

# Evaluation of the Carbon Footprint in the Production of Aggregate Materials for Construction in the Municipality of Toluviejo – Colombia

Cesar José Vergara Rodríguez<sup>1</sup>, Gean Pablo Mendoza Ortega<sup>1</sup>, Jorge Camilo Bravo Madera<sup>1</sup>, María José Contreras Cruz<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, Colombia, cesar.vergara@cecar.edu.co, gean.mendoza@cecar.edu.co, jorge.bravo@cecar.edu.co, [maria.contrerascr@cecar.edu.co](mailto:maria.contrerascr@cecar.edu.co)

*Abstract– The following research presents the results obtained from the evaluation of the carbon footprint generated by the production of aggregate materials for the construction derived from limestone, carried out in the municipality of Toluviejo - Colombia. This study was developed applying the carbon footprint assessment methodology Publicly Available Standard 2050 (PAS 2050)*

*Keywords- Carbon footprint, Greenhouse effect, Aggregates, Climate change, Limestone.*

Digital Object Identifier (DOI):<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.18>  
ISBN: 978-0-9993443-1-6  
ISSN: 2414-6390

# Evaluación de la Huella de Carbono en la Producción de Materiales Agregados para la Construcción en el Municipio de Toluviejo - Colombia

Cesar José Vergara Rodríguez<sup>1</sup>, Gean Pablo Mendoza Ortega<sup>1</sup>, Jorge Camilo Bravo Madera<sup>1</sup>, María José Contreras Cruz<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, Colombia, cesar.vergara@cecar.edu.co, gean.mendoza@cecar.edu.co, jorge.bravo@cecar.edu.co, maria.contrerascr@cecar.edu.co

**Resumen** – Esta investigación presenta los resultados obtenidos de la evaluación de la huella de carbono generada por la producción de materiales agregados para la construcción derivados de la piedra caliza, realizada en una empresa en el municipio de Toluviejo - Colombia. Este estudio se desarrolló aplicando la metodología de evaluación de huella de carbono Publicly Available Standar 2050 (PAS 2050), la cual determinó que en la producción de un 1 m<sup>3</sup> de Gravilla, Triturado, Gravillon y Arena Lavada en esta empresa, se emiten cerca de 9.68; 21.58; 17.00 y 14.57 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cúbico (kg CO<sub>2</sub> Eq/m<sup>3</sup>) a la atmósfera respectivamente. Asimismo, en este trabajo se encuentra la caracterización del proceso productivo de agregados de piedra caliza y derivados en el distrito minero de Calamarí – Sucre.

**Palabras claves** – Huella de carbono, Efecto invernadero, Agregados, Cambio climático, Piedra caliza

**Abstract** – This research presents the results obtained from the evaluation of the carbon footprint generated by the production of aggregate building materials derived from limestone, carried out in a company in the municipality of Toluviejo - Colombia. This study was developed applying the Publicly Available Standard 2050 (PAS 2050) carbon footprint assessment methodology, which determined that in the production of 1 m<sup>3</sup> of Gravel, Crushed, Gravillon and Washed Sand in this company, about 9.68; 21.58; 17.00 and 14.57 kilograms of carbon dioxide equivalent per cubic meter (kg CO<sub>2</sub> Eq/m<sup>3</sup>) are emitted into the atmosphere, respectively. Also, in this work is the characterization of the productive process of limestone aggregates and derivatives in the mining district of Calamarí - Sucre.

**Keywords** – Carbon footprint, Greenhouse effect, Aggregates, Climate change, Limestone.

## I. INTRODUCCIÓN

### A. Antecedentes

El cambio climático durante las últimas décadas presenta su manifestación más notoria en el Calentamiento Global, asociado este generalmente, al aumento progresivo de las temperaturas en el planeta causado por el proceso de acumulación de gases en la atmósfera, denominados de efecto

invernadero [1]. Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) pueden ser de origen natural o antropogénicos, y su presencia en la atmósfera contribuye de manera significativa al cambio climático. Estos gases se caracterizan por capturar y producir radiación en determinadas longitudes de ondas del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la tierra, la atmósfera, y las nubes, atrapando el calor, y a su vez impidiendo que la energía se transfiera al espacio, permaneciendo en el planeta durante años. Esta propiedad es causante del denominado Efecto Invernadero (EI) [2].

Para medir el impacto generado por el crecimiento de la población y las actividades humanas, ya sea en la biósfera, la atmósfera o la hidrósfera, en la actualidad existe una familia de huellas, integrada por tres indicadores fundamentales para cuantificar estos efectos, los cuales son: la Huella Ecológica (HE), la Huella de Carbono (HC) y la Huella Hídrica (HH), que sirven para el seguimiento de la presión humana sobre el planeta [3].

Particularmente, la HC está definida como "la suma de emisiones de gases de efecto invernadero y remociones en un sistema producto, expresadas como CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>Eq) y con base en un análisis de ciclo de vida, utilizando una sola categoría de impacto, la de cambio climático" [4]. Este concepto no se limita a la medición de las emisiones de CO<sub>2</sub>, también tiene en cuenta las emisiones de gases como el Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), el Metano (CH<sub>4</sub>), el Óxido Nitroso (N<sub>2</sub>O), los Hidrofluorocarbonos (HFC), los Perfluorocarbonos (PFC) y el Hexafluoruro de Azufre (SF<sub>6</sub>), que son los principales GEI que contribuyen al calentamiento global. Es por ello que el término correcto sería huella de carbono equivalente o emisiones de CO<sub>2</sub> equivalentes [5]. Esta unidad de relación se calcula multiplicando la masa real de un gas, con el factor potencial de calentamiento global de este gas en particular, por lo que los efectos del calentamiento global de diferentes GEI se hacen así aditivos y comparables [3].

En términos generales se ha estimado que las principales fuentes de emisiones de GEI se concentran en la generación de electricidad, así como también en el transporte, la manufactura y la construcción [2]. Específicamente, en la industria de la construcción el material más utilizado es el concreto, el cual es

Digital Object Identifier (DOI): <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2018.1.1.18>  
ISBN: 978-0-9993443-1-6  
ISSN: 2414-6390

16<sup>th</sup> LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology: "Innovation in Education and Inclusion", 19-21 July 2018, Lima, Peru.

una mezcla de agua, arena, grava y cemento. Este material cuenta con un consumo promedio cercano a las 25 gigatoneladas por año (Gt/año), de aquí que su carga ambiental sea significativa en términos del uso de recursos y emisiones ambientales [7].

Estudios recientes han encontrado que en el proceso de manufactura del cemento y por tanto del concreto, existe un gran índice de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) al ambiente [6], [7], así mismo, el Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC) ha determinado que el cemento y la producción cerámica son responsables de más del 20% de emisiones de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en el mundo [8].

La problemática asociada al impacto en el cambio climático generado por el sector de la construcción ha despertado un gran interés en la comunidad científica. Rossi y Sales [9] en su trabajo, miden las emisiones de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub> Eq), en el proceso de extracción transporte y trituración de materiales gruesos para la construcción en Brasil, identificado así que la etapa crítica en este proceso es la trituración debido a su alto consumo energético. Hermawan, Marzuki, Abduh y Driejana [10] por su parte, describen en su trabajo un enfoque de desarrollo de infraestructura sostenible, a través del análisis de HC en la cadena de suministros de la construcción. Por su parte, Yu, Wiedmann, Crawford, y Taid [11] calculan la HC total del sector de la construcción en Australia entre los años 2009 y 2013, teniendo como resultado que este sector representa el 18,1% del total de la HC en este país. Kuittinen [12] en su investigación describe un método para controlar el crecimiento de la HC de los edificios durante las etapas de preparación, diseño y adquisición de los proyectos de construcción. Sreedhar, Jichkar, y Biligiri [13] desarrollaron un grupo de herramientas para cuantificar la HC de los diferentes sistemas de pavimentos utilizados en la construcción de carreteras.

### *B. Importancia de la Investigación*

Teniendo en cuenta el volumen empleado, el concreto es uno de los productos más consumidos en el mundo entero [14]. Los agregados son claves en la industria de la construcción y en la producción de concreto, dependiendo de la resistencia varía el volumen de estos. El agregado grueso oscila entre el 30% y el 80% del concreto, dependiendo de los requerimientos de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, módulo de finura, entre otras propiedades [15].

De forma particular, el informe presentado en el año 2016, acerca del estado actual del inventario de GEI en Colombia, establece que en este país en los últimos 20 años este tipo de emisiones aumentaron un 15%. Además de ello, se determinó que los departamentos con mayor cantidad de

emisiones de GEI en este país son Antioquia, Meta, Caquetá, Valle del Cauca con un total de 22.94; 21.4; 19.84 y 16.50 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año (Mt CO<sub>2</sub> Eq/año) respectivamente [16]. Desde el ámbito sectorial, los sectores económicos en Colombia con mayor generación de emisiones de GEI al año son el Forestal con 92.9 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año (Mt CO<sub>2</sub> Eq/año), el Agropecuario con 67.1 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año (Mt CO<sub>2</sub> Eq/año), el de Transporte con 28.4 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año (Mt CO<sub>2</sub> Eq/año), las Industrias Manufactureras con 28.4 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año (Mt CO<sub>2</sub> Eq/año), y el de Minas y Energía con 25.8 megatoneladas de dióxido de carbono equivalente por año (Mt CO<sub>2</sub> Eq/año).

En el caso del departamento de Sucre - Colombia, en lo referente a emisiones de GEI, este departamento ocupa el puesto número 26, y para el caso particular del sector de Minas y Energía se encuentra en la posición número 15 entre los departamentos que más producen este tipo de emisiones en este país. Esta situación se debe en gran medida, a que este departamento posee una formación geológica con características que le permiten desarrollar actividades de minería de materiales para la construcción, tales como arenas, materiales de arrastre, arcillas, y agregados gruesos derivados de la piedra caliza y margas.

Una de las principales características del sector minero en el departamento de Sucre - Colombia, es el bajo nivel tecnológico y la utilización de procesos de minería con técnicas muy primarias y poco tecnificadas [17], motivo por el cual en este departamento la cuarta actividad con mayor contaminación ambiental por GEI es la industria manufacturera y la construcción, destacando así mismo en estas, la quema de combustibles en las industrias de minerales no metálicos o agregados para la construcción, el procesamiento de alimento, tabaco y bebidas [16].

Consciente de la problemática planteada anteriormente, desde el sector gubernamental del departamento de Sucre - Colombia, a través del eje estratégico “Sucre Progresa Con Agua Para Todos, Ordenado, Sostenible Y Bajo En Carbono” perteneciente a su Plan de Desarrollo 2016 - 2019 [18], se reconoce que este tipo de problemáticas ambientales requiere del conocimiento de estrategias para el control y análisis de los posibles impactos, apoyados en la utilización de herramientas de planificación y gestión ambiental, de forma tal que se direcciona al departamento a un desarrollo bajo en emisiones de carbono.

### C. Objetivo

En consonancia con lo expuesto hasta el momento, esta investigación tuvo como objetivo principal la determinación de la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, generadas por el proceso de producción de agregados para la construcción en una empresa ubicada en el municipio de Tolúviejo - Colombia a través de la metodología PAS 2050. Esta investigación hace parte de la fase inicial de un proyecto que se encuentra desarrollando la Corporación Universitaria del Caribe - CECAR, el cual pretende cuantificar el impacto en el cambio climático generado por la producción de materiales agregados para la construcción en el departamento de Sucre - Colombia.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

Metodológicamente esta investigación se llevó a cabo en tres fases metodológicas. En la fase inicial se realizó un análisis del sector minero en el departamento de Sucre - Colombia responsable de la extracción, producción y procesamiento de materiales agregados para la construcción. Este análisis incluyó la caracterización del proceso productivo de los agregados de piedra caliza y derivados en este departamento. Para la realización de este análisis se contó con información secundaria y visitas de campo a las empresas pertenecientes a este sector en este departamento. En la fase siguiente se trabajó en conjunto con una empresa de este sector, y apoyados en la metodología PAS 2050, se evaluó el impacto ambiental generado por la producción de Gravillon, Triturado, Gravilla y la Arena Lavada de Caliza, que esta empresa produce.

En la última fase de esta investigación, se tomaron los resultados obtenidos en la evaluación del impacto ambiental realizada, y se procedió a elaborar una serie de estrategias para la disminución del impacto ambiental generado por esta actividad productiva. A continuación, se examina en detalle la metodología PAS 2050, la cual se utilizó en este trabajo para cuantificar el impacto en el cambio climático generado por la producción de materiales agregados para la producción en la empresa seleccionada.

### A. Metodología PAS 2050 Para La Evaluación de La HC

Actualmente la problemática ambiental asociada al calentamiento global ha cobrado gran interés, llevando así a diferentes asociaciones y administraciones a desarrollar estrategias, exigencias y en ocasiones legislaciones específicas de reducción de GEI derivadas del cumplimiento del Protocolo de Kioto [18]. Para poder certificar el cumplimiento de dichas exigencias, se han desarrollado metodologías validadas a nivel internacional para la medición de las emisiones de GEI y el cálculo de la Huella de Carbono, tales como: Greenhouse Gas

Protocol (GHG Protocol), International Estándar Organization (ISO), PAS [19].

Concretamente, la Publicly Available Standar 2050 (PAS 2050), es una especificación disponible públicamente para evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero del ciclo de vida del producto, desarrollada por expertos internacionales en todo el mundo académico, empresarial, gubernamental y organizaciones no gubernamentales (ONG) y múltiples grupos de trabajo técnicos asociados a (BSI) British Standards, Carbon Trust y Department for Environment, Food and Rural Affairs (Defra) [20].

Resulta pertinente remarcar en esta parte que, realizar la medición de la HC de los productos en todo su ciclo de vida, ayuda en el análisis, la evaluación, la estimación e identificación de las etapas críticas de un producto o proceso y posibles efectos de las emisiones de GEI derivadas de las actividades de un producto en específico, desde la obtención de materia prima, la fabricación, la distribución, el consumo y finalmente la eliminación y/o reciclado [21], [19].

Por otra parte, el British Standard Institute (2008), en el PAS 2050 establece 5 pasos fundamentales para su aplicación, los cuales se listan a continuación: 1) Creación de mapa de proceso; 2) Comprobación de los límites y priorización; 3) Recolección de datos; 4) Calcular la huella, utilizando (1) cuando se trata de fuentes de combustibles fósiles o (2), para el caso del consumo eléctrico; y 5) Comprobación de la incertidumbre, la cual es opcional.

$$HC = \text{Consumo de Combustible} \left[ \frac{gal}{m^3} \right] \times \text{Factor de emisión} \left[ \frac{CO_2 Eq}{gal} \right] \quad (1)$$

$$HC = \text{Consumo eléctrico} \left[ \frac{kWh}{m^3} \right] \times \text{Factor de emisión} \left[ \frac{CO_2 Eq}{kWh} \right] \quad (2)$$

La metodología PAS 2050 ha establecido límites para su construcción, basados en dos enfoques. El primer enfoque es de la cuna a la tumba (Business to Consumer (B2C)), y está orientado al cálculo desde el suministro de materiales, proceso de manufactura, distribución, consumo y su disposición final durante el ciclo de vida completo del producto. El segundo enfoque es de la cuna a puerta (Business to Business (B2B)), y está enfocado en las primeras etapas del proceso de producción, como es el suministro de materia prima, proceso de manufactura y almacenamiento o distribución.

Asimismo, para realizar el cálculo de la huella de carbono se debe conocer previamente los factores de emisión tenidos en cuenta para el consumo eléctrico y de combustibles

utilizados, así como también su modo de aplicación. Para el caso específico de los combustibles en Colombia, estos se dividen en tres grupos, los sólidos, los líquidos y los gaseosos. Concretamente para esta investigación, los consumos presentados de este tipo de combustibles hacen referencia a combustible líquido a base de diésel. Este combustible es la mezcla Diésel - Biodiesel (B - 10), y consiste en la adición de un porcentaje de biocombustible mayor o igual a 10% el cual es Biodiesel de Palma y se encuentra reglamentado por el decreto 4892 del 2011, bajo la necesidad de usar combustibles de origen renovable para mitigar la contaminación ambiental y la reducir la dependencia del petróleo [23], [24].

Ahondando un poco más en la cuantificación de emisiones de este tipo de consumos, en Colombia los Factores de Emisión de Los Combustibles Colombianos - FECOC fueron actualizados en el año de 2016, y se encuentran registrados en una base de datos creada por grupos de trabajo de la Universidad de Antioquia, Universidad Nacional de Colombia, Universidad del Valle, Instituto Tecnológico Metropolitano y la Unidad de Planeación Minero Energética [24]. Para el caso de estudio abordado en este trabajo, se tomaron la información de los dos combustibles de interés, más utilizados en Colombia, los cuales se presentan en la Tabla I.

TABLE I  
FACTORES DE EMISIÓN DE COMBUSTIBLE EN COLOMBIA

Factores de Emisión					
Combustible	Aplicación	Kg CO <sub>2</sub> /Gal	Kg CH <sub>4</sub> /Gal	Kg N <sub>2</sub> O/Gal	Kg CO <sub>2</sub> Eq/Gal
Diésel Mezcla Comercial B10	Móvil	10.277	3.70E-05	3.70E-05	10.288951
Diésel Mezcla Comercial B10	Estacionaria	10.277	1.00E-05	6.00E-06	10.279038
Gasolina E10 Mezcla Comercial	Móvil	7.618	2.63E-04	2.50E-05	7.632025
Gasolina E10 Mezcla Comercial	Estacionaria	7.618	2.40E-05	5.00E-06	7.62009

Fuente: Elaboración propia, a partir de [24]

Por otra parte, en la cuantificación de emisiones generadas por consumo eléctrico se deben tener en cuenta diferentes escenarios como es la generadora eléctrica, el tipo de generación de electricidad, el Mix eléctrico, entre otros. Para el caso particular de Colombia la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) elaboro el cálculo del factor de

emisión del Sistema Interconectado Nacional (FE) para dos escenarios presentados. El primero aplica para inventarios de GEI, Huella de Carbono o Factor de Emisión de la Generación Eléctrica (MIX), y el segundo con la finalidad de aplicarlo a proyectos de Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL). De este cálculo se estableció el Factor de Emisión para Inventarios de HC, siendo este de 0.200 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por kilovatio - hora (kg CO<sub>2</sub> Eq/kWh), y para proyectos MDL de 0.374 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por kilovatio - hora (kg CO<sub>2</sub> Eq/kWh) [25]. Cabe anotar que el cálculo de estos factores se encuentran regulado por la resolución 91304 emitida por el Ministerio de Minas y Energía el 25 de noviembre de 2014 [26]. Teniendo claridad de la guía metodológica utilizada en este trabajo, seguidamente se describen los resultados obtenidos en esta investigación.

### III. RESULTADOS

En el departamento de Sucre - Colombia existe en la actualidad un distrito minero denominado Calamarí - Sucre, el cual lo integran los municipios de Tolúviejo, Tolú y Sincelejo. En este distrito se encuentran importantes yacimientos de caliza, arcilla y arena, cuyo aprovechamiento sostenible se pretende realizar con un enfoque dual, pues al tiempo que se extraen los minerales se buscará darles un atractivo turístico a dichas explotaciones. Asimismo, los productos derivados de esta actividad pueden distribuirse nacional e internacionalmente aprovechando la posición estratégica del territorio, que cuenta con buenas comunicaciones terrestres y acceso al Mar Caribe [27].

De acuerdo con el Registro Minero Nacional y el Catastro Minero, para el año de 2016 existían 64 títulos mineros inscritos vigentes para el departamento de Sucre - Colombia, de los cuales 27 títulos mineros estaban ubicados en el municipio de Tolúviejo, predominando en la titulación minera la explotación de materiales pétreos o agregados de piedra caliza para la construcción, los materiales para la construcción, mármol y puzolana [28].

Según el listado de títulos mineros vigentes extraído del catastro de la Agencia Nacional Minera, se observa que el área licenciada en el municipio de Tolúviejo - Colombia representa el 37% de total de áreas licenciadas en el departamento de Sucre - Colombia, y para el caso del municipio de Coloso - Colombia estas representan el 16%, siendo estos dos municipios los que mayor área titulada posee por la Agencia Nacional Minera en este departamento.

Como principales resultados de esta investigación se encuentran la caracterización del proceso productivo para la producción de agregados de piedra caliza y derivados en el Distrito Minero Calamarí - Sucre, y la evaluación de la Huella

de Carbono en la producción de materiales agregados para la construcción en una empresa del municipio de Tolviejo - Colombia, los cuales se encuentra a continuación.

*A. Caracterización del Proceso Productivo de Agregados de Piedra Caliza y Derivados en el Distrito Minero Calamarí - Sucre*

En el Distrito Minero de Calamarí - Sucre el proceso de producción o explotación de materiales se lleva a cabo en varias etapas, iniciando con la extracción y cargue del material. Luego de esto el material se transporta a la planta de trituración, se descarga y comienza el proceso de trituración. Seguidamente se clasifica el material, para finalmente almacenarlo y venderlo.

Es de vital importancia resaltar que en este departamento existen dos métodos para la explotación de los materiales, una forma manual artesanal y otra de forma mecanizada, sin embargo, para tener una mejor claridad de estos procesos seguidamente se explica las características que posee cada operación dentro de este proceso productivo.

- Extracción Del Material o Materia Prima en El Departamento de Sucre.

El proceso de extracción de la materia prima se produce después de la remoción del material inorgánico y orgánico que recubría la roca, y es realizado de forma manual o artesanal y de forma mecanizada.



Fig.1 Extracción de materia prima mediante métodos artesanales. Municipio de Tolviejo - Sucre. Fuente: Elaboración propia 2017

En la forma artesanal el trabajador utiliza su propia fuerza para remover el material (Figura 1C), utilizando barras de acero, palas, picos, carretas (Figura 1A); o en algunos casos cierto tipo explosivo que permiten fraccionar la roca en tamaños más pequeños, las cuales son apiladas en un lugar para esperar la operación de cargue. El uso de estos elementos viene dándose desde muchos años atrás, la técnica consiste en

impactar sobre la roca con el objetivo de crear una fisura que permita reducirla a menores proporciones (Fig. 1B). De manera general las rocas extraídas poseen dimensiones que oscilan entre los 30 centímetros (cm) a los 40 centímetros (cm) con peso promedio de 5 kilogramos (kg) a 10 kilogramos (kg) dependiendo el tamaño (Fig. 1D).

Cuando el proceso de extracción se realiza de forma mecanizada, la extracción del material es llevada a cabo por maquinaria pesada (Fig. 2), sin embargo, si el material posee alta dureza se procede a aplicar un explosivo que permita fraccionarla. En este proceso se utilizan retroexcavadoras, martillos neumáticos o compresores para así remover las rocas y apilarlas para su posterior cargue.



Fig. 2 Extracción de materia prima de forma mecanizada. Municipio de Tolviejo - Sucre. Fuente: Elaboración propia 2017.

- Cargue del Material

Cargar el material es la actividad que permite colocar el material en las volquetas, para su posterior transporte a la trituradora u otro lugar de destino. Esta operación es realizada en todas las canteras y trituradoras ubicadas en el departamento de Sucre - Colombia, esto se debe a la distancia o ubicación entre la cantera y zona de procesamiento, lo que hace imprescindible el transporte de un lugar a otro. De igual manera que las anteriores operaciones se realizan de forma manual y de forma mecánica.

Manualmente este proceso (Fig. 3A) se lleva a cabo una vez este apilado en material luego de la extracción. Allí este es cargado en la volqueta mediante una operación iterativa roca por roca hasta alcanzar la capacidad de carga del equipo de transporte. Durante el proceso de cargue del material con maquinaria (Fig. 3B), los operadores de los cargadores llegan hasta la zona donde se encuentran apiladas las rocas y allí con la pala del cargador, cargan el material y luego lo colocan en el compartimiento de carga de las volquetas hasta alcanzar su capacidad de transporte.



Fig. 3 Operación de carga de material. Municipio de Tolviejo - Sucre.  
Fuente: Elaboración propia 2017.

- Transporte del Material

La operación de transporte del material (Fig. 4), es realizada desde las canteras hasta el lugar de ubicación de las trituradoras. El transporte se realiza en volquetas de 7 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) o 15 metros cúbicos (m<sup>3</sup>) de capacidad. Este transporte es realizado generalmente por terceros que prestan el servicio de transporte, sin embargo, algunas de estas empresas poseen volquetas propias. La operación de transporte del material es realizada en un 61% por terceros que ofrecen servicios de transporte de la cantera a las diferentes trituradoras o lugares de destino. Mientras solo el 39% de este transporte es realizado por los productores o procesadores.



Fig. 4. Equipos de transporte del material a zonas de procesamiento.  
Municipio de Tolviejo - Sucre.  
Fuente: Elaboración propia 2017

- Descargue del Material.

El descargue del material se realiza directamente a la tolva de las trituradoras (Fig. 5A), en donde las rocas pasan a la siguiente fase para ser trituradas. Esto descargue es realizado directamente en la tolva si la trituradora primaria posee características que le permitan operar sin sufrir atascamiento por rocas. De lo contrario, el descargue se realiza cerca de la boca de la trituradora, y una vez allí el proceso de cargue es asistido por trabajadores, los cuales toman roca por roca y las depositan en las bocas de las trituradoras donde pasan a ser trituradas (Fig. 5B).



Fig. 5. Descarga y alimentador de planta de trituración. Municipio de Tolviejo - Sucre.  
Fuente: Elaboración propia 2017.

- Trituración

En el distrito minero de Calamarí - Sucre, todas las plantas de trituración cuentan con una posición fija, no se encontró ninguna planta estacionaria o móvil. Adicionalmente se notó que algunas de estas plantas aprovechan la forma del relieve para su instalación, teniendo la posibilidad de que la materia prima caiga directamente en la tolva por donde ingresa al proceso de trituración, y seguidamente cae al almacenamiento en donde los equipos de transporte pueden ingresar por la parte inferior y cargar el material procesado.

El proceso de trituración es la clave en la producción de materiales para la construcción derivados de rocas calcáreas. Durante este proceso las rocas caen por la tolva o boca de la trituradora a una serie de mandíbulas, o dientes giratorios los cuales, al golpear la roca, generando material de menor tamaño hasta triturar la roca completamente. Una vez la roca está es triturada, cae a rejillas o zarandas de diferentes dimensiones que permiten clasificar los distintos tipos de productos derivados del proceso de trituración. El material retenido en estas rejillas o mallas pasa a un sistema de cintas o bandas transportadoras que lo va depositando en diferentes lugares dependiendo su clasificación.

En el departamento de Sucre - Colombia, según la alimentación o fuente de poder existen básicamente 2 tipos de trituradoras, las accionadas por energía eléctrica y las accionadas por motores diésel. Las plantas de trituración eléctrica poseen motores eléctricos que accionan el mecanismo de trituración y también permiten transferir la potencia al sistema de tambores que accionan las bandas transportadoras (Fig. 6). Las plantas accionadas por motores diésel es una adaptación artesanal de motores de combustión interna, estos son motores de tractores en desuso, pero que son elegidos debido a que poseen bajas revoluciones y alta potencia para accionar el modulo, los cuales transfieren su potencia mediante un eje al sistema de trituración.



Fig. 6. Planta de trituración y clasificación de materiales agregados.  
Municipio de Tolviejo – Sucre.  
Fuente: Elaboración propia 2017.

- Clasificación y Almacenamiento del Material Triturado

La clasificación de los productos generados después del proceso de trituración se determina según sus dimensiones y la unidad de medida utilizada son las pulgadas (in), sin embargo, las plantas generalmente producen triturado y gravilla debido a que estos dos productos son los más demandados y utilizados por los clientes en el sector de la construcción. No obstante, existe un tercer producto que es el polvillo, éste polvillo es el remanente del proceso de trituración el cual lo conforman todo el material particulado y granos que poseían dimensiones pequeñas y no pudo ser clasificado por el sistema de en ninguno de los otros productos.

Estos productos se desplazan por el sistema de bandas, las cuales son instaladas dependiendo el Angulo de inclinación máxima y el ángulo talud del material a transportar por el sistema. Según la altura de descarga determinada, el material cae al final de la banda directamente al vehículo de transporte, o puede caer al suelo formando un montículo de material que después es cargado y acopiado en la zona de almacenamiento de productos terminados (Fig. 7).



Fig. 7. Acopio de piedra triturada. Municipio de Tolviejo – Sucre.  
Fuente: Elaboración propia 2017.

Como observación especial, una característica general en todas las plantas de trituración en el departamento de Sucre es el manejo de inventario de productos terminados, este factor se

presenta debido a las fluctuaciones de demanda de materiales agregados para la construcción. Para ello estas tienen lugares de acopio de estos productos dentro de las instalaciones de la planta.

- Venta

Por último, el proceso de venta se realiza directamente en las trituradoras, vía telefónica o correo electrónico, debido a que ella no posee otro punto de ventas, sin embargo, los administradores, gerentes o propietarios crean diferentes enlaces comerciales con los compradores lo que les permite llegar a un mutuo acuerdo de pago, suministro y transporte. El precio de venta varía de una empresa a otra, pero que el rango de diferencia con respecto a los precios no es muy elevado.

Luego de realizar la caracterización del proceso productivo de agregados de piedra caliza y derivados en el distrito minero de Calamarí - Sucre, a continuación, se presenta la evaluación de la huella de carbono en la producción de materiales agregados para la construcción en una empresa del municipio de Tolviejo - Colombia.

B. *Evaluación de La Huella de Carbono en la Producción de Materiales Agregados para la Construcción en una Empresa del Municipio de Tolviejo – Colombia*

Para realizar la evaluación de la HC en la empresa tenida en cuenta en esta investigación, se siguió la metodología PAS 2050 detallada anteriormente. La aplicación de esta metodología implicó, en primer lugar, la elaboración del mapa de procesos. Por practicidad en este trabajo solo se representa el mapa de procesos para la producción de un metro cúbico de Gravillon (Fig. 8). Los mapas de procesos restantes, se describen en el desarrollo de este aparte.

Debido a la particularidad de este sector productivo en el departamento de Sucre - Colombia, y teniendo en cuenta que en este trabajo se enfatizó en el análisis del impacto en el cambio climático generado por la extracción y producción de material agregado para la construcción producido en el municipio de Tolviejo – Colombia, este estudio se delimita a un enfoque Business to Business, que comprende 3 etapas: la extracción de materia prima, el transporte desde cantera a la planta de trituración y la producción de productos agregados de la piedra caliza.



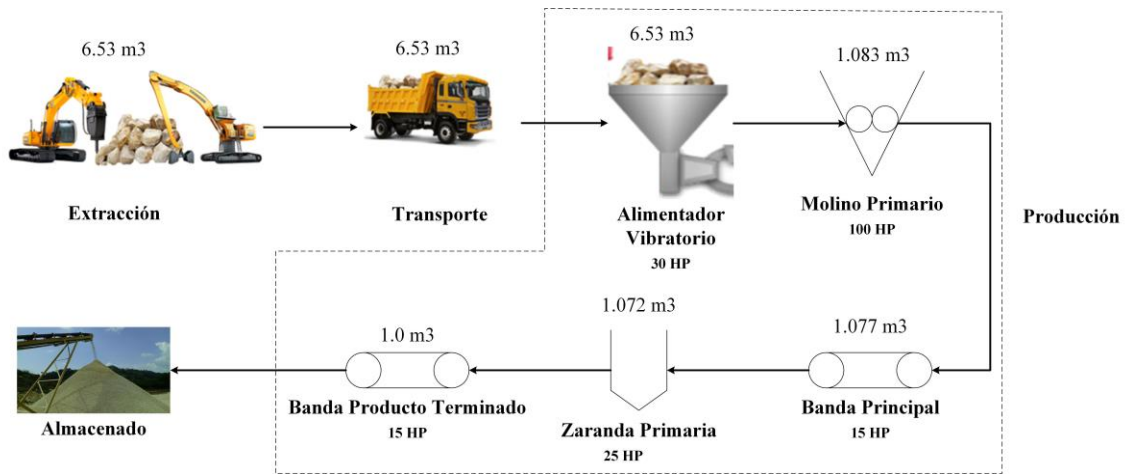


Fig. 8. Mapa de procesos del Gravillon (B2B).  
Fuente: Elaboración propia

En este trabajo se definieron como unidades funcionales 1 metro cubico ( $m^3$ ) de Gravillon, 1 metro cubico ( $m^3$ ) de Gravilla, 1 metro cubico ( $m^3$ ) de Triturado, y 1 metro cubico ( $m^3$ ) Arena Lavada de Caliza, para la evaluación de las diferentes huellas de carbono, asociadas a cada producto.

Dentro de la construcción de los mapas de procesos, el proceso de extracción de la piedra caliza, principal materia prima para cada uno de estos productos, se realiza a través de procesos mecanizados sin aplicación de voladuras. Para realizar la extracción de este material, en esta empresa se utilizan tres máquinas excavadoras, las cuales cuentan con adaptaciones de un martillo hidráulico, un desgarrador, o un chucharon para roca, todo esto dependiendo de la necesidad en la operación de extracción. Estos equipos trabajan conjuntamente en un frente de explotación y están encargadas del proceso de extracción y cargue del material a los vehículos utilizados para el transporte del material desde la cantera hasta la planta de trituración. Las emisiones de Dióxido de Carbono ( $CO_2$ ), Metano ( $CH_4$ ) y Óxido Nitroso ( $N_2O$ ) en esta etapa del proceso están asociada exclusivamente al consumo de combustible diésel, estimándose este en 0.508 galones de diésel aproximadamente para extraer un 1 metro cubico ( $m^3$ ) de material agregado para la construcción.

La operación de transporte es realizada utilizando un camión tipo volqueta con capacidad de 14 metro cubico ( $m^3$ ), el cual es cargado en la cantera y se transporta por cerca de 3 kilómetros (km) a la planta de trituración.

La etapa de producción consiste en la reducción del tamaño de la roca por medio de dos molinos, uno primario de tipo mandíbula, y uno secundario de tipo martillos, los cuales están encargados de reducir la granulometría del material en diferentes fases del proceso, para después ser clasificado según la granulometría del material. En esta parte, el material extraído y transportado hasta la planta, se recibe en una tolva

la cual es accionada por un alimentador vibratorio de 30 Caballos de Potencia (HP), alimentando con rocas al molino primario de mandíbulas, que a su vez es accionado por un motor de 100 Caballos de Potencia (HP), buscando reducir el tamaño de las rocas.

Una vez el material es fraccionado por este molino el material resultante es movido por una banda transportadora, accionada con un motor de 15 Caballos de Potencia (HP), la cual lo transporta a la zaranda principal, que funciona con un motor de 25 Caballos de Potencia (HP); este último equipo es el encargado de clasificar el material. A su vez este equipo, está integrado por un sistema de 3 tendidos clasificatorios según la dimensión del material, los cuales pueden ser cambiados según el producto que se desea obtener.

El material que no logra ser clasificado debido a que superaba la dimensión de la malla primaria, cae a un molino impactor o de martillos, el cual esta accionado por un motor de 100 Caballos de Potencia (HP), el cual reduce aún más la granulometría del material, para después ser transportado en una banda de retorno hasta que este logre ser clasificado por la malla de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, y ser clasificado como Gravilla. Luego de estos, el material es llevado por una banda transportadora accionada por un motor de 7.5 Caballos de Potencia (HP), la cual lo transporta a una segunda zaranda clasificadora que es accionada por un motor de 15 Caballos de Potencia (HP), donde se hace el proceso de lavado y lo aparta de la arena.

Seguidamente, esta Gravilla cae a otra banda transportadora para ser apilada. Cabe resaltar que todos los equipos involucrados, implica la utilización de energía eléctrica como fuente de poder.

Pasando a la fase siguiente, la etapa de recolección de datos se realizó durante la producción del mes de enero de 2017, en la cual se efectuó el levantamiento de la información en los procesos de explotación, transporte y producción. En

ese sentido, según la información recolectada, se determinó el volumen de materia prima necesario para la producción de 1 metro cubico (m<sup>3</sup>) de producto terminado para los diferentes productos ofrecidos, como se muestra en la Fig. 9.

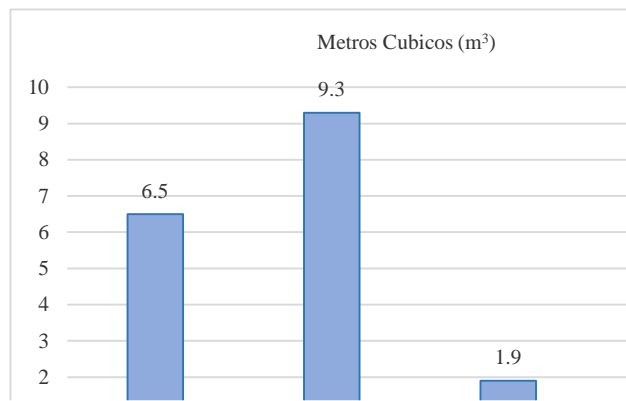


Fig. 9. Cantidad de materia prima necesaria para cada producto  
Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo, se determinó que el consumo de combustible por cada metro cubico de materia prima extraída de la cantera es de 0.508 galones por metro cubico (gal/m<sup>3</sup>), y de 0.099 galones por cada metro cubico (gal/m<sup>3</sup>) transportado, obteniendo un total de 0.607 galones por metro cubico (gal/m<sup>3</sup>) de materia prima explotada y transportada.

La Tabla II relaciona las características de capacidad y consumo de cada uno de los equipos utilizados en el proceso de producción de Gravillon 1 1/2, Gravilla 3/4, Triturado 7/8 y Arena lavada de caliza.

TABLE II  
CARACTERIZACIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

Nº	Equipo	Potencia (HP)	Consumo (kWh)
1	Alimentador Vibratorio	30	22.37
2	Molino Primario	100	74.57
3	Banda Principal Producto en Proceso	15	11.19
4	Banda de Retorno Producto en Proceso	7.5	5.59
5	Zaranda Primaria	25	18.64
6	Molino Impactor	100	74.57
7	Banda Secundaria Producto en Proceso	7.5	5.59
8	Banda Producto Terminado	7.5	5.59
9	Zaranda Secundaria	15	11.19
10	Banda Producto Terminado	7.5	5.59
11	Noria	1.5	1.12
12	Banda Producto Terminado	7.5	5.59

Fuente: Elaboración propia

Para la representación de los datos de consumo energético medido en kilowatts por hora (kw/h), se tuvo en cuenta el tiempo requerido en el proceso de producción de 1 metro cubico (m<sup>3</sup>) de cada producto y se planteó el supuesto que no todos los equipos que integran la planta de trituración

intervienen para la generación de un agregado en particular; además, que cada producto tiene tiempos diferentes de procesamiento. Por ello para cada tipo de agregado se tomó el consumo de solo los equipos que intervienen y se realizó el cálculo de forma individual, mediante el promedio de las horas que trabajó la planta por día y el volumen de productos que logró producir en el periodo en estudio. La Tabla III relaciona esta información.

TABLE III  
CONSUMO ENERGÉTICO PARA LA PRODUCCIÓN DE LOS DIFERENTES PRODUCTOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

Productos	KWh/m <sup>3</sup>
Gravillon 1 1/2	53.81
Triturado 7/8	76.68
Gravilla	17.20
Arena Lavada	41.66

Fuente: Elaboración propia

Luego de cuantificar las emisiones de GEI producidas por el consumo de combustibles en la producción de materiales agregados para la construcción en la empresa seleccionada utilizando (1), se encontró que las emisiones en las etapas de extracción y transporte de 1 metro cubico de piedra bruta, producto de la combustión de Diesel en los equipos utilizados, es de 6.24 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico (kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>), de los cuales 84% (5.22 kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>) pertenece a la extracción y el 16% (0.76 kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>), al transporte.

Al cuantificar las emisiones de GEI producto del consumo eléctrico utilizando (2), se encontró que en la producción de Gravillon 1 1/2 se producen cerca de 10.76 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico (kg CO<sub>2</sub> Eq/m<sup>3</sup>). En la tabla IV se encuentran la relación de emisiones de GEI discriminada por producto, generadas por el consumo de electricidad durante el proceso productivo de estos.

TABLE IV  
EMISIONES DE GEI GENERADAS POR EL CONSUMO ELÉCTRICO EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES AGREGADOS PARA LA CONSTRUCCIÓN

Productos	Emisiones de GEI (kg CO <sub>2</sub> Eq / m <sup>3</sup> )
Gravillon 1 1/2	10.76
Triturado 7/8	15.34
Gravilla	3.44
Arena Lavada	8.33

Fuente: Elaboración propia

Para el caso particular del Gravillon de 1 1/2, las emisiones generadas por el consumo eléctrico esta representadas en su mayoría por los equipos de Molienda Primaria y la Zaranda Primaria, los cuales emiten cerca del 31.75% de estas emisiones. Este comportamiento es similar al encontrado en la producción del Triturado 7/8. Contrario a esta situación, en la

producción de Gravilla se tiene que los equipos de Molienda Primaria y Zaranda Primaria, los responsables del 29.63 % de las emisiones de GEI debidos al consumo eléctrico, mientras que en la producción de Arena estos equipos son los responsables del 29.5 % de estas emisiones.

Finalmente, en la Fig. 10 se muestran las emisiones totales de GEI expresadas en kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico ( $\text{kg CO}_2 \text{ Eq} / \text{m}^3$ ) de cada producto analizado en este trabajo, donde se puede evidenciar que el Triturado 7/8 tiene una mayor producción de GEI equivalente a 21.581 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico ( $\text{kg CO}_2 \text{ Eq} / \text{m}^3$ ).

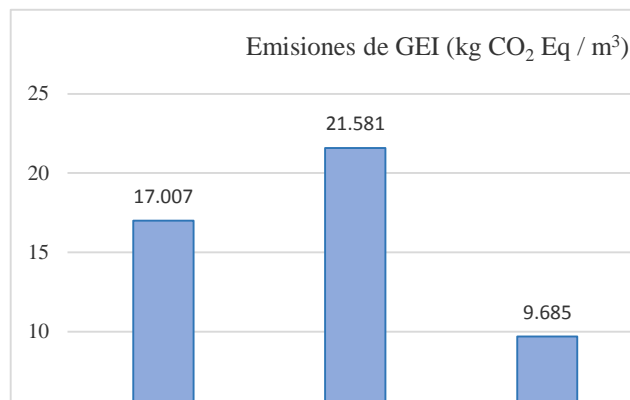


Fig. 10 Emisiones totales de cada producto.  
Fuente: Elaboración propia

#### IV. RECOMENDACIONES

Dentro del análisis de HC realizado en esta investigación se encontró que uno de los equipos utilizados en el proceso de extracción de la materia prima en la empresa objeto de estudio, la Retroexcavadora 350, emite cerca del 45% de las emisiones relacionadas al consumo de combustible. Como recomendación a corto plazo para esta empresa se tiene que se debe realizar un mantenimiento preventivo a este equipo para analizar su rendimiento y encontrar las causas del alto consumo de combustible. Como recomendación a largo plazo, en este sentido, analizar la opción de tener los equipos de extracción en modalidad de Leasing o Renting, debido a que estas modalidades ofrecen la opción de cambio de vehículo con cada renovación del contrato, manteniendo así equipos de última tecnología con una mayor eficiencia en el consumo de combustibles.

Otra medida, orientada esta vez a compensar las emisiones de GEI generados por la producción de agregados por esta empresa, es considerar tener un programa para la plantación árboles. Se debe tener en cuenta que estos árboles deben poseer características de mayor captación de GEI. Según el estudio de Crecimiento de Biomasa Acumulada y Carbono Capturado de 25 Especies de Árboles y Arbustos

Nativo de la Cordillera Oriental de Colombia [29], los árboles que tienen mayor capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> son el Alcaparro con 92574.25 kg CO<sub>2</sub> Eq/ha, el Cedro con 63829.84 kg CO<sub>2</sub> Eq/ha, el Nogal con 88728.93 kg CO<sub>2</sub> Eq/ha, y el Roble con 132781.29 kg CO<sub>2</sub> Eq/ha.

Según la investigación realizada y la emisión calculada de la empresa objeto de este estudio, es recomendable plantar una hectárea de Roble debido a que este árbol tiene mayor captación de CO<sub>2</sub> y alcanzaría a compensar la emisión de GEI que se generan en esta actividad económica.

#### V. CONCLUSIÓN

La culminación de este estudio permitió evaluar las emisiones de GEI en unidades de kilogramos de dióxido de carbono equivalente generadas por el proceso de producción de agregados gruesos obtenidos a partir de piedra caliza en el municipio de Toluviejo - Colombia.

Comparativamente se encontró que, en la producción de un 1 metro cubico (m<sup>3</sup>) de Arena Lavada, cerca del 57% de las emisiones de GEI corresponden al consumo eléctrico del proceso, mientras que el resto es debido al consumo de combustibles fósiles. De forma análoga se encontró que este comportamiento es similar a los casos particulares de producción de Triturado y Gravillon en donde la cantidad de emisiones de GEI también son atribuidas en mayor medida al consumo eléctrico, encontrando que el 71% y 63% aproximadamente de estas emisiones se atribuyen a esta causa.

Por otro lado, en la producción de Gravilla, cerca de solo el 35% de la cantidad de emisiones de GEI es atribuida al consumo eléctrico del proceso de producción, y en mayor medida al consumo de combustibles fósiles.

De igual forma, otro análisis que se deriva de este estudio concluye que actividades como la explotación y transporte de 1 metro cubico de piedra bruta, emiten 6.24 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico ( $\text{kg CO}_2 \text{ Eq} / \text{m}^3$ ), de los cuales el 84% (5.22 Kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>), corresponden al proceso de explotación y 16% (0.76 Kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>), se le atribuye al transporte.

En contraste con los resultados encontrados en este trabajo, se puede concluir que estos son relativamente son mayores a los encontrados en investigaciones similares recientes, tal es el caso del trabajo realizado por Wang, Seo, Liao y Fang en el año de 2016, en donde además de generar sugerencias para mejorar las herramientas de evaluación de los edificios ecológicos, se encuentra el análisis de dos casos de estudio, uno de ellos en China y el otro en Australia, en donde se concluye que se generan 3.318 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico ( $\text{kg CO}_2 \text{ Eq} / \text{m}^3$ ) y 6.9 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro

cubico (kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>) respectivamente, en la producción de 1 m<sup>3</sup> de Gravilla, datos que son inferiores a las emisiones calculadas en este trabajo, donde se calculó una emisión de 9.68 kilogramos de dióxido de carbono equivalente por metro cubico (kg CO<sub>2</sub> Eq / m<sup>3</sup>) para este producto particularmente.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Corporación Universitaria del Caribe – CECAR, ya que, a través de sus estrategias de financiamiento de propuestas de investigación, se logró el desarrollo de la investigación denominada “Propuesta Para La Disminución Del Impacto En El Cambio Climático Generado Por La Producción De Agregados Para La Construcción Provenientes De La Caliza En El Municipio De Toluvejo, Basada En El Análisis De La Huella De Carbono”, la cual soporta en su primera fase el trabajo aquí presentado.

#### REFERENCIAS

- [1] United Nations Framework Convention on Climate Change, *Perspectivas del Medio Ambiente Mundial*. 2012.
- [2] A. Frohmann and X. Olmos, “Huella de carbono, exportaciones y estrategia empresariales frente al cambio climático,” 2013.
- [3] A. Galli, T. Wiedmann, E. Erwin, D. Knoblauch, B. Ewing, and S. Giljum, “Integrating Ecological, Carbon and Water footprint into a ‘Footprint Family’ of indicators: Definition and role in tracking human pressure on the planet.,” *Ecol. Indic.*, vol. 16, pp. 100–112, 2012.
- [4] ISO/TS 14067, “Greenhouse Gases-Carbon Footprint of Products-Requirements and Guidelines for Quantification and Communication (Technical Specifications),” *Int. Organ. Stand.*, 2013.
- [5] E. Jaurlaritz, “Análisis de ciclo de vida y huella de carbono: Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto,” *Ihobe*, pp. 1–53, 2009.
- [6] T. Higuchi, M. Morioka, I. Yoshioka, and K. Yokozeki, “Development of a new ecological concrete with CO<sub>2</sub> emissions below zero,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 67, pp. 338–343, Sep. 2014.
- [7] C. L. Thiel, N. Campion, A. E. Landis, A. K. Jones, L. A. Schaefer, and M. M. Bilec, “A materials life cycle assessment of a net-zero energy building,” *Energies*, vol. 6, no. 2, pp. 1125–1141, 2013.
- [8] A. Heath, K. Paine, and M. McManus, “Minimising the global warming potential of clay based geopolymers,” *J. Clean. Prod.*, vol. 78, pp. 75–83, Sep. 2014.
- [9] E. Rossi and A. Sales, “Carbon footprint of coarse aggregate in Brazilian construction,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 72, pp. 333–339, 2014.
- [10] Hermawan, P. F. Marzuki, M. Abduh, and R. Driejana, “The Sustainable Infrastructure through the Construction Supply Chain Carbon Footprint Approach,” *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 312–322, 2017.
- [11] M. Yu, T. Wiedmann, R. Crawford, and C. Tait, “The Carbon Footprint of Australia’s Construction Sector,” *Procedia Eng.*, vol. 180, pp. 211–220, 2017.
- [12] M. Kuittinen, “Setting the Carbon Footprint Criteria for Public Construction Projects,” *Procedia Econ. Financ.*, vol. 21, no. 15, pp. 154–161, 2015.
- [13] S. Sreedhar, P. Jichkar, and K. P. Biligiri, “Investigation of Carbon Footprints of Highway Construction Materials in India,” *Transp. Res. Procedia*, vol. 17, no. December 2014, pp. 291–300, 2016.
- [14] K. L. Scrivener and R. J. Kirkpatrick, “Innovation in use and research on cementitious material,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 38, no. 2, pp. 128–136, Feb. 2008.
- [15] I. M. Nikbin *et al.*, “A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete,” *Mater. {&} Des.*, vol. 59, pp. 199–210, Jul. 2014.
- [16] I. Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales, “INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES EFECTO INVERNADERO - COLOMBIA,” Bogota - Colombia, 2016.
- [17] PEDCTI, “PLAN ESTRATEGICO DEPARTAMENTAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DE SUCRE SUCRE INNOVACION DE SUCRE.” 2013.
- [18] P. Wu, B. Xia, and X. Wang, “The contribution of ISO 14067 to the evolution of global greenhouse gas standards — A review,” *Renew. Energy Rev.*, vol. 47, pp. 142–150, 2015.
- [19] CEPAL, “Metodología de calculo de la huella de carbono y sus potenciales implicaciones para america latina,” 2013.
- [20] British Standard Institute, “Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services,” 2011.
- [21] H. Lua, S. Seo, L. Carlos, P. Machado, C. F. Ruviaro, and C. M. De Léis, “Avaliação do Ciclo de Vida na bovinocultura leiteira e as oportunidades ao Brasil Life Cycle Assessment in dairy cattle and opportunities to Brazil,” pp. 1–17, 2014.
- [22] British Standard Institute, *Guide to PAS 2050 How to assess the footprint of good and services*. 2008.
- [23] UPME, “Calculadora Fecoc 2016 - UPME,” *Unidad Planeac. Min. Energ.*, 2016.
- [24] A. Amell *et al.*, “Consultoría técnica para el fortalecimiento y mejora de la base de datos de factores de emisión de los combustibles colombianos- FECOC.,” Medellín, 2016.
- [25] Unidad de Planeación Minero Energetica (UPME), “Factores de emision del sistema interconectado nacional (S.I.N) Colombia 2013,” no. 69, pp. 1–24, 2014.
- [26] Ministerio de Minas y Energía, “Factor de emisiones electricidad - Res 9 1304 de 25 Nov 2014.” 2014.
- [27] INCOPLAN S.A, “Estudio técnico sectorial: infraestructura para transporte multimodal y de ogísticas integradas para el desarrollo de la industria minera en Colombia, con énfasis en puertos. Bogota,” no. 46, 2010.
- [28] Agencia Nacional Minera, “Catastro Nacional Minero 2016,” 2016.
- [29] AMBIENTAL EMPRESARIALCORPORACIÓN and FUNDACIÓN NATURA, “Crecimiento, biomasa acumulada y carbono capturado de 25 especies de árboles y arbustos nativos de la cordillera oriental colombiana,” 2014.