales de desecho directamente al proceso de fabricación. Esto se traduce en prácticamente en ningún desperdicio de fabricación.

Se pronostica que la demanda mundial de tuberías de agua aumentará 7.5 por ciento por año hasta 2017 a 10,9 mil millones de metros, una aceleración significativa respecto al ritmo del período 2007-2012, en cambio en China se pronostica que representará un tercio del aumento en la demanda mundial de tuberías de agua entre 2012 y 2017, según Fredonia (2017) la industria mundial de tuberías de agua se estima en 7,6 billones de metros. Presenta datos históricos de demanda para 2002, 2007 y 2012, y pronósticos para 2017 y 2022 por mercado (construcción, transmisión y servicio, alcantarillado y drenaje, riego) y para 22 grandes países. En diez años, la producción mundial de plásticos pasó de 245 millones de toneladas en 2006 a 348 millones de toneladas en 2017, según las cifras presentadas recientemente por la federación europea PlasticsEurope.

El proceso de fabricación utiliza pequeñas cantidades de electricidad y produce pocas emisiones de CO<sub>2</sub>, el PVC se produce cuando las moléculas de cloruro de vinilo se asocian entre sí, formando macromoléculas. Este proceso es llamado polimerización, donde puede ser realizado de dos formas: por polimerización de emulsión o suspensión. Ambos usan un proceso

semicontinuo, donde los reactores se alimentan con el monómero cloruro de vinilo, aditivos, catalizadores y agua, la diferencia entre estos dos procesos está en el tamaño y las características de los gránulos del PVC. Con respecto a la construcción, el proceso utilizado para producir tuberías PVC es suspensión.

El consumo de energía en la fabricación del PVC varía de acuerdo al proceso entre 828-1041Kwh/kg, estas fueron mayores que las utilizadas para PE y PP, ya que se requería electricidad adicional para que la electrólisis produjera cloro. Además, los efectos del ahorro de energía se estudiaron utilizando un electrodo de difusión de gas proyectado para la electrólisis de la sal en la reducción de CO<sub>2</sub>. Se estimó que la reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub> fue del 7% en comparación con los procesos actuales de fabricación de PVC (Narita, Sagisaka, & Inaba, 2005, págs. 7(5), 277–282)

**2.4.2 Factor de emisión de la tubería PVC.** Para la estimación de la huella de carbono del PVC, se recopilará información de diferentes estudios sobre los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del material para cada región, por etapa de proceso o por energía consumida durante su fabricación. En esta recopilación se detallará la información precisa de estudios realizados que describan el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la producción de tubería de s-PVC. Los valores de factores de emisión para el material de estudio serán en tonCO<sub>2</sub>/por su unidad de producción, en estos valores no se contemplarán las emisiones de los demás GEI, pero, aun así, solo se detallarán en la etapa de producción de cada material de estudio.

Sobre la base del marco descrito anteriormente, las emisiones se estimaron de la siguiente manera.

Paso 1. Estimar la producción por etapa de proceso y por región: Para cada región, los niveles de producción se estiman por cada etapa del proceso.

(Ministerio de Medio Ambiente., 2005), realizó un estudio sobre” Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector de DCE, CVM y PVC”, en su trabajo el autor corporativo describe las metodologías y tecnologías de esta década en la producción de tuberías de PVC en suspensión (s-PVC) para el transporte de agua a presión, describe que son una de las opciones más sostenibles debido al menor gasto energético y a la menor producción de CO<sub>2</sub> que muestran durante todo su ciclo de vida. Estas ventajas se pueden apreciar durante las diferentes fases de su ciclo de desde la producción y el uso, hasta la fase final de reciclaje

Durante el proceso de fabricación de la tubería s-PVC sólo se consume energía eléctrica, eliminando así la emisión directa de gases a la atmósfera debida a la combustión de combustibles. Este proceso de alta eficiencia energética, de Molecor, hace que el consumo energético sea más bajo, y como además se utiliza energía procedente 100% de energías renovables, la contribución al efecto invernadero es inferior comparado con los procesos de producción de otros fabricantes de s-PVC. Durante el proceso polimerización en suspensión molecular, el PVC es sometido a un estiramiento que produce una estructura laminar en la pared del tubo que mejora de forma importante las propiedades mecánicas de la tubería. Esto también genera una reducción del espesor de la pared del tubo, por lo que, con menor cantidad de materia prima, se consigue un tubo de mayores prestaciones mecánicas y por tanto una optimización de materias primas. En la tabla 28 se muestra la cantidad de producción de tubería de PVC para el año 2017.

Tabla 28

Cantidad de tubería de PVC producido por regiones para el año 2017

Región	s-PVC total (Mt)
Asia	121.8
Oceanía	15.66
América del Norte	93.96
Europa	99.876
América del sur	15,66
<b>Total (Mton)</b>	<b>348</b>

Nota. Las variaciones por región se pueden atribuir a la eficiencia de las etapas de proceso en la producción primaria. Fuente (Ministerio de Medio Ambiente, 2005).

Paso 2. Desarrollar los factores de emisión por región. Se estimaron los factores de emisión tanto para el CO<sub>2</sub> relacionados con la energía y/o proceso.

Factores de emisión de CO<sub>2</sub> relacionados con la energía, la electricidad, el combustible o el recurso utilizado para generar electricidad es el factor más importante que influye en las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía. Los factores de emisión de electricidad promedio ponderados se desarrollaron utilizando datos para cada tipo de tecnología, para cada etapa del proceso y para cada región.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso son solamente los que resultan del consumo del ánodo de carbono durante la reducción electrolítica en el proceso de producción primaria.

(Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, & Marrero, 2016) realizó un estudio sobre “Bases de datos de ACV centradas en materiales de construcción: una revisión”, en su trabajo los autores describen la evaluación del impacto ambiental causado por los materiales de construcción.

La evaluación del impacto ambiental causado por los materiales de construcción según A. (Martínez-Rocamora, Solís-Guzmán, & Marrero, 2016) a menudo presenta obstáculos tales como el desajuste entre la ubicación del proyecto de construcción y el lugar donde se realizó la base de datos de ACV. Se ha realizado una revisión de las bases de datos de ACV existentes que contienen datos para materiales de construcción, GaBi Database y Ecoinvent se destacan por su integridad, facilidad de uso y recursos dedicados.

El ACV de la tubería de PVC se ha tomado de bases de datos, Ecoinvent, ELCD y Eurofer (ver Tabla 29) para las emisiones de CO<sub>2</sub> basadas en la etapa de proceso que proporciona información de alta calidad. Al igual que con el acero, aunque los datos de BEDEC y Base Carbone están razonablemente cerca de la ubicación del proyecto, existen otras fuentes más confiables, como PlasticsEurope, que proporciona mejor documentación, transparencia y especialización.

Tabla 29

Energía incorporada y emisiones de CO<sub>2</sub> de la de producción de PVC 2017

Región	Energía incorporada Mj/Ton	Emisiones GEI (TonCO <sub>2</sub> /Ton Aluminio)	Mezcla de energía
Asia	67,9	3,24	87,04% Fósil 2,05% Electricidad 9,91% Nuclear
Oceanía	56,2	2,71	87,54% Fósil 1,45% Electricidad 10,75% Nuclear
América del Norte	61,1	2,36	86,2% Fósil 12,5% Electricidad 1,33% Nuclear
Europa	60,9	2,71	87,52% Fósil 9,92% Nuclear 2,22% Electricidad
América del sur	67,9	2,02	78,82% Fósil 19,87% Nuclear 1,56% Electricidad

Nota. La tabla esta complementada por los valores de bases de datos de diferentes organizaciones Ecoinvent, GaBi database, U,S life Cycle inventory, Base carbone Bsedec database, plasticEurope. Fuente (Martínez-Rocamora et al., 2016).

Así mismo (Khan, Ltd, & Tee, 2015), realizo un trabajo sobre “Cuantificación y comparación de emisiones de carbono para tuberías subterráneas flexibles “, en su trabajo o autores describen que la fase más dominante del ciclo de vida de la tuberías es el proceso de fabricación, lo que genera grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> y propone una metodología para estimar la huella de carbono y el costo del ciclo de vida como herramienta de apoyo a la toma de decisiones gerenciales para la gestión de redes de tuberías subterráneas.

Al igual que otros proyectos de ingeniería, se requiere identificar los beneficios potenciales del análisis de la huella de carbono de tuberías de PVC y hacer que se cumpla como una práctica obligatoria para las diferentes industrias de fabricación. Este estudio concluyo que la energía era un factor importante en el ACV en los impactos ambientales asociados con las etapas de proceso en la fabricación de tuberías.

La estimación de CO<sub>2</sub> en la producción de tuberías de PVC presentadas en este estudio (ver tabla 30) para cuantificar el consumo de energía, desde la fase de extracción de materia prima hasta que las tuberías están listas para abandonar la planta de fabricación.

Generalmente, el material más altamente procesado libera una mayor energía incorporada, dicha energía también puede variar con la ubicación y el tiempo. Además, depende de los métodos de extracción de materiales, las metodologías de fabricación y el tipo de energía consumida en todos los procesos. Los materiales de tuberías livianos, como las tuberías de PVC, suelen tener una energía más baja que las tuberías pesadas, como el acero y el hierro dúctil.

Tabla 30

Factores de emisiones de CO2 del PVC en España

Fuente de energía	tCO2/ton
Electricidad	0,443
Producción de PVC	0,287
Gasoleo	0,267
Gas natural	0,202
Carbón	0,346
<b>Total emisión</b>	<b>1,545</b>

Nota. En el análisis de resultados que aquí se presentan, se incluyen los consumos de energía y de emisiones de CO<sub>2</sub>, que se obtuvieron para la zona del Prat de Llobregat (Barcelona) y se consideran como magnitudes representativas para España. Fuente (Recio, Narvaez, & Guerrero, 2005).

Por otra parte (Paul & et al, 2017), realizo un estudio sobre” Productos químicos de tratamiento de datos del inventario de ciclo de vida (ACL), materiales de construcción, transporte, equipo en el lugar y otros procesos para su uso en hojas de cálculo para el análisis de la huella ambiental (SEFA)”, en su trabajos los autores describen, los factores de emisión ambiental (EmF) para productos químicos clave, materiales de construcción y tratamiento, equipos de transporte / en el sitio y otros procesos utilizados en los sitios de remediación., la base para los materiales químicos, de construcción y de tratamiento EmFs y datos de los contaminantes peligrosos del aire de criterio (por ejemplo, NOX, SOX y PM10).

Los datos suministrados en este estudio de los factores de emisión producido por el PVC son obtenidos por medio de software OpenLCA, para cada uno de los 85 métodos analíticos, donde cada “proceso” proporcionaba factores de emisión para cada método.

Según (Gautam, Pandey, & Agrawal, 2017) OpenLCA utilizó varias bases de datos de antecedentes (es decir, USLCI, ecoinvent v2.2, base de datos de ciclo de vida de la EPA de los EE. UU.) Para crear factores de emisión para cada servicio analítico, que se analizaron en

función de ocho categorías de huella. Las categorías de huellas incluyeron: NOX (kg NOX), SOX (kg SOX), Calentamiento global: GWP100 (Potencial de calentamiento global, kg CO2 eq), Uso de agua (m3 H2O), PM10 (kg PM), HAP (kg HAPs), Agotamiento de fósiles: FDP (Potencial de agotamiento de fósiles, kg eq de petróleo), y Demanda de energía: CED (Demanda de energía acumulada, MJ. La tabla 31, muestra un factor de emisión para cada categoría de huella deseada en la producción del PVC.

Tabla 31

Factores de emisión de SEFA para el cloruro de polivinilo

Material	CED (MMBtu/lb)	GWP100 (tnCO2/ton)	HAPs (ton/ton)	NOx (ton/ton)	PM10 (ton/ton)	SOx (ton/ton)
PVC	0,00262	2,02	0,000375	0,004	0,000372	0,00274

Nota. Aunque el CED sigue siendo una categoría de huella porque no evalúa el impacto de la demanda de energía, GWP sí considera la potencia de las sustancias para inducir el calentamiento global cuando se convierte a equivalentes de dióxido de carbono y, por lo tanto, es más como un indicador de impacto. Fuente (Paul et al., 2017).

Y finalmente (Environmental Product Declaration (EPD), 2015, págs. 1–24), realizo un estudio sobre “Declaración de producto ambiental Tuberías de PVC sin presión para aplicaciones de construcción”, en su trabajo el autor corporativo describe, la producción de tubería de PVC registrada en Australia, las características del producto y la descripción general del ciclo de vida.

El ciclo de vida, que describe el autor corporativo de un producto de construcción (PVC) se divide en tres módulos de proceso de acuerdo con las Instrucciones Generales del Programa (GPI) del Programa EPD de Australasia del primer módulo. La Tabla 32 muestra el límite del sistema y el alcance de la EPD El alcance de esta EPD es la “cuna a la puerta con opciones”,

según lo define la EN 15804. La intención de la EPD es cubrir todos los impactos significativos a lo largo del ciclo de vida completo. (Environmental Product Declaration (EPD), 2015, pág. 8)

Tabla 32

Factores de emisión de SEFA para el cloruro de polivinilo

Material	ADPF (MJ/Kg)	GWP (tnCO2/ton)	POCP (ton/ton)	NOx (ton/ton)	PM10 (ton/ton)	SOx (ton/ton)
Pvc	5562	2,77	0,000375	0,004	0,000372	0,00811

Nota. La mayor parte del impacto ambiental se encuentra dentro de la materia prima suministrada a los sitios de fabricación, que se describe dentro de este estudio en el primer módulo. Fuente (Environmental Product Declaration (EPD), 2015).

Pasó 3. Factores de emisiones CO2 regionales generales. Para cada región, etapa del proceso, tipo de tecnología y GEI, las emisiones se estiman multiplicando los factores de emisión específicos de la tecnología por los datos de producción apropiados.

A continuación, se muestra la tabla 33 que contendrán los factores de emisión de CO2 presentado anteriormente por región y la energía incorporada en las distintas etapas de proceso.

Tabla 33

Energía incorporada y emisiones de CO2 de la producción de PVC de diferentes bases de datos de ACV

Región	Energía incorporada Mj/ton	Emisiones GEI (tonCO2/ton )
Asia	67,9	3,24
Oceanía	5,62	2,77
América del Norte	6,11	2,02
Europa	6,09	1,545
América del sur	6,2	2,02

Fuente: Autor del proyecto.

La tabla 34 muestra en la primera columna los factores de emisión general emitidos por región de las diferentes industrias del acero teniendo en consideración las emisiones asociadas

con la producción primaria, incluyen dos columnas más que describen los factores demisiones de CO2 presentadas por diferentes bases de datos y revisión bibliográfica de estudios similares.

Tabla 34

Factores de emisión ponderados en la producción primaria de PVC por región

Región	Factor de emisión (tonCO2/t)	Factor de emisión (tonCO2/t)	Factor de emisión (tonCO2/t)
Asia	3,24	1,41	1,77
Oceanía	2,77	2,832	2,57
América del Norte	2,02	2,09	2,39
Europa	1,545	1,99	2,15
América del sur	2,02	2,6	2,3
Promedio global(tonCO2/t)	2,32	2,184	2,236

Nota. Las variaciones por región se pueden atribuir a la eficiencia de las etapas de proceso en la producción primaria. Para las emisiones de CO2 no se tiene cuenta la equivalencia de los contaminantes atmosféricos (CO2). Fuente (ISOPA, 2015), (Franklin Associates, 2011), (Kissinger, Sussmann, Moore, & Rees, 2013), (MARIA TERESA GALÉ ZABALETA & KEISSY MARGARITA PAREDES, 2014), (Martínez-Rocamora et al., 2016), (Khan, Lutfur Rahman; Jacobs Engineering Ltd, Tee, 2015), (Paul et al., 2017) y (Environmental Product Declaration (EPD), 2015).

## 2.5 Mampostería

**2.5.1 Caracterización del producto.** El ladrillo es un material de construcción muy usado desde la antigüedad, y actualmente es resaltado por su disponibilidad de recursos, estrés ambiental, calidad estética, flexibilidad y sobre todo por su resistencia a las cargas y la intemperie. Este material es uno de los más importante en nuestra sociedad moderna, debido a sus propiedades físicas, constructivas y a su precio, es por ello que sigue siendo una alternativa para las industrias de construcción por su relación costo beneficio, convirtiéndose en unos de los materiales más populares (Halim, Sikder, Begum, Parveen, & Hossain, 2016)

Con respecto a la producción global del ladrillo se estima que fue de 1,5 billones de unidades para el año 2016 según datos del IPCC, y de estos, el 87 % corresponde a lo producido en países asiáticos. Un alto porcentaje de esta producción corresponde a ladrillos fabricados a mano; así, por ejemplo, en China, con una producción total del orden de 1000 billones de unidades, apenas el 12.5 % se fabrican en procesos automatizados y (Habla Zig-Zag Kilns, 2015). Este volumen de producción y el tipo de procesos no-controlados adecuadamente trae como consecuencia la generación de altos volúmenes de residuos que se suman a los derivados de las actividades de construcción y demolición.

La materia prima básica para producir los ladrillos es la arcilla, arena y agua. La arcilla y la arena son trituradas para luego ser mezcladas con agua hasta formar una masa, luego esta es moldeada para formar el ladrillo crudo, y como último paso está el secado, cocción y deshornado, donde se disminuye la humedad de ladrillo y es llevado a hornos, en este paso el calor hace que se genere cambios químicos en la arcilla y demás componentes.

(Pontificia Universidad Católica del Perú., 2012, págs. (511), 28. ), en su estudio realizado en el 2012, acerca del análisis de ciclo comparativo entre ladrillos artesanales y mecanizados en América del Sur, se mostró la cantidad de Kg de materia prima (arena, agua y arcilla), y la cantidad de Kg de combustible utilizado en los hornos cerámicos requeridos para fabricar un ladrillo. (Pontificia Universidad Católica del Perú., 2012) afirma que la cocción genera grandes emisiones al medio ambiente, provenientes por la quema de combustibles utilizados en los hornos, que en la mayoría de los casos son el aserrín y las ramas de eucalipto Los hornos cerámicos usados en la producción del ladrillo consumen una gran cantidad de combustibles

fósiles, generando un elevado gasto energético y liberando a la atmosfera grandes gases de efecto invernadero.

El impacto ambiental del proceso de producción se debe principalmente al consumo de energía para la cocción de ladrillos y la extracción de materias primas. El consumo de energía directo promedio del proceso de producción se encuentra entre 1.840 y 2.800 kJ / kg de ladrillos cocidos (de los cuales aproximadamente 150 kJ / kg son eléctricos) (Moedinger, 2005). Algunas fuentes independientes (Oti, Kinuthia, & Bai, 2009, págs. 107(3–4), 130–139.), indican que la fabricación tradicional de ladrillos cocidos tiene un coste energético de 4186,8 MJ por cada tonelada de ladrillos producidos con una temperatura de cocción entre 900 y 1200°C. En la actualidad, los ladrillos generalmente se queman en un horno de túnel en el que el fuego permanece estacionario y los ladrillos se mueven en los autos de horno a través de un túnel dividido en zonas de precalentamiento, encendido y enfriamiento. Al proceso de contenido energético del producto, o energía gris, se debe agregar contenido energético debido al transporte y la producción de materias primas para obtener el impacto ambiental general.

Toda esta energía utilizada se genera tradicionalmente con combustibles fósiles. Según (Moedinger, 2005) En Basser, los combustibles fósiles de Gasser han sido sustituidos con éxito por combustibles renovables, como el biogás, este último se genera en una planta propia basada en un proceso patentado internacionalmente por el propio ladrillero. Los combustibles renovables tienen la principal ventaja sobre los combustibles fósiles de que los gases de combustión resultantes tienen un menor contenido de contaminantes, lo que permite calentar el secador de ladrillos directamente al reciclar los gases de combustión en lugar de tener una fuente

de calor separada para hacer funcionar el secador. La reducción de los requisitos de calor total logrado solo por esta medida es aproximadamente el 30% del requisito de calor total anterior.

**2.5.2 Factor de emisión de la mampostería.** Para la estimación de la huella de carbono del acero, se recopilará información de diferentes estudios sobre los factores de emisión de CO<sub>2</sub> del material para cada región, por etapa de proceso o por energía consumida durante su fabricación. En esta recopilación se detallará la información precisa de estudios realizados que describan el factor de emisión de CO<sub>2</sub> de la producción de ladrillo estructural. Los valores de factores de emisión para el material de estudio serán en tonCO<sub>2</sub>/por su unidad de producción, en estos valores no se contemplarán las emisiones de los demás GEI, pero, aun así, solo se detallarán en la etapa de producción de cada material de estudio.

Sobre la base del marco descrito anteriormente, las emisiones se estimaron de la siguiente manera:

Paso 1. Estimar la producción por etapa de proceso y por región: Para cada región, los niveles de producción se estiman por cada etapa del proceso.

(Koroneos & Dompros, 2007, págs. 42(5), 2114–2123), realizó un estudio sobre “Evaluación ambiental de la producción de ladrillos en Grecia.”, en su trabajo el autor describe las diferentes etapas seguidas durante la producción de ladrillos y la energía utilizados en cada etapa. El propósito como lo narra el autor es identificar los “puntos calientes”, es decir, partes del ciclo de vida que es importantes para el impacto ambiental total.

En 2016 la producción de ladrillo se estima que rodea los 1,5 billones de unidades producidas anualmente esto se debe a la rápida aceleración de la urbanización a una tasa promedio del 6% anual, este crecimiento está impulsando la creciente demanda de ladrillos en diferentes países del mundo que inclusive son exportadores de este material. Aproximadamente el 87% de los 1500 billones de ladrillos de arcilla producidos anualmente son hechos en Asia y China, representando dos tercios de la producción global de ladrillo (Weyant, al, & Athalye, 2014, págs. 48(11), 6477–6483) En la tabla 35 se evidencia la cantidad de ladrillos producidos en mundo por unidades hasta el año 2016.

Tabla 35

Producción de ladrillo mundial

Región	Ladrillo (Bill)
Asia	1.300,00
Oceanía	25,00
América del Norte	100,00
Europa	55
América del sur	20,00
Total (Bill)	1.500

Nota. Solo la región de Asia produce el 86,86% de la producción global de ladrillos en el mundo.  
Fuente <http://www.hablakilns.com/the-brick-industry/the-brick-market/>

Paso 2. Desarrollar los factores de emisión por región. Se estimaron los factores de emisión tanto para el CO<sub>2</sub> relacionados con la energía y/o proceso.

Factores de emisión de CO<sub>2</sub> relacionados con la energía, la electricidad, el combustible o el recurso utilizado para generar electricidad es el factor más importante que influye en las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía. Los factores de emisión de electricidad promedio

ponderados se desarrollaron utilizando datos para cada tipo de tecnología, para cada etapa del proceso y para cada región.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con el proceso son solamente los que resultan del consumo del ánodo de carbono durante la reducción electrolítica en el proceso de producción primaria.

(Nepal, al, & Mahapatra, 2019), realizo un estudio sobre “Un estudio comparativo de las emisiones de la pila de hornos de ladrillos en línea recta y en zigzag en Nepal”, en su trabajo los autores descubrieron que convertir la tecnología de hornos de línea recta a hornos en zigzag puede reducir las emisiones de PM<sub>2.5</sub> en un 20% y las emisiones de BC en un 30%, según las estimaciones del factor de emisión por kilogramo de combustible. Mientras se considera por kilogramo de ladrillo cocido, las reducciones de emisiones fueron aproximadamente del 40% para PM<sub>2.5</sub> y del 55% para BC, pero esto definitivamente depende de los procedimientos adecuados de apilado y cocción.

Las etapas de proceso común en la fabricación del ladrillo van desde la preparación de las materias primas hasta la cocción en los hornos pasando por el moldeado-secado, en cada una de estas etapas de proceso se producen diferentes emisiones debidos a los GEI. Para cocción de ladrillos. Aproximadamente el 1,2% de las emisiones globales de dióxido de carbono antropogénico (CO<sub>2</sub>) se producen al quemar carbón para disparar ladrillos (Lopez, Lyoda, Segal, & Tsai, 2012, págs. 1–28. ). Para proporcionar una perspectiva global sobre los factores de emisión (EF) (en base a cada kilogramo de combustible usado y por kilogramo de ladrillos cocidos producidos) y la concentración en tiempo real de diferentes contaminantes de hornos de

ladrillos, investigación previa de China, India, Bangladesh, Nepal, Vietnam, México y Sudáfrica se compararon juntos (ver tabla 36).

Tabla 36

Resumen de los factores de emisión basados en el combustible (ton / ton de combustible) de diferentes contaminantes en este estudio en comparación con estudios anteriores

Región	Tipo de horno	Combustible	CO2	SO2	PM2.5	BC
Asia	FCBTKs	Carbón, troncos de madera	2,182	0,0105	0,00303	0,0024
América del norte	Tradicional	Aserrín, madera, diesel	1,668	0,0001	0,0013	0,0005

Nota. El combustible para el CO2 entre los hornos tradicionales, como se observó en la literatura anterior, varió de 1,66 a 2,182 ton / ton. El EF fuel promedio para el CO2 (1633ton/ ton) en las FCBTKs se encuentra en un rango de valores comparables a los observados en estudios anteriores, excepto en los hornos tradicionales de México. Fuente(Zavala et al., 2018),(Maithel et al., 2012) y (Nepal et al., 2019).

Así mismo (Cárdenas & Márquez, 2011, págs. 1-17), realizo un estudio sobre “Determinación de emisiones de gases de invernadero en base a factores de emisión y monitoreo de eficiencia energética en la comunidad ladrillera El Refugio, León Guanajuato” en su trabajo los autores describen los tipos de hornos empleados en la las diferentes ladrilleras que actualmente operan regularmente, los estudios que permitan cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por fuentes de emisión como las ladrilleras y los distintos tipos de combustibles empleado para alimentar los hornos en el proceso de cocción.

El inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (CO2 y CH4 ) generadas por la producción artesanal de ladrillos en la comunidad de El Refugio son valores reportados en IPCC por consumo de energía para la cocción de un kilogramo de ladrillo (Meijer & Pullus, págs. 1–103). Los factores de emisión medidos durante el estudio realizado por el INE en 2009 y los

reportados por la EPA están en kilogramos del gas por tonelada de ladrillo cocido, mismos que se muestran en la Tabla 37. Los factores de emisión de IPCC están dados en toneladas de gas emitido por cantidad de energía necesaria para la cocción de ladrillos, por lo que se consideró la cantidad de combustible que reportan por quema, en todos los casos utilizan diferentes derivados de la madera, y el calor de combustión de la madera.

Tabla 37

Factores de emisión de Gases de Efecto Invernadero del proceso de producción del ladrillo (ton/Ton Ladrillo producido)

	Tecnología	Factor de emisión CO2	Factor de emisión CH4
	Horno de túnel dispersión de aserrín	0,222	0,000017
Curado y disparo	Horno de túnel combustión con gas	0,181	0,000017
	Horno de túnel combustión con carbón	0,136	0,000017
Secador de ladrillo	Caliente con residuos y quemadores de gas suplementario	0,032	0,00005

Fuente (Cárdenas & Márquez, 2011).

Por otra parte (Koroneos & Dompros, 2007), realizo un estudio sobre “Evaluación ambiental de la producción de ladrillos en Grecia.”, en su trabajo los autores describen las diferentes etapas seguidas durante la producción de ladrillos y la energía utilizados en cada etapa. El propósito es identificar los “puntos calientes”, es decir, partes del ciclo de vida que son importantes para el impacto ambiental total.

El análisis se realiza utilizando la metodología de evaluación del ciclo de vida (LCA), que es un método que se utiliza para identificar y cuantificar el desempeño ambiental de un proceso o un producto de “la cuna a la tumba”. El uso de la energía y las emisiones se cuantifican y se

evalúan los efectos ambientales potenciales. Los principales insumos de energía para el sistema de producción son la electricidad, el diésel y el combustible sólido (ver tabla 38).

Tabla 38

Energía incorporada, emisiones y combinación de energía de la producción de ladrillos cerámicos de diferentes bases de datos de ACL.

Proceso	Energía incorporada Mj/Kg	Emisiones GEI (kgCO <sub>2</sub> /kg)	Mezcla de energía
Preparación de materia prima	2,77	0,22	100% Fósil
Moldeado-secado	2,84	0,22	83,8% Fósil 15,17% biomasa
Cocción	3,8	0,23	73,68% Fósil 3,76% Electricidad 21,57% Nuclear

Nota. La tabla esta complementada por los valores de bases de datos de diferentes organizaciones Ecoinvent, GaBi database, U,S life Cycle inventory, Base carbone Bsedec database. Fuente (Martínez-Rocamora et al., 2016) y (Koroneos & Dompros, 2007).

Y finalmente (Ukwatta, Mohajerani, Setunge, & Eshtiaghi, 2018, págs. 74, 413–426. ), realizo un estudio sobre “Un estudio de las emisiones de gases durante el proceso de cocción a partir de ladrillos que incorporan biosólidos”, en su trabajo los autores describen cinco diferentes emisiones de gases SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO, CO y HCN a diferentes temperaturas durante todo el proceso de cocción de ladrillos de arcilla y ladrillos que incorporan biosólidos.

Los resultados indicaron que todas las emisiones de gases se incrementaron con la adición de biosólidos. La entrada de energía y los factores basados en la producción se desarrollaron en función de los resultados experimentales, que luego se utilizaron en la evaluación del ciclo de vida de los ladrillos modificados con biosólidos. Los resultados desde la cuna hasta la puerta de la evaluación del ciclo de vida revelaron que la producción de ladrillos de biosólidos redujo los

impactos ambientales para todas las categorías de impacto, excepto el impacto del agotamiento del agua en comparación con los ladrillos convencionales.

Los factores de emisión derivados en este estudio se utilizaron para el modelado de ACV. El ACV de ladrillos cocidos con y sin biosólidos se implementó de acuerdo con los principios, marcos y pautas descritos en la norma ISO 14.040 (ISO 14040, 2006) e ISO 14.044 (ISO 14044, 2006). Los factores de emisión basados en la producción (EFp) se resumen en la Tabla 39.

Tabla 39

Factores de emisión basados en la producción de ladrillos con y sin biosólidos

Tipo de ladrillo	Factor de emisión basado en la producción(g/kg)				
	HCN	SO2	NO	CO	CO2
ETP1-25	0,00000124	0,0000042	0,0042	0,015	0,47
WTP10-25	0,00000295	0,00000359	0,002	0,018	0,501

Nota. Los factores de emisión estimados dependen en gran medida del tipo de horno / horno y del combustible utilizado, la velocidad de cocción y las propiedades de las materias primas. Los resultados experimentales indican que la adición de biosólidos como material de reemplazo parcial al suelo arcilloso incrementó las emisiones gaseosas durante el proceso de cocción. Fuente (Ukwatta et al., 2018).

Pasó 3: Factores de emisiones CO2 regionales generales. Para cada región, por etapa del proceso, tipo de tecnología.

La tabla 40 muestra los factores de emisión general emitidos por región de las diferentes industrias del acero teniendo en consideración las emisiones asociadas con la producción primaria, incluyen dos columnas más que describen los factores demisiones de CO2 presentadas por diferentes bases de datos y revisión bibliográfica de estudios similares.

Tabla 40

Factores de emisión ponderados en la producción primaria de mampostería por región

Región	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)	Factor de emisión (tonCO <sub>2</sub> /t)
Asia	2,182	1,614	1,22
Oceanía	0,501	0,85	0,625
América del Norte	0,571	1,528	1,736
Europa	0,67	0,202	0,627
América del sur	0,201	0,24	0,36
Promedio global(tonCO <sub>2</sub> /t)	0,83	0,887	0,914

Nota. Para las emisiones de CO<sub>2</sub> no se tiene en cuenta la equivalencia de los contaminantes atmosféricos (CO<sub>2</sub>). Fuente (Oti et al., 2009), (Maheshwari & Jain, 2017), (Zavala et al., 2018), (Christian et al., 2010), (Rice & Vosloo, 2014), (Alberto, 2014) (Cabo Laguna, 2011), (Nepal et al., 2019), (Cárdenas & Márquez, 2011), (Koroneos & Dompros, 2007) y (Ukwatta et al., 2018).

### Capítulo 3. Análisis de Varianza

El análisis de varianza es un método estadístico que analiza simultáneamente y compara una o más variables, para concluir si son o no iguales, y que diferencia significativa hay entre ellas (Ordaz, Melgar, & Rubio, 2014)

En esta sección se aplicará el método estadístico “Análisis de Varianza” donde se involucrarán los factores de emisión por región obtenidos de cada material anteriormente expuesto en el capítulo 2. El objetivo de la aplicación del análisis de varianza, es determinar la variación presentada entre los factores de emisión de cada material por región y obtener el factor de emisión que presente menor varianza de CO<sub>2</sub> además del valor promedio de América del sur, con la finalidad de ser aplicados posteriormente en el caso de estudio.

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos de la aplicación del análisis de varianza antes expuesto en la sección (ver tabla 41-50).

Tabla 41

Resumen de factores de emisión promedio del cemento

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Asia	3	2,9	0,966666667	0,002249
Oceanía	3	1,651	0,550333333	0,042672
América del Norte	3	2,797	0,932333333	0,001336
Europa	3	2,005	0,668333333	0,015052
América de Sur	3	2,766	0,922	0,027468
Factor de emisión 1 (tonCO <sub>2</sub> /t)	5	3,632	0,7264	0,072001
Factor de emisión 2 (tonCO <sub>2</sub> /t)	5	4,396	0,8792	0,048381
Factor de emisión 3 (tonCO <sub>2</sub> /t)	5	4,091	0,8182	0,013863

Nota. La tabla muestra la varianza que se presenta por región y por cada factor de emisión. Fuente autor del proyecto.

Tabla 42

Análisis de varianza del cemento

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Regiones	0,418586267	4	0,104646567	7,070921	0,009732114	3,837853355
Factores de emisión	0,059160133	2	0,029580067	1,998712	0,197700611	4,458970108
Error	0,118396533	8	0,014799567			
Total	0,596142933	14				

Nota. El análisis de varianza arroja que si existe una diferencia significativa entre regiones, pero entre factores de emisión no existe dicha diferencia. Fuente autor del proyecto.

Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 43

Resumen de factores de emisión promedio del aluminio

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Asia	3	39,41	13,13666667	21,05103333
Oceanía	3	38,87	12,95666667	1,178633333
América del Norte	3	17,21	5,736666667	21,85423333
Europa	3	31,97	10,65666667	11,74563333
América de Sur	3	39,88	13,29333333	1,416133333
Factor de emisión 1	5	53,83	10,766	3,81313
Factor de emisión 2	5	63,77	12,754	12,23308
Factor de emisión 3	5	49,74	9,948	38,38452

Nota. La tabla muestra la varianza que se presenta por región y por cada factor de emisión. Fuente autor del proyecto.

Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 44

Análisis de varianza del aluminio

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Región	124,0564267	4	31,01410667	2,648896574	0,112326767	3,837853355
Factor de emisión	20,82484	2	10,41242	0,889318656	0,447967589	4,458970108
Error	93,66649333	8	11,70831167			
Total	238,54776	14				

Nota. El análisis de varianza arroja que no existe una diferencia significativa entre regiones ni entre factores de emisión. Fuente autor del proyecto.

Tabla 45

## Resumen de factores de emisión promedio del acero

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Asia	3	34,186	11,39533333	57,45186533
Oceanía	3	18,36	6,12	37,7712
América del Norte	3	8,25	2,75	3,6651
Europa	3	22,14	7,38	25,1472
América de Sur	3	19,3	6,43333333	38,54333333
Factor de emisión 1 (tonCO2/t)	5	15,326	3,0652	0,2387352
Factor de emisión 2 (tonCO2/t)	5	48,91	9,782	37,78712
Factor de emisión 3 (tonCO2/t)	5	38	7,6	42,7518

Nota. La tabla muestra la varianza que se presenta por región y por cada factor de emisión. Fuente autor del proyecto.

Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 46

## Análisis de varianza del acero

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Regiones	115,35479	4	28,8386964	1,110484194	0,415017278	3,837853355
Factores de emisión	117,40156	2	58,70078107	2,260375734	0,166662682	4,458970108
Error	207,75584	8	25,9694794			
Total	440,51218	14				

Nota. El análisis de varianza arroja que no existe una diferencia significativa entre región y tampoco entre factores de emisión. Fuente autor del proyecto.

Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 47

## Resumen de factores de emisión promedio del PVC

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Asia	3	6,42	2,14	0,9399
Oceanía	3	8,172	2,724	0,018748
América del Norte	3	6,5	2,166666667	0,038633333
Europa	3	5,685	1,895	0,098275
América de Sur	3	6,92	2,306666667	0,084133333
Factor de emisión 1	5	11,595	2,319	0,45738
Factor de emisión 2	5	10,922	2,1844	0,3096268
Factor de emisión 3	5	11,18	2,236	0,09098

Nota. La tabla muestra la varianza que se presenta por región y por cada factor de emisión. Fuente autor del proyecto.

Tabla 48

## Análisis de varianza del PVC

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Región	1,1186824	4	0,2796706	0,96718923	0,47554585	3,837853355
Factores de emisión	0,046114533	2	0,023057267	0,079739308	0,924081581	4,458970108
Error	2,3132648	8	0,2891581			
Total	3,478061733	14				

Nota. El análisis de varianza arroja que no existe una diferencia significativa entre regiones y entre factores de emisión. Fuente autor del proyecto.

Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 49

## Resumen de factores de emisión promedio de la mampostería

RESUMEN	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Asia	3	5,016	1,672	0,233884
Oceanía	3	1,976	0,658666667	0,031300333
América del Norte	3	3,835	1,278333333	0,386056333
Europa	3	1,499	0,499666667	0,066916333
América de Sur	3	0,801	0,267	0,006867
Factor de emisión 1 (tonCO2/t)	5	4,125	0,825	0,6060855
Factor de emisión 2 (tonCO2/t)	5	4,434	0,8868	0,4571532
Factor de emisión 3 (tonCO2/t)	5	4,568	0,9136	0,3105313

Nota. La tabla muestra la varianza que se presenta por región y por cada factor de emisión. Fuente autor del proyecto.

Fuente. Autores del Proyecto

Tabla 50

## Análisis de varianza de la mampostería

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Región	4,065677733	4	1,016419433	5,688640389	0,018128529	3,837853355
Factor de emisión	0,020645733	2	0,010322867	0,057774452	0,944252952	4,458970108
Error	1,429402267	8	0,178675283			
Total	5,515725733	14				

Nota. El análisis de varianza arroja que si existe una diferencia significativa entre regiones, pero entre factores de emisión no existe dicha diferencia. Fuente autor del proyecto.

En la tabla 51 se pueden apreciar los factores de emisión determinados por el análisis de varianza para los distintos materiales, para América del sur y el que presento menor varianza de CO2 entre las distintas regiones.

Tabla 51

Factor de emisión determinado para cada material

Material	Factor de emisión (1) (Ton CO2/ton)	Factor de emisión (2) (Ton CO2/ton)
Cemento	0,932	0,922
Aluminio	12,960	13,2923
Acero	2,750	6,43
PVC	2,724	2,31
Mampostería	0,659	0,267

(1): Esta columna representa el factor de emisión de menor varianza de CO2 registrado en el análisis de varianza de cada material. (2): Esta columna representa el factor de emisión promedio de CO2 registrado en el análisis de varianza de cada material para la región de América del sur.

Fuente. Autores del Proyecto

## Capítulo 4. Estudio de Resultados

El método principal utilizado es el proceso ACV, complementado con la metodología PAS-2050 para alcanzar la mayor cobertura posible en los componentes del edificio, así como el sitio de construcción; solo se determinaron las emisiones de carbono indirectas, es decir, las emisiones de la producción de materiales de construcción e implícitamente el transporte de materiales de construcción.

### 4.1 Área de estudio

El edificio elegido para el caso de estudio es un nuevo edificio ubicado en las instalaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, diseñado para ser utilizado como aulas de clases y oficinas de las distintas facultades de ingenierías. Consta de 3 niveles, dos de ellos destinados para las aulas de clase, cada nivel contiene dos baños, diez salones y dos salas de conferencia, el último nivel destinado para las oficinas actualmente se encuentra en su fase final de acabado para ser habilitado en el segundo semestre del año 2019.

La superficie total es de 1542,72 metros cuadrados, distribuidos 1337 metros cuadrados para los salones, baños y las correspondientes oficinas, 143,33 metros cuadrados en la zona de acceso, cuarto de máquinas y ascensor, una superficie neta climatizada de 62,13 metros cuadrados para zonas verdes. La construcción del bloque de facultad de ingenierías fase I se completó en el año 2018, para colocar en funcionamiento el área de los salones de clases en el primer semestre del año 2019. A continuación se evidencia los planos del bloque de facultad de ingenierías (ver figura 5-11) necesario para, la obtención de las diferentes cantidades de los materiales en estudio.

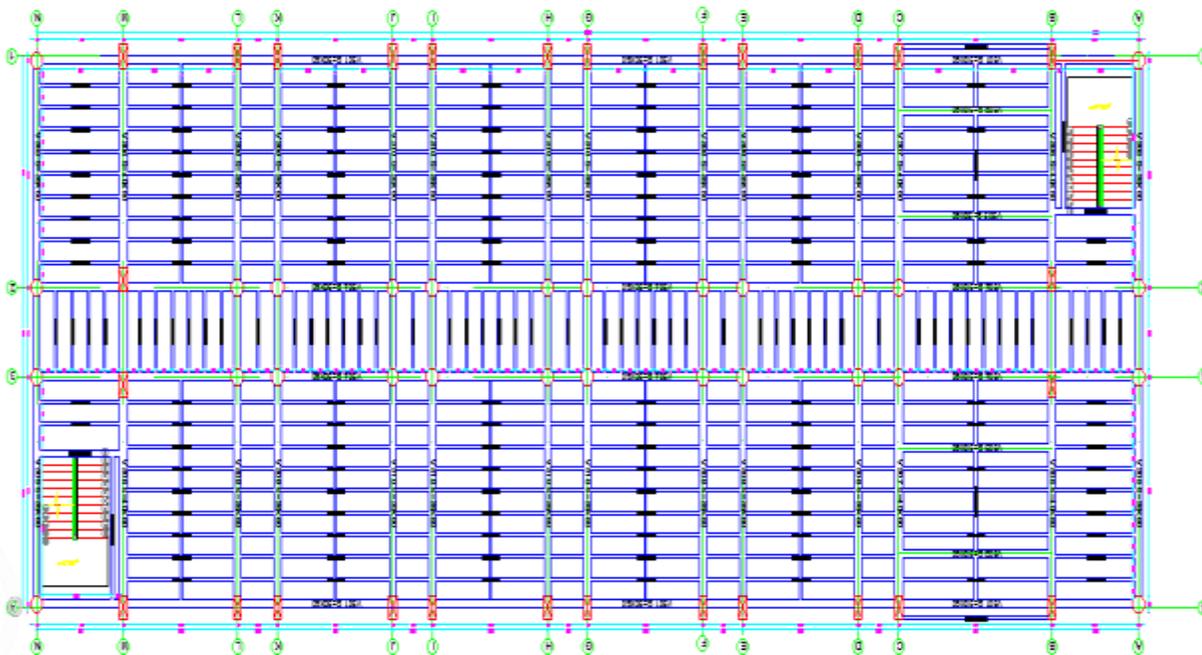


Figura 5. Planta estructural piso 2 y 3 edificios facultad de ingenierías

Fuente. Secretaria de Planeación, UFPSO

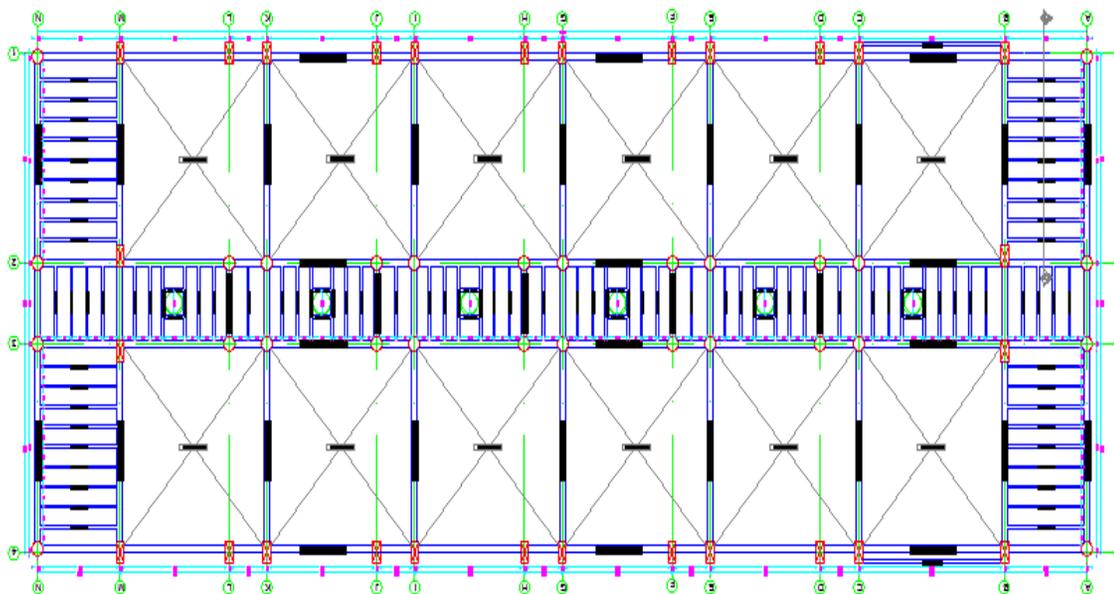


Figura 6. Planta estructural cubierta edificio facultad de ingenierías

Fuente. Secretaria de Planeación, UFPSO

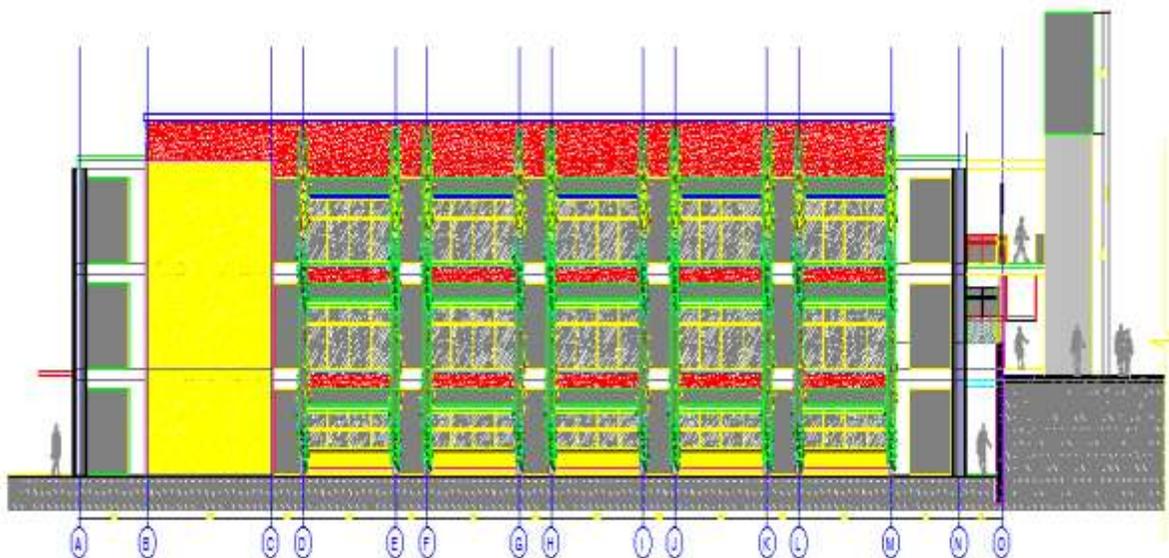


Figura 7. Corte típico longitudinal edificio facultad de ingenierías

Fuente. Secretaria de Planeación, UFPSO

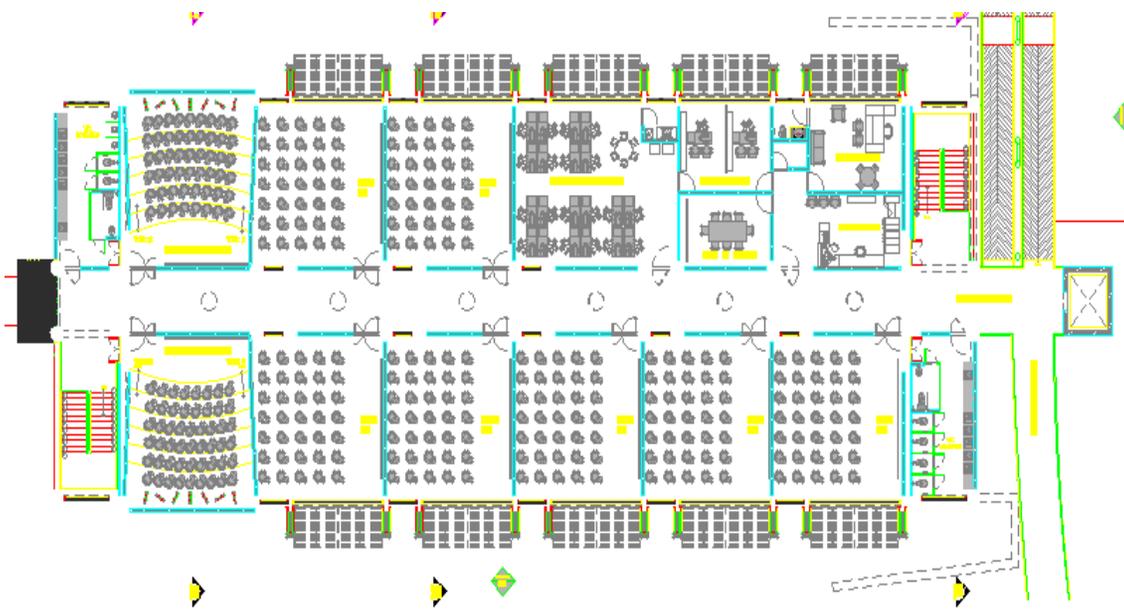


Figura 8. Planta arquitectónica cubierta edificio facultad de ingenierías

Fuente. Secretaria de Planeación, UFPSO

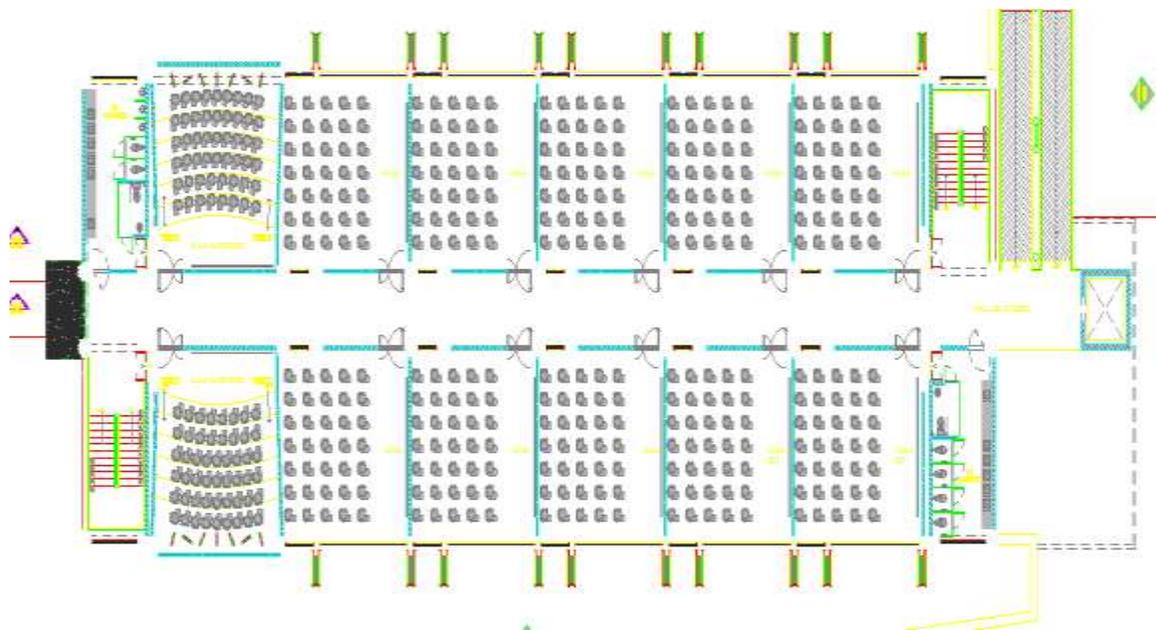


Figura 9. Planta arquitectónica piso 1 y 2 edificio facultad de ingenierías

Fuente. Secretaria de Planeación, UFPSO

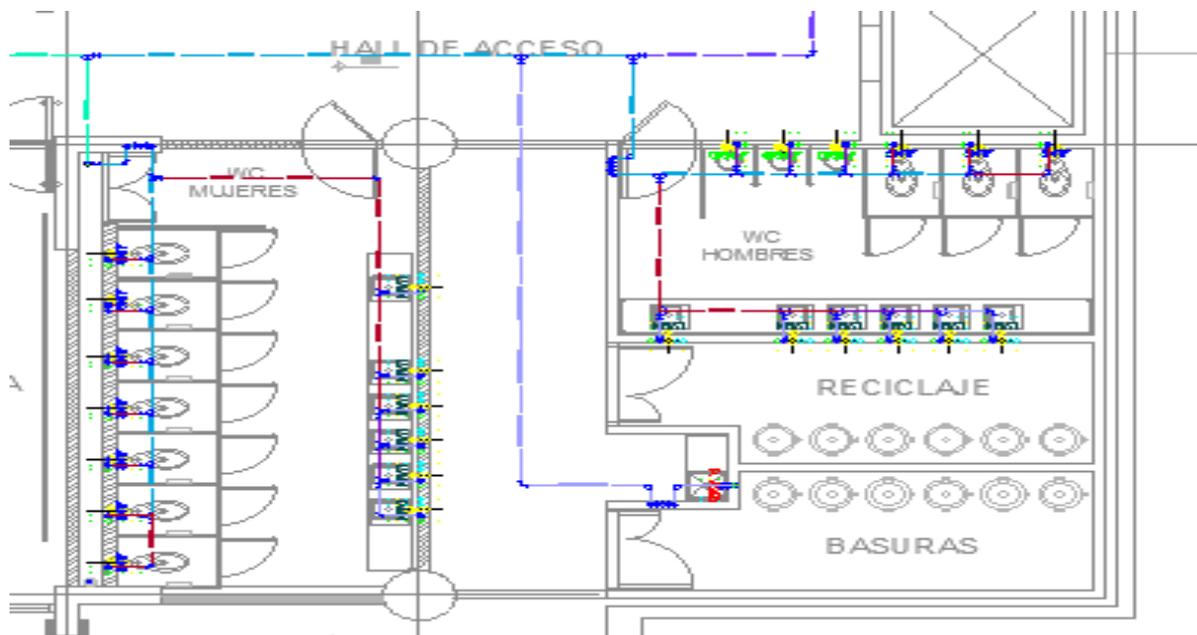


Figura 10. Sistema hidrosanitario piso 1,2 y 3 edificio facultad de ingenierías

Fuente. Secretaria de Planeación, UFPSO



Tabla 52

Cantidades de obra cimentaciones y estructura principal piso 1

CONSTRUCCION SISTEMA ESTRUCTURAL			
	Descripción	Und	Cantidad
CIMENTACIONES	Concreto de saneamiento $0,05 < e < 0,1$ en zapatas	m3	36,44
	Concreto de saneamiento $0,05 < e < 0,1$ en muros	m3	10,86
	Concreto de saneamiento $0,05 < e < 0,1$ en rampas	m3	12,04
	Cimiento en concreto ciclópeo sin formaleta con $f'c=21\text{Mpa}$ a los 28 días en pozo de zapatas	m3	423,14
	Cimiento en concreto ciclópeo sin formaleta con $f'c=21\text{Mpa}$ a los 28 días en pozo de muros	m3	162,9
	Cimiento en concreto ciclópeo sin formaleta con $f'c=21\text{Mpa}$ a los 28 días en pozo de rampas	m3	180,66
	zapata concéntrica $A > 4\text{M}^2$ con $f'c=28\text{Mpa}$ a los 28 días en zapatas	m3	128
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de $420\text{Mpa}$ para zapatas	Kg	59888,79
ESTRUCTURA PRINCIPAL PISO 1	Concreto en columna $A > 2500\text{m}^2$ con $f'c=28\text{Mpa}$ a los 28 días piso 1	m3	68,74
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de $420\text{Mpa}$ para columnas piso 1	kg	11218,37
	Concreto para viga de amarre de cimentación con $f'c=28\text{Mpa}$ a los 28 días piso 1	m3	165,15
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de $420\text{Mpa}$ para vigas piso 1	kg	15689,25
	Losa aligerada 1Dir H=0,3 INICEL/85 para piso 1	m2	1031,5
	Muro en ladrillo a la vista 2 caras de $e=0,15\text{m}$ para piso 1	m2	637,88
	Carpintería en aluminio para ventana tipo techo piso 1	m2	169,02
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de $D=2-1/2"$	ml	121,4
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de $D=2"$	ml	23,3
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de $D=1-1/4"$	ml	4,2
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de $D=1"$	ml	45,86
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de $D=3/4"$	ml	6,6
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de $D=1/2"$	ml	28,4
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de $D=6"$	ml	76,1
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de $D=4"$	ml	66,72
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de $D=3"$	ml	15,015
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de $D=2"$	ml	49,35
Suministro e instalación de tubería sanitarias ALL de $D=6"$	ml	81,24	
Suministro e instalación de tubería sanitarias ALL de $D=4"$	ml	64,05	

Tabla 53

Cantidades de obra estructura principal piso 2,3 y cubierta

ESTRUCTURA PRINCIPAL PISO 2	Concreto en columna A>2500m2con f'c=28Mpa a los 28 días piso 2	m3	68,74
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de 420Mpa para columnas piso 2	kg	11218,37
	Concreto para viga de amarre de cimentación con f'c=28Mpa a los 28 días piso 2	m3	118,68
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de 420Mpa para vigas piso 2	kg	11274,6
	Losa aligerada 1Dir H=0,3 INICEL/85 para piso 2	m2	998,75
	Muro en ladrillo a la vista 2 caras de e=0,15m para piso 2	m2	569,28
	Carpintería en aluminio para ventana tipo techo piso 2	m2	178,48
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=2"	ml	15
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=1"	ml	22
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=3/4"	ml	11
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=1/2"	ml	14,2
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de D=4"	ml	32,35
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de D=2"	ml	83,16
ESTRUCTURA PRINCIPAL PISO 3	Concreto en columna A>2500m2con f'c=28Mpa a los 28 días piso 3	m3	68,74
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de 420Mpa para columnas piso 3	kg	11061,7
	Concreto para viga de amarre de cimentación con f'c=28Mpa a los 28 días piso 3	m3	115,8
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de 420Mpa para vigas piso 3	kg	11001
	Losa aligerada 1Dir H=0,3 INICEL/85 para piso 3	m2	916,24
	Muro en ladrillo a la vista 2 caras de e=0,15m para piso 3	m2	119,44
	Carpintería en aluminio para ventana tipo techo piso 3	m2	120,63
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=2"	ml	15
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=1"	ml	31,5
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=3/4"	ml	20,1
	Suministro e instalación de tubería hidrosanitarias RDE 21 de D=1/2"	ml	18,4
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de D=4"	ml	31
	Suministro e instalación de tubería sanitarias AR de D=2"	ml	92,8
ESTRUCTURA PRINCIPAL CUBIERTA	Concreto para viga de amarre de cimentación con f'c=28Mpa a los 28 días viga en cubierta	m3	75,18
	Acero de refuerzo corrugado con una resistencia de fluencia de 420Mpa para vigas en cubierta	kg	7142,1
	Losa aligerada 1Dir H=0,3 INICEL/85 para cubierta	m2	298,84
	Muro en ladrillo a la vista 1 caras de e=0,15m para piso cubierta	m2	227,4

En las tablas 52-53 se aprecia las cantidades totales a ejecutar para las diferentes actividades de obra proyectadas con sus correspondientes unidades de medida, por ello es preciso establecer una unidad de medida fundamental para los distintos materiales de estudios, la cual es el Kg, para realizar dicha descripción se obtuvo el respectivo valor de cada material en Kg/por su correspondiente unidad de medida y con los datos de la tabla 52-53 se calculó las cantidades totales en la unidad de medida fundamental establecida (ver tabla 54).

Tabla 54

Cantidad total de material

Material	Und	Cantidad
Cemento	Kg	753863,617
Aluminio	Kg	1356,64
Acero	Kg	145418,889
Pvc	Kg	1353,63
Mampostería	Kg	138097,1

Nota. Las cantidades obtenidas no contemplan las escaleras metálicas, pasa manos, puertas de acceso, divisiones de baño, tubería de red eléctrica y cualquier otro elemento que describa contener los mismos materiales de estudios. Fuente autor del proyecto.

### 4.3 Emisiones de CO2 incorporadas en los materiales de construcción

Para el cálculo de las emisiones de CO2 incorporadas en los materiales de construcción más usados utilizamos la fórmula (1), (Yan et al., 2010)

$$(1) E_I = \sum f_j \times M_j / 1000$$

Donde  $E_I$  es el total de emisiones de CO2 incorporadas de todos los materiales de construcción (en toneladas de CO2);  $M_j$  es la cantidad de material de construcción  $j$  (en kg); y  $f_j$

es el factor de emisión de CO<sub>2</sub> para el material de construcción j (en Ton CO<sub>2</sub>/ Ton). Las emisiones totales de CO<sub>2</sub> en el edificio de facultad de ingenierías se muestran en la tabla 55.

Tabla 55

Emisiones de CO<sub>2</sub> incorporadas en los materiales de construcción

Material	Cantidad (ton)	Factor de emisión (1)(tonCO <sub>2</sub> /ton)	Emisión Total(tonCO <sub>2</sub> )	Porcentaje de consumo	Factor de emisión (2)(tonCO <sub>2</sub> /ton)	Emisión Total(tonCO <sub>2</sub> )	Porcentaje de consumo
Cemento	753,864	0,932	702,600891	57,84%	0,922	695,0622549	41,17%
Aluminio	1,357	12,96	17,5820544	1,45%	13,2923	18,03286587	1,07%
Acero	145,419	2,75	399,9019448	32,92%	6,43	935,0434563	55,39%
PVC	1,354	2,724	3,68728812	0,30%	2,31	3,1268853	0,19%
Mampostería	138,097	0,659	91,0059889	7,49%	0,267	36,8719257	2,18%
Total	1040,090		1214,78	100,00%		1688,137388	100,00%

#### 4.4 Análisis de la huella de carbono

En la tabla 55 logramos observar que la mayor cantidad de material en toneladas pertenecen al cemento y al acero, lo que significa que en la construcción del edificio de facultad de ingenierías en la UFPSO, fueron los materiales que más emisiones de CO<sub>2</sub> generaron, además se tiene que las emisiones de CO<sub>2</sub> del cemento y acero representan entre el 90,76% - 96,56% de los demás materiales de construcción antes mostrados.

Así mismo, se tiene que los materiales que menos generaron emisiones de CO<sub>2</sub> fueron el aluminio y el PVC, con a pesar que el factor de emisión del aluminio es el más alto registrado de todos los materiales la cantidad en tonelada es muy pequeña lo que genera un porcentaje de emisiones de CO<sub>2</sub> entre 1,07 % y 1,45%.

Por otra parte, si comparamos los resultados obtenidos de las emisiones totales, podemos ver que las emisiones de CO<sub>2</sub> de América del sur del cemento y el acero liberan 527,6 toneladas de CO<sub>2</sub> más que las emisiones de menor varianza de CO<sub>2</sub>. Mientras que las emisiones de CO<sub>2</sub> incorporadas del cemento representan el 57,84% lo que indica que es el material más contaminante.

Por último, podemos afirmar que los factores de emisión de la mampostería son los más pequeños registrados, pero debido a la cantidad de ladrillos utilizados en el edificio de facultad de ingenierías las emisiones presentadas de 7,49% y 2,18%, indican que es el tercer material que más emisiones de CO<sub>2</sub> genera.

#### **4.5 Alternativa de mitigación**

Si bien la etapa de producción contribuye con la mayor parte de las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de energía incorporado, no hay oportunidades, aparte de usar energía renovable, para mejorar el rendimiento energético del edificio. Por lo tanto, se consideró que valía la pena examinar las oportunidades para reducir el impacto ambiental de la producción de materiales en función del ciclo de vida. Además, dadas las altas intensidades de energía involucradas en la fabricación del cemento y aluminio, se podrían investigar más áreas para mejorar el desempeño ambiental de los materiales de construcción de edificios.

Diferentes estudios han resaltado los beneficios de estrategias de mitigación para reducir la huella de carbón y determinaron la importancia de implementar estas técnicas en la producción

de los distintos materiales. La selección de estos materiales con las características que se describirán ayudara significativamente en la reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>:

1. La utilización de cenizas volantes como material de cemento suplementario agrega sustentabilidad al concreto al reducir la emisión de gases de efecto invernadero asociada con la producción de cemento. El reemplazo del 30% en peso de cemento con cenizas volantes en fabricación de concreto permite mantener las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y resistencia a la flexión (Nath, 2010, pág. 243)

2. La sustitución de aluminio nuevo con aluminio reciclado, reduciría las emisiones de CO<sub>2</sub> en alrededor del 70% (Damgaard, Larsen, & Christensen, 2009, págs. 27(8), 754–762), manteniendo su maleabilidad y su durabilidad

3. La implementación del acero nuevo por acero reciclado, ayudaría a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en alrededor del 60% de las emisiones actuales (Damgaard, Larsen, & Christensen, 2009), conservando la misma resistencia a la fluencia y a la deformación.

4. La tubería de PVC es el material más rápido de producir y requiere bajos insumos de energía y agua, y los materiales de desecho se pueden devolver directamente al proceso de fabricación. Esto da lugar a prácticamente ningún desperdicio de fabricación lo que ayudaría a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en alrededor del 80% de las emisiones actuales (Iere, 2017), conservando sus propiedades mecánicas.

5. La implementación de nuevas tecnologías en la fabricación de ladrillo y una mejora en los hornos ayudaría a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en alrededor de un 50% de las emisiones

actuales (Cárdenas & Márquez, 2011) y mantendría las misma características de resistencia a la compresión.

Suponiendo que las sustituciones anteriores se puedan hacer con equivalencia funcional entre los materiales de estudio y según (Biswas, 2014, pág. 7) se estimó que el 47% del total de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la etapa de producción de la extracción de minería de cada material se puede evitar potencialmente al reemplazar el 30% del cemento con cenizas volantes, el 70% del aluminio nuevo con aluminio reciclado, el 60% del acero nuevo con acero reciclado, el 80% del reciclaje de tuberías de PVC y el 50% en nuevas tecnologías en la fabricación del ladrillo.

Estas sustituciones de las alternativas de mitigación redujeron el factor de emisión en el resto de la etapa de proceso del material y en el cálculo total de CO<sub>2</sub> emitidos durante la construcción del edificio Facultad de Ingenierías en un 25% adicional (es decir, 425,9525 tonCO<sub>2</sub>).

## Capítulo 5. Conclusiones

Este proyecto tuvo como finalidad la realización del análisis de la huella de carbono del edificio de Facultad de Ingenierías en la UFPSO para determinar su impacto ambiental que generó durante la etapa de construcción.

Se extrajeron diferentes factores de emisión de los materiales más usados en la construcción para cada región por medio de los dos métodos planteados (revisión bibliográfica y tabla de datos) y el consumo de energía (combustible fósil) en la etapa de proceso de fabricación de cada material este último como conocimiento del gasto y el impacto ambiental que produce, los factores de emisión obtenidos fueron tabulados en una misma tabla y en esta se le empleó un método estadístico (Análisis de varianza), donde se determinó el factor de emisión por material indicado de menor varianza y los datos promedio de América del sur, con la finalidad de utilizarlos en nuestro caso de estudio para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> para cada material.

Las cantidades de los materiales fueron calculadas de los diferentes planos obtenidos (Estructural, Arquitectónico e Hidrosanitario) del edificio de Facultad de Ingenierías, estas cantidades se determinaron de manera global apoyándonos con las actividades de obra propuestas e indicadas en la EDT presentadas por la entidad contratante en el contrato de obra, con la posibilidad de un margen de error en el cálculo del 6% producto de los desperdicios que se generan en la obra en el desarrollo de las actividades y que no se encuentran proyectadas o contempladas inicialmente, si no, en el acta de terminación de contrato donde se describen una a una las cantidades reales de los materiales utilizados en el edificio de Facultad de Ingenierías.

Al analizar los resultados obtenidos en la construcción del estudio de caso, edificio de Facultad de Ingenierías, encontramos que las emisiones de CO<sub>2</sub> son de 1688,14ton CO<sub>2</sub> provenientes de los factores de emisión promedio de América del sur, este valor se representa en un estimativo de 98,7–99,2% las cuales provienen de las emisiones de CO<sub>2</sub> incorporadas de los materiales de construcción y del transporte de los mismos, y el 1,3–0,8% se deben al consumo de energía de los equipos de construcción y mano de obra, este valor se estima de acuerdo a las emisiones que se producen de la compañía generadora de electricidad de la región y al Estudio de caso de emisiones de carbono del ciclo de vida de un edificio basado en BIM y Ecotect de Peng, Changpai y Wu, Xiao (Peng & Wu, 2017, págs. 453–465.)

Mediante la comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub>, de la fabricación del acero reforzado en las dos columnas de factores de emisión, encontramos una diferencia significativa de 3,68tonCO<sub>2</sub>/ton en los valores obtenidos de la producción de acero reforzado en América del sur comparado con el acero de refuerzo que se produce en el resto de mundo, lo que explica la falta de tecnología en las distintas etapas de proceso y la eficiencia de los hornos con relación al consumo de energía, por eso la diferencia más alta de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales calculadas (535,14TonCO<sub>2</sub>) registradas se refleja en el acero de refuerzo comparadas con los demás materiales.

Finalmente, a partir del resultado de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales y considerando las alternativas de mitigación indica que, al utilizar materiales de otras regiones y la adopción de tecnología de construcción que ahorra energía, como el uso de cemento con cenizas volantes, aluminio reciclado, acero de refuerzo reciclado, tubería de PVC reciclada y mampostería que implementen en nuevas tecnologías en el proceso de cocción reciclada, siempre que sea posible

podemos reducir aún más el ciclo de vida total de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la construcciones de nuevos edificios que se proyecte a ejecutar en la UFPSO en un 25% .

## Recomendaciones

En las últimas décadas, las regulaciones a nivel nacional e internacional han reflejado una creciente preocupación por el impacto ambiental causado por el sector de la construcción y el enfoque en la reducción de la huella de carbono generada por la fabricación de materiales de construcción, que se ha identificado como la causa de más del 40% del impacto total de la fase de construcción en el ciclo de vida de un edificio. (Giesekam, Barrett, & Taylor, 2014, págs. 78, 2012–2214. )

Como complemento y finalización del proyecto “Análisis de la huella de carbono y alternativas de mitigación en el uso de los materiales más utilizados en el sector de la construcción” se recomienda generar importancia al impacto ambiental que se ocasiona en la intervención de las diferentes construcciones y precisamente en la selección de los materiales de construcción que se requieran emplear, ya que existen barreras económicas, técnicas, prácticas culturales que impiden que los profesionales seleccionen materiales con bajas emisiones de carbono. Esto incluye limitaciones de tiempo durante la fase de diseño, el alto costo de los nuevos productos y la capacitación profesional adicional que deben tener en el manejo adecuado y preciso, las dificultades para las pequeñas industrias que compiten con las industrias establecidas en el mercado laboral, la falta de proyectos de demostración a gran escala en el ámbito laboral y en el proceso de formación profesional, las percepciones negativas entre los profesionales y los clientes entre otros factores que no permiten generar conciencia en todo el sector de la construcción sobre la importancia de cuidar lo que “Involuntariamente dañamos al construir”.

A continuación se plantea unas series de recomendaciones con relación al planteamiento de nuestro proyecto y fundamentado en el desarrollo del mismo.

- Fomentar el uso de las alternativas de mitigación mencionadas en el capítulo 4, para reducir de manera significativa el ciclo de vida de las emisiones de CO<sub>2</sub> que se generarían en construcciones futuras de la UFPSO, para ayudar a reducir el gran impacto ambiental que día a día se vuelve un gran problema para la humanidad.
- Debido al que el cemento es uno de los materiales más contaminantes en una construcción producto de la gran cantidad que se requiere, es recomendable la adquisición de cemento verde que contiene un porcentaje de cenizas volantes en la producción de mismo, el cual ayudaría a mitigar la contaminación del medio ambiente.
- Controlar al máximo todas las emisiones procedentes de los materiales usados en el sector de la construcción, ya que son estas unas de las principales problemáticas ambientales a nivel mundial.

## Referencias

- Bakshi, V. (2005). Greenhouse Gas Emissions from Major industrial Sources - IV The Aluminium Industry. PH3/23(April).
- Biswas, W. K. (2014). Carbon footprint and embodied energy consumption assessment of building construction works in Western Australia. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(2), . Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.ijbsbe.2014.11.004>
- BSI. (2011). PAS 2050 : 2011 Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services. System, . Obtenido de <http://www.bsigroup.com/upload/Standards & Publications/Energy/PAS2050.pdf>
- Carballo, A., Doménech, J., & García, M. (2009). El ecoetiquetado en base a la huella ecológica y del carbono: una herramienta de marketing verde. *UAI Sustentabilidad*, 3(7), 1–2. . Obtenido de <https://scholar.google.com/citations?user=5DyCRWUAAAAJ&hl=es>
- Cárdenas, B., & Márquez, C. (2011). Determinación de emisiones de gases de invernadero en base a factores de emisión y monitoreos de eficiencia energética en la comunidad ladrillera El Refugio, León Guanajuato. *Eficiencia Energética En Ladrilleras Artesanales En América Latina Para Mitigar* . Obtenido de [http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/2011\\_informe\\_gei\\_ladrilleras\\_refugio.pdf](http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/2011_informe_gei_ladrilleras_refugio.pdf)
- Ciacci, L., Eckelman, M. J., Passarini, F., Chen, W. Q., Vassura, I., & Morselli, L. (2014). Historical evolution of greenhouse gas emissions from aluminum production at a country level. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.062>.

- Damgaard, A., Larsen, A. W., & Christensen, T. H. (2009). Recycling of glass: Accounting of greenhouse gases and global warming contributions. *Waste Management and Research*.  
Obtenido de <https://doi.org/10.1177/0734242X09342148>
- Doménech, Q. (2007). *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. Asociación Española de Normalización y Certificación, .
- Emilio, A., Barreto, H., María, M. C., Ortiz, A., & Montes, C. (2008). Tecnologías para la reducción de emisiones de gases contaminantes en plantas cementeras. *Revista Ingeniería E Investigaciones*, 28(3), 41–46.
- Environmental Product Declaration (EPD). (2015). *Environmental Product Declaration PVC Non-Pressure Pipes for Building Applications*. PIPA.
- EPA. (2008). *Quantifying Greenhouse Gas Emissions from Key Industrial Sectors in the United States*. . Environmental Protection Agency.
- European Aluminium Association. (2013). *Environmental Profile Report for the European Aluminium Industry April 2013- Data for the year 2010 Life Cycle Inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe*. (April).
- Fay, R., Treloar, G., & Iyer-Raniga, U. (2000). Life-cycle energy analysis of buildings: A case study. *Building Research and Information*, 28(1). Obtenido de <https://doi.org/10.1080/096132100369073>
- Fischedick, M., & Roy, J. (2014). *AR5 Climate Change 2014: Chapter 10: Industry*. .

- Fricko, O. H. (2017). The marker quantification of the Shared Socioeconomic Pathway 2: A middle-of-the-road scenario for the 21st century. . *Global Environmental Change*.
- Gautam, M., Pandey, B., & Agrawal, M. (2017). Carbon Footprint of Aluminum Production. In *Environmental Carbon Footprints*. . Obtenido de <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812849-7.00008-8>
- Giesekam, J., Barrett, J., & Taylor, P. (2014). The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. *Energy and Buildings*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814003570?via%3Dihub>
- Habert, G., Billard, C., Rossi, P., & Chen, N. R. (2010). Mejora de la tecnología de producción de cemento en comparación con los objetivos del factor 4. *Investigación de Cemento y Hormigón*, 40(Mayp). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884609003408?via%3Dihub>
- Habla Zig-Zag Kilns. (2015). *Brick Market*.
- Halim, A., Sikder, F., Begum, K., Parveen, Z., & Hossain, F. (2016). Assessment of macro and micro nutrients around brick kilns agricultural environment Assessment of macro and micro nutrients around brick kilns agricultural environment. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2016.02.001>
- Hasanbeigi, A., Arens, M., Cardenas, J. C., Price, L., & Triolo, R. (2016). Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the

- United States. Resources, Conservation and Recycling,. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.008>
- Henry, B. &. (2007). Información Técnica Sobre Gases de Efecto Invernadero y el Cambio Climático Meteorología 1. . Ideam.
- Huang, W., Li, F., Cui, S. H., Huang, L., & Lin, J. Y. (2017). Carbon Footprint and Carbon Emission Reduction of Urban Buildings: A Case in Xiamen City, China. *Procedia Engineering*, 198(September 2016). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07>
- Iere. (2017). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF PVC WATER AND SEWER PIPE AND COMPARATIVE SUSTAINABILITY ANALYSIS OF PIPE MATERIALS. . Sustainable Solutions Corporation, (1).
- Khan, L. R., Ltd, J. E., & Tee, K. F. (2015). Quantification and Comparison of Carbon Emissions for Flexible Underground Pipelines. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1–12. Obtenido de <https://doi.org/10.1139/Zxx-xxx>
- Koroneos, C., & Dompros, A. (2007). Environmental assessment of brick production in Greece. *Building and Environment*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.03.006>
- Kriegler, E., Edmonds, J., & Hallegatte, S. (2014). A new scenario framework for climate change research : the concept of shared climate policy assumptions. . Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0971-5>

Lopez, A., Lyoda, N., Segal, R., & Tsai, T. (2012). Evaluating the Brick Industry in South Asia.

Obtenido de [https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/Pathways-to-Efficiency-in-the-South-Asia-Brickmaking-Industry-Carbon-War-Room\\_0.pdf](https://rmi.org/wp-content/uploads/2017/04/Pathways-to-Efficiency-in-the-South-Asia-Brickmaking-Industry-Carbon-War-Room_0.pdf)

Manuel, R. (2018). Global Crude Steel Production. (March), 0–7. . Obtenido de

<http://www.issb.co.uk/global.html>

Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2016). LCA databases focused on construction materials: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.243>

Meijer, J., & Pullus, T. (s.f.). Energía. Orientación Del IPCC Sobre Las Buenas Prácticas y La Gestión de La Incertidumbre En Los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero.

Ministerio de Medio Ambiente. (2005). Guía de mejores técnicas disponibles en España del sector de DCE, CVM y PVC. MTD en España del sector de DCE, CVM y PVC-37E0EED6B528E04F. Obtenido de <http://www.prtr-es.es/data/images/Guía>

Minx, J., Peters, G., & Wiedmann, T. (2008). GHG emissions in the global supply chain of food products. *International Input-Output Meeting on Managing the Environment*, (2006). Obtenido de [http://www.iioa.org/pdf/Intermediate-2008/Papers/6d1\\_Minx.pdf](http://www.iioa.org/pdf/Intermediate-2008/Papers/6d1_Minx.pdf)

Moedinger, F. (2005). Sustainable Clay Brick Production– A CASE STUDY. *World Sustainable Building Conference*, 2005(September), 3–4.

- Morfeldt, J., Nijs, W., & Silveira, S. (2015). The impact of climate targets on future steel production - An analysis based on a global energy system model. *Journal of Cleaner Production*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.045>
- Narita, N., Sagisaka, M., & Inaba, A. (2005). Análisis del inventario de ciclo de vida de las emisiones de CO<sub>2</sub> en la fabricación de plásticos básicos en Japón. *Life Cycle Assessment*.
- Nath, P. (2010). Durability of Concrete Using Fly Ash as a Partial Replacement of Cement. (August).
- Nepal, S., al, e., & Mahapatra, P. A. (2019). A Comparative Study of Stack Emissions from Straight-Line and Zigzag Brick Kilns in Nepal. *Atmosphere*, 10(3), 107. . Obtenido de <https://doi.org/10.3390/atmos10030107>
- Ordaz, J., Melgar, M. d., & Rubio, C. (2014). Métodos estadísticos y Econométricos en el empresa y para finanzas.
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., & Bai, J. (2009). Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Engineering Geology*,. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.05.002>
- Paul, R., & et al, D. M. (2017). Life Cycle Inventory (LCI) Data-Treatment Chemicals, Construction Materials, Transportation, On-site Equipment, and Other Processes for Use in Spreadsheets for Environmental Footprint Analysis (SEFA): Revised Addition. National Risk Management Research La.

Peng, C., & Wu, X. (2017). Case Study of Carbon Emissions from a Building's Life Cycle Based on BIM and Ecotect. *Advances in Materials Science and Engineering*,. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015>

Pontificia Universidad Católica del Perú. (2012). Estudio de análisis de ciclo de vida comparativo entre ladrillos artesanales y ladrillos mecanizados. *Red Peruana de Ciclo de Vida*. Obtenido de <http://www.redladrilleras.net/assets/files/98b76b9168060e49090cdf8e656579cf.pdf>

Price, L., Phylipsen, D., & Worrell, E. (2009). *Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Sector in Key Developing Countries*. California: University of California. Contract, (April).

Purohit, P., & Höglund-isaksson, L. (2017). Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005 – 2050 with abatement potentials and costs. . Obtenido de <https://doi.org/10.5194/acp-17-2795-2017>

Ren, L. J., & Wang, W. J. (2011). Analysis of existing problems and carbon emission reduction in Shandong's iron and steel industry. *Energy Procedia*, 5(27) . Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.279>

Sabnis, A., & Pranesh, M. R. (2017). Building materials assessment for sustainable construction based on figure of merit as a concept. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. Obtenido de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85019464255&partnerID=40&md5=2fbff68772e3dbeb85b5a6213248fdc0>

- Silveira, S., Morfeldt, J., Nijs, W., & Lodewijks, P. (2012). Sectoral Energy Report on the Iron and Steel Sector. Obtenido de [urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-105235](http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-105235)
- Société de Calcul Mathématique SA. (2009). Acero inoxidable y CO<sub>2</sub> : Hechos y observaciones científicas. ISSF.
- Syngros, G., Balaras, C. A., & Koubogiannis, D. G. (2017). Embodied CO<sub>2</sub> Emissions in Building Construction Materials of Hellenic Dwellings. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 500–508. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.113>
- Ukwatta, A., Mohajerani, A., Setunge, S., & Eshtiaghi, N. (2018). A study of gas emissions during the firing process from bricks incorporating biosolids. *Waste Management*. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.006>
- Van Ruijven, B. J., Van Vuuren, D. P., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D., & Patel, M. K. (2016). Long-term model-based projections of energy use and CO<sub>2</sub> emissions from the global steel and cement industries. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.016>
- Van Vuuren, D. P., Riahi, K., Moss, R., Edmonds, J., Thomson, A., Nakicenovic, N., & ... Janetos, A. (2012). A proposal for a new scenario framework to support research and assessment in different climate research communities. *Global Environmental Change*.
- Weyant, C., al, e., & Athalye, V. R. (2014). Emissions from South Asian Brick Production. *Environmental Science & Technology*, . Obtenido de <https://doi.org/10.1021/es500186g>

- Wiedmann, T. &. (2008). A Definition of ‘ Carbon Footprint .’ . Ecological Economics Research Trends, (December).
- World Business Council for Sustainable development. (2009). Cement industry energy and CO2 performance: getting the numbers right.
- World Steel Association. (2018). Statistics: Crude Steel Production. World Steel Association. . Obtenido de <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., & Meida, L. O. (2005). Carbon Dioxide Emission from the Global Cement Industry. Annual Review of Energy and the Environment •, (November). . Obtenido de <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.303>
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C., Wang, Y., & Zhang, L. (2010). Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. Building and Environment, 45(4). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.09.014>
- Zhang, C., Han, R., Yu, B., & Wei, Y. (2018). Accounting process-related CO 2 emissions from global cement production under Shared Socioeconomic Pathways. Journal of Cleaner Production, 184. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.284>