

## **Datos de estudiantes**

### **Estudiante 1:**

Nombre completo: Camilo Jhair Nicolas Delgado Salgado

Dirección: Carrera 22 #3 Sur – 30 (Jamundi, Colombia)

Teléfono de contacto: 3188176575

Correo electrónico: nicolasdelgado90@javerianacali.edu.co

Profesión: Ingeniería Civil

Universidad: Universidad del Valle

Empresa: Constructora Diversificar

Cargo: Gerente de proyectos

### **Estudiante 2:**

Nombre completo: Alejandro Henao Cortes

Dirección: Calle 18#69-100, Unidad residencial Castilla grande (Santiago de Cali, Colombia)

Teléfono de contacto: 3148606712

Correo electrónico: ahenao5@javerianacali.edu.co

Profesión: Ingeniería Civil

Universidad: Pontificia Universidad Javeriana Cali

Empresa: Constructora Bolívar Cali

Cargo: Coordinador de innovación



Pontificia Universidad  
**JAVERIANA**  
Cali

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DE ESTIMACIÓN PARA EL  
CARBONO EMBEBIDO DE PROYECTOS INMOBILIARIOS EN COLOMBIA: CASO  
DE ESTUDIO**

Programa de Maestría en Ingeniería Civil

Presentado por:

Alejandro Henao Cortes

Camilo Jhair Nicolas Delgado Salgado

Director:

Dr. Manuel Alejandro Rojas Manzano

Pontificia Universidad Javeriana Cali

Facultad de Ingeniería y Ciencias

## TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	1
1.1	Definición del problema de investigación .....	3
1.2	Pregunta de investigación .....	5
1.3	Justificación .....	5
1.4	Objetivos del proyecto .....	7
1.4.1	Objetivo General .....	7
1.4.2	Objetivos específicos .....	7
1.5	Alcance .....	7
2	REVISIÓN BIBLIOGRAFICA .....	8
2.1	Análisis de ciclo de vida .....	8
2.2	Metodologías de estimación del impacto ambiental .....	11
2.2.1	Metodologías de estimación para huella de carbono .....	11
2.2.2	Factores de emisión de gases de efecto invernadero .....	14
2.3	Huella de carbono .....	15
2.4	Compensación de CO <sub>2</sub> equivalente .....	18
2.5	Política pública.....	22
2.5.1	Ley 1715 de 2014.....	22
2.5.2	Resolución 0549 de 2015.....	23
2.5.3	Acuerdo 0575 de 2023 .....	23
2.6	Investigaciones relacionadas.....	25
3	METODOLOGÍA.....	28
3.1	Descripción .....	28
3.2	Conformación de base de datos .....	30
3.2.1	Emisiones de GEI para la energía adquirida.....	30
3.2.2	Emisiones de GEI para los materiales .....	31
3.2.3	Emisiones de GEI para el transporte de material.....	35
3.2.4	Emisiones de GEI para el transporte de personal .....	36
3.2.5	Emisiones de GEI por maquinaria. ....	39
3.2.6	Emisiones de GEI por el aprovechamiento y la disposición de RCD.....	40

3.3	Diseño de herramienta de cálculo .....	41
3.4	Estudio de caso .....	43
3.4.1	Resumen de cantidades de obra ejecutadas .....	47
3.4.2	Análisis de Pareto para los materiales .....	48
4	RESULTADOS .....	51
4.1	Conformación de bases de datos.....	51
4.1.1	Consumo de materiales (ERP).....	51
4.1.2	Factores de emisión para los materiales.....	52
4.1.3	Consumos y rendimientos de combustible para equipos .....	58
4.1.4	Transporte de los materiales .....	59
4.1.5	Caracterización del transporte de personal directo e indirecto .....	64
4.1.6	Generación y aprovechamiento de RCD.....	67
4.1.7	Pesos por material (PVC - Acero Inoxidable) .....	71
4.1.8	Consumo de energía eléctrica. ....	72
4.1.9	Emisiones por subcontratistas.....	73
4.1.10	Análisis general de la huella de carbono.....	74
4.2	Análisis financiero por compensaciones.....	75
4.2.1	Compensación por especies arbóreas.....	76
4.2.2	Compensación con bonos de carbono.....	78
4.3	Herramienta de estimación .....	79
4.3.1	Información general del proyecto. ....	79
4.3.2	Alcance 1 y 2 .....	80
4.3.3	Alcance 3 .....	83
5	CONCLUSIONES .....	89
5.1	Conclusiones generales del proyecto. ....	89
5.2	Recomendaciones para futuros trabajos.....	91
6	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	93
7	ANEXOS .....	100

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1 Potencial de calentamiento global (Durkee, 2006).....	16
Tabla 2 Valor Ns en función del número de datos (Burlington y May, 1970) .....	34
Tabla 3 Descripción de los alcances y fuentes emisión para la estimación de carbono embbebido (CCCS, 2023).....	41
Tabla 4 Relación de materiales - insumos en ERP .....	50
Tabla 5 Cantidades consumidas de los materiales analizados en el caso de estudio.....	52
Tabla 6 Factores de emisión para materiales según el método determinístico .....	53
Tabla 7 Emisiones de GEI en los materiales seleccionados. ....	54
Tabla 8 Aporte probabilístico de cada variable independiente.....	55
Tabla 9 Aporte probabilístico de cada variable independiente .....	56
Tabla 10 Equipos y medios de transporte considerados en el análisis del caso de estudio. ..	58
Tabla 11 Rendimientos teóricos para los equipos analizados.....	59
Tabla 12 Información demografica de los proveedores.....	60
Tabla 13 Cálculo de CO <sub>2</sub> equivalente por transporte de materiales .....	61
Tabla 14 Incidencia de la producción y el transporte en la emisión total por cada material.63	
Tabla 15 Información demográfica del personal directo .....	64
Tabla 16 Emisiones de GEI generadas por transporte de personal directo .....	65
Tabla 17 Emisiones de transporte de trabajadores indirectos por tipo de vehículo.....	66
Tabla 18 Generación mensual de residuos de construcción y demolición (Ton) .....	67
Tabla 19 Generación y aprovechamiento de RCD general - Caso de estudio.....	69
Tabla 20 Emisiones GEI por disposición final y aprovechamiento interno de RCD .....	70
Tabla 21 Consumo de energía y emisión asociada .....	72

Tabla 22. Emisiones por subcontratistas y su maquinaria .....	74
Tabla 23 Emisiones de GEI generadas por cada alcance e indicador.....	75
Tabla 24 Factores de captura de CO <sub>2</sub> .....	76
Tabla 25 Área de compensación requerida.....	76
Tabla 26 Costos asociados a la compensación por especies arbóreas .....	77
Tabla 27 Costos total por año y del segundo año en adelante .....	77
Tabla 28 Valor del bono de carbono en mercados regulados.....	78

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1 Alcances 1,2 y 3 del Greenhouse gas protocol (GHG, 2010) .....	12
Figura 2 Interacción entre el carbono operacional, embebido e incorporado a lo largo del ciclo de vida de la edificación (CCCS, 2021). .....	17
Figura 3 Resumen metodológico a implementar .....	28
Figura 4 Matriz energética para Colombia (UPME, 2024). .....	31
Figura 5 Código de cálculo para distancias entre un punto de origen y un punto destino (Google, 2023).....	36
Figura 6 Encuesta O-D aplicada a los trabajadores de contratistas. ....	38
Figura 7 Encuesta O-D aplicada a los trabajadores de contratistas. ....	38
Figura 8 Localización del proyecto (Google Maps, 2024) .....	44
Figura 9 Planta urbana del caso de estudio.....	45
Figura 10 Planta de inmueble tipo – Altea (Constructora Bolívar, 2024). ....	46
Figura 11 Avance de obra. Enero 2024 (Constructora Bolívar, 2024). ....	46
Figura 12 Diagrama de pareto - Estudio de caso .....	49
Figura 13 Interface general de la herramienta en el caso de estudio .....	80
Figura 14 Interface general alcance 2 .....	81
Figura 15 Distribución de medios de transporte para el personal directo .....	82
Figura 16 Segmentación de distancia por trayecto diario.....	82
Figura 17 Emisiones por trayecto y totales asociadas al transporte de funcionario directos. 83	
Figura 18 Hoja 1 para el alcance 3 .....	84
Figura 19 Hoja 2 para el alcance 3 .....	84
Figura 20 Distancia recorrida por los trabajadores indirectos .....	85
Figura 21 Tipos de vehiculos utilizados para distancias superiores a 20 km .....	85
Figura 22 Comportamiento del aprovechamiento de RCD .....	86

Figura 23 Incidencia de los materiales en las emisiones de GEI.....	87
Figura 24 Ubicación de proveedores según la ciudad .....	87
Figura 25 Segmentación por distancia recorrida de cada proveedor por trayecto.....	88

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 Presupuesto del estudio de caso .....	100
Anexo 2 Emisión de GEI por trabajador indirecto. ....	103
Anexo 3 Pesos de los materiales PVC y Acero galvanizado.....	113

## **PALABRAS CLAVE**

Sostenibilidad, Carbono embebido, proyectos inmobiliarios, huella de carbono, factores de emisión.

## ABSTRACT

In recent years, climate change and the continuous degradation of the environment have become issues of great relevance for mankind. Construction as a productive sector is, to a large extent, responsible for the recent growth of the national GDP, contributing up to 10 percentage points in the same year, according to CAMACOL 2020. To the same extent, it has a direct and indirect impact on the environment in three dimensions: Soil, Air and Water. In this particular case, we will consider the impact on the air dimension, which is evaluated in terms of tons of CO<sub>2</sub> equivalent (tCO<sub>2</sub>e) and is one of the most widely used mechanisms for measuring the emission of gases caused by human activity at the international level, as it is a vital input for calculating the carbon footprint. As of 2004, 8.6 billion tCO<sub>2</sub>e in "greenhouse gas" (GHG) emissions were generated by construction activities, and are projected to increase to 15.6 billion tCO<sub>2</sub>e by 2030, according to (IPCC, 2004).

In the context of the adoption of sustainable development in Colombia, in response to the call of international organizations and local public policy initiatives such as the "Zero Carbon Net Buildings Accelerator Project", it is essential to have the necessary means to estimate GHG emissions during the construction stage of projects, offering the capacity to propose mitigation and balance alternatives. The success in estimating the contribution to climate change is based on the selection of a methodology that accepts the particular conditions of the environment and the region, correctly integrating the available information. In this case study, calculation guidelines are defined as part of the process in the development of a tool that allows a realistic estimate to be made and subsequently validated through its application in a representative type of real estate project in the city, which, according to recent market trends, is predominantly focused on the VIS product niche. With the above, it is intended to generate indicators of emissions in construction projects and establish comparative analyses with similar projects that simultaneously serve as a reference to make preliminary estimates of gas generation in new projects.

## RESUMEN

En los últimos años, el cambio climático y la continua degradación del medio ambiente se han convertido en temas de gran relevancia para la humanidad. La construcción como sector productivo es, en gran medida, responsable del crecimiento registrado en los últimos años del PIB nacional aportando hasta 10 puntos porcentuales en un mismo año, según CAMACOL 2020. En la misma medida impacta directa e indirectamente sobre el medio ambiente en tres dimensiones: Suelo, Aire y Agua. Para este caso en particular, se tendrá en cuenta el impacto en la dimensión del aire, que se evalúa en términos de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>e) y constituye uno de los mecanismos más utilizados para medir la emisión de gases causados por la actividad humana a nivel internacional ya que es un insumo vital para el cálculo de la huella de carbono. Hasta el 2004, se generaron 8,600 millones de tCO<sub>2</sub>e en emisiones de “gases de efecto invernadero” (GEI) por actividades de construcción, y se proyecta un aumento a 15,600 millones de tCO<sub>2</sub>e para 2030, según (IPCC, 2004).

En el contexto de la adopción del desarrollo sostenible en Colombia, atendiendo el llamado de las organizaciones internacionales y las iniciativas locales de política pública como lo es el “Proyecto acelerador de edificaciones neto cero carbono”, se hace prevalente contar con los medios necesarios para estimar las emisiones de GEI durante la etapa de construcción de los proyectos ofreciendo la capacidad de plantear alternativas de mitigación y balance. El éxito en la estimación del aporte al cambio climático se da a partir de la selección de una metodología que acepte las condiciones particulares del medio y la región, integrando de manera correcta la información disponible. En este caso de estudio, se definen lineamientos de cálculo como parte del proceso en el desarrollo de una herramienta que permita realizar una estimación realista que posteriormente se valide a través de su aplicación en un tipo de proyecto inmobiliario representativo en la ciudad, que, según la tendencia reciente del mercado, está predominantemente volcada hacia el nicho de productos VIS. Con lo anterior, se pretende generar indicadores de emisiones en proyectos de construcción y establecer análisis comparativos con proyectos similares que simultáneamente sirvan de referencia para realizar estimaciones preliminares de generación de gases en nuevos proyectos.

# 1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el cambio climático y la continua degradación del medio ambiente se han convertido en temas de gran relevancia para la humanidad, dando lugar a debates cruciales tanto a nivel global como regional. En este contexto, en diciembre del 2015 el Acuerdo de París reunió a "todas las naciones en una causa común para emprender esfuerzos ambiciosos para combatir el cambio climático" y exigió a todas las Partes que presentaran sus mejores esfuerzos a través de "contribuciones determinadas a nivel nacional" (IPCC, 2019). El papel fundamental del sector de la construcción en cuanto a la contaminación ambiental, el consumo desmesurado de energía y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Estos problemas están directamente relacionados tanto con las actividades propias de la construcción de proyectos civiles como con los procesos productivos asociados a los materiales utilizados en dichas actividades.

En el sexto informe de la evaluación del cambio climático del IPCC, las emisiones de GEI generadas por el sector de la construcción representaban el 39% de las emisiones totales de GEI esta participación incluye tanto las emisiones directas, como las provenientes de la quema de combustibles fósiles en la operación de edificios, al igual que las emisiones indirectas asociadas con la producción de materiales de construcción y el transporte de materiales (IPCC, 2021).

El sector de la construcción fue responsable, a nivel global, de un 34% del consumo energético, con un aumento promedio del 4% para el uso residencial a comparación con 2020, además del 37% de las emisiones de GEI, alcanzando aproximadamente 9.8 GtCO<sub>2</sub> (ONU, 2022). En el contexto nacional las edificaciones son las responsables del 24% en el consumo energético y generan el 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la operación de estos (Agencia internacional de energía, 2019).

Colombia, un país de contrastes, se distingue por su impresionante riqueza medioambiental, siendo reconocido como uno de los países megadiversos del mundo, atributo sustentado por su privilegiada ubicación geográfica al encontrarse estratégicamente situada entre el océano Pacífico y el mar Caribe. Además, alberga una porción significativa de la selva amazónica y se extiende hasta el extremo norte de la cordillera de los Andes. Dada su biodiversidad, el cuidado del medio ambiente se convierte en un criterio fundamental en el foco de las políticas públicas para su preservación y conservación.

Dado lo anterior, en el año 2012, el gobierno colombiano emprendió un programa conocido como la "Estrategia Colombiana de Desarrollo Bajo en Carbono (ECDBC)," bajo la dirección del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. La primera fase de esta estrategia se centró en la caracterización de la mitigación a nivel sectorial y estableció una ambiciosa meta de reducción de emisiones para el año 2030, fijando el objetivo de disminuirlas en un 20%. Sin embargo, no fue sino hasta el año 2018 que se dio inicio a la segunda etapa de esta estrategia a nivel nacional. Coincidiendo con este hito, se promulgó la Ley de Cambio Climático en Colombia, identificada como la Ley 1931, con el propósito de gestionar el cambio climático en diferentes sectores y territorios del país.

Para el sector de la construcción, en 2022, el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) implementó a nivel nacional el Proyecto Acelerador de Edificaciones Neto Cero Carbono (AENCC) financiado por el Global Environment Facility (GEF), donde se establecen metas más exigentes comparadas con las normativas anteriores, para ello el CCCS establece que los proyectos cuya licencia de construcción sea del 2023 deben reducirse el 30% en el carbono embebido y el 40% en el carbono operacional para los estratos 1,2,3 y 4. Hacia el año 2040 el 80% de los proyectos licenciados a partir de ese año deben ser neto cero en el carbono operacional y generar una reducción del 70% en el carbono embebido. Por último, para el 2050 el 100% de las edificaciones licenciadas a partir de este año deben ser proyectos regenerativos y resilientes, lo cual indica que deben ser neto cero a nivel de carbono embebido y operacional. No obstante, el CCCS ha determinado que la línea de base de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), contra la cual deben evaluarse estas reducciones, es una responsabilidad de cada empresa que implemente proyectos en cualquier año en el que participe en tales iniciativas.

Para determinar la línea base de emisiones de GEI y aportar al cambio climático de cada proyecto inmobiliario, es indispensable una herramienta que considere los 3 alcances para medir huella de carbono, considerando las condiciones de producción, abastecimiento de materiales, gestión de residuos, consumo energético, consumo de combustibles fósiles, entre otras actividades propias de construcción colombiana. Por ello, el presente trabajo de grado tiene como objetivo diseñar una herramienta de estimación de huella de carbono embebido para proyectos inmobiliarios que permita medir el impacto ambiental generado, aplicada en un caso de estudio referido a un proyecto inmobiliario en el municipio de Jamundí, cuyo sistema constructivo se basa

en muros y losas fundidas en sitio para un total de 5 torres de 8 pisos cada una. La herramienta propuesta se ajusta a las condiciones de abastecimiento y producción que tiene cada uno de los productores a partir de la declaración ambiental del producto (EPD), dónde se constituyen las emisiones de GEI por cada material y el transporte asociado a su cadena de suministro.

### **1.1 Definición del problema de investigación**

Una de las principales preocupaciones de las diferentes organizaciones internacionales es la degradación del medio ambiente. La construcción, como sector productivo, aporta un 17,6% del PIB nacional. Adicionalmente, las actividades de construcción generan cerca de 1,6 millones de empleos directos en el país, lo cual representa el 7% de la población ocupada formalmente (BANCOLOMBIA, 2023). Además, impacta de manera directa e indirecta al medio ambiente en tres dimensiones: Suelo, Aire y Agua. Específicamente en la dimensión de aire, uno de los mecanismos más utilizados para medir la emisión de gases causados por la actividad humana es el de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>e), insumo para el cálculo de la huella de carbono. El sector se ha catalogado como uno de los principales actores del cambio climático, donde su consumo energético se acerca al 34% y la participación en emisiones de gases de efecto invernadero se encuentra cercano al 37% (ONU,2022).

De acuerdo con el informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) en el 2014, el aumento de las temperaturas globales y las emisiones GEI han generado un considerable interés en ciertos sistemas económicos liderados por países de América Latina y el Caribe. En estas regiones, el medio ambiente desempeña un papel fundamental en sus estrategias de marketing, y han desarrollado enfoques de mercantilización para proteger la capa de ozono y abordar la mitigación de los gases de efecto invernadero.

Después de la firma y la ratificación del Protocolo de Kioto (2005), el análisis de la huella de carbono se ha convertido en una herramienta para combatir el exceso de emisiones en diversas industrias, lo que contribuye a evitar posibles sanciones gubernamentales. Además de su enfoque regulatorio, la huella de carbono se ha convertido en una estrategia de marketing utilizada por algunas empresas. Al divulgar la cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) asociada a la fabricación de sus productos, estas compañías buscan atraer a los consumidores al destacar la eco amigabilidad de sus productos en comparación con los de la competencia

Entendiendo el impacto del cambio climático, se han creado diferentes mecanismos para la reducción de emisiones de GEI, por ejemplo, el proyecto REED + (Reducing emissions from deforestation and forest degradation), cuyo objetivo de reducción lo logran a partir de la conservación y aumento de las reservas de carbono y el manejo forestal sostenible. Este mecanismo fue creado bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMUNCC) para mitigar el cambio climático, que busca a través de diferentes tipos de acciones relacionadas con el fortalecimiento de la gobernanza forestal, la implementación de procesos productivos sostenibles, el manejo forestal comunitario, el monitoreo forestal, la conservación de la biodiversidad y la recuperación de áreas sin cobertura boscosa, abordar las causas subyacentes e incidir en los comportamientos de los agentes y en los motores generadores de la deforestación y degradación forestal.

En Colombia, el sistema de monitoreo, reporte y verificación (MRV) de las acciones de mitigación liderado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible está reglamentado por la Resolución 1447 de 2018, la cual define las funciones, los componentes, los alcances, los enfoques, y los principios del sistema MRV. También hace parte del MRV el sistema de contabilidad de reducción de emisiones y remociones de GEI, referido a un conjunto de procesos, tecnologías, protocolos y reglas para la contabilidad de emisiones de GEI y reducción de estas, lo que permite dar cuenta de los resultados de mitigación de GEI del país.

A partir de lo anterior, el CCCS ha apropiado el plan de mitigación y adaptación al cambio climático del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible desde diferentes estrategias como la hoja de ruta nacional de edificaciones neto cero carbono, dónde se establecen hitos claves para la reducción de emisiones GEI en la etapa de construcción y operación de las edificaciones con el objetivo claro de lograr proyectos resilientes y regenerativos.

El CCCS ha apoyado a los municipios de Santiago de Cali y Bogotá D.C en la estructuración de un plan de acción para lograr edificaciones neto cero carbono en cada ciudad, entendiendo las particularidades del mercado del sector de la construcción en cada municipio. Mediante la implementación del plan de acción, la ciudad podrá aportar al cumplimiento de las metas nacionales para lograr edificaciones neto cero carbono, en articulación con los principales instrumentos de política pública y estrategias que hacen frente al cambio climático a nivel local, regional y nacional.

No obstante, antes de abordar un proceso de mitigación y reducción, es imperativo comprender la situación actual en cuanto a la generación de GEI de los proyectos inmobiliarios en Colombia. Esto requiere la realización de estimaciones o mediciones que analicen las dinámicas y los procesos de producción de materiales específicos de la región analizada, en conjunto con los medios transporte de este material, los sistemas constructivos, el consumo de energía y agua. Sin embargo, a nivel general, no se encuentra suficiente información disponible sobre la generación de GEI en los procesos productivos regionales y su transporte, razón por la que se hace necesario generar un análisis estadístico de la información encontrada que brinde objetividad para las particularidades del sector. Para ello se plantea la siguiente pregunta de investigación, con base en que las diferentes metodologías, factores de emisión en procesos productivos se han determinado según las condiciones de países europeos, asiáticos y norte americanos.

## **1.2 Pregunta de investigación**

¿Cómo se puede optimizar el proceso de estimación del carbono embebido de proyectos inmobiliarios en Colombia teniendo en cuenta las condiciones de la industria de la construcción a nivel nacional y regional?

## **1.3 Justificación**

La construcción sostenible es la práctica de planear, diseñar, construir, operar y habitar proyectos de construcción para que sean económicamente eficientes, minimicen su impacto negativo en el ambiente y maximicen su impacto positivo en los usuarios y en las comunidades a lo largo de su ciclo de vida. Tiene el potencial de generar impactos positivos en 12 de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, planteados por la Organización de las Naciones Unidas en el 2015. (CCCS, 2023).

La construcción sostenible impacta directa e indirectamente a diferentes actores de la cadena de valor, uno de ellos es el usuario final (de viviendas, hospitales, colegios, centros comerciales, aeropuertos, entre otros), quienes finalmente tienen el poder de movilizar el mercado hacia una mejor condición ambiental. Cada vez más, los consumidores buscan productos, servicios y experiencias que reflejen su creciente estado de conciencia con respecto al cambio climático y la sostenibilidad. En el sector inmobiliario, este tema cobra mayor relevancia al tener una gran influencia en su calidad de vida.

El crecimiento de la demanda en prácticas de construcción sostenibles, como las políticas regidas por entes gubernamentales para la descarbonización de Colombia, ha requerido herramientas para comprender el cambio climático del sector de la construcción para cada proyecto civil. Sin embargo, muchas de estas políticas exigen a las organizaciones de diferentes sectores que a partir del 2030 inicien las reducciones al aporte que realizan al cambio climático.

Dentro del panorama internacional, el gobierno canadiense, ha fortalecido el impuesto al carbono como principal medida para reducir las emisiones de GEI entre 40% y 45% para el año 2023. Es así como desde el 1 de abril del 2024 el impuesto pasó de 59 USD a 65 USD por cada tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente emitido a la atmosfera, generando consigo otros aumentos como el precio de la gasolina (El espectador, 2024). La medida ha generado aceptación y controversia en diferentes sectores, pero es la alternativa que se replica con mayor fuerza en los países que han firmado sus compromisos de reducción para las emisiones de GEI en la Agenda 2030.

En Colombia el impuesto al carbono aplica en la primera actividad de la cadena de suministro por venta, importación o autoconsumo de cualquiera de los combustibles fósiles grabados dentro del territorio colombiano; específicamente gasolina, queroseno, jet fuel, combustible Diesel (ACPM) y fuel oil. Como parte de su estrategia para abordar los compromisos de reducción de emisiones climáticas en virtud del “Acuerdo de París”, Colombia implementó el impuesto al carbono, mediante el artículo 221 (Parte IX) de la Ley 1819 de 2016, para desincentivar el uso de combustibles fósiles, que generan emisiones de GEI durante su combustión (Min. de ambiente y desarrollo sostenible, 2024).

Desde lo anterior, desarrollar una herramienta de estimación de carbono embebido adaptada a Colombia es el punto de partida hacia la adopción de prácticas sostenibles en la industria de la construcción, lo que es esencial para cumplir con los objetivos de reducción de emisiones y descarbonización del país. La medición objetiva y precisa de la huella de carbono tiene un papel fundamental en el ámbito organizacional de la actividad constructora ya que sería la base de la implementación de un sistema de gestión integral de la energía y el impacto ambiental. La herramienta propuesta brinda mecanismos a los líderes empresariales, desde diseñadores y constructores, hasta políticos, generando criterios más completos que permitan reducir la huella de carbono en proyectos inmobiliarios, orientando a la gerencia en un enfoque más estratégico en el sentido sostenible del sector constructor del país.

## **1.4 Objetivos del proyecto**

### 1.4.1 Objetivo General

Diseñar una herramienta de estimación de huella de carbono embebido para proyectos inmobiliarios que permita medir el impacto ambiental generado.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Seleccionar la metodología para la estimación de carbono embebido en proyectos de construcción que mejor se adapte a las condiciones particulares de la región
- Formular los lineamientos operacionales del procedimiento de cuantificación del carbono embebido para el diseño de la herramienta de estimación.
- Evaluar la herramienta diseñada en un proyecto de construcción inmobiliario de la región para validar su aplicación.

## **1.5 Alcance**

El alcance de este proyecto de grado incluye el desarrollo de una herramienta que permita estimar el aporte al cambio climático de proyectos inmobiliarios en la dimensión “aire”, estimando la huella de carbono embebida con base en la recopilación de declaraciones ambientales correspondiente a los proveedores típicos a escala nacional que hacen parte de la cadena de producción y las constantes de emisión asociadas a la producción de materias primas utilizadas en este tipo de proyectos, apoyándonos en la metodología de análisis de ciclo de vida en su fase del análisis de inventario, validando los resultados con el análisis de un estudio de caso concreto en el suroccidente colombiano. El desarrollo de esta herramienta está sujeta a la cantidad de proveedores que cuenten con declaraciones ambientales, a la calidad de la información disponible de los diferentes factores para la estimación y a la complejidad en la cadena de suministro de materiales.

En función del caso de estudio seleccionado se restringe el análisis a los proveedores previamente seleccionados por la compañía dadas las condiciones particulares de negociación y contratación preestablecidas y la disponibilidad de material. También es una limitación el sistema constructivo orientado a la logística de ejecución según la planeación estratégica de recursos (Mano de obra y equipos especiales) de la organización, las condiciones socioeconómicas de los trabajadores de la construcción en el proyecto revisado.

## 2 REVISIÓN BIBLIOGRAFICA

El cambio climático es uno de los grandes problemas actuales de la humanidad y supone una gran amenaza para el medio ambiente y para el desarrollo de la vida en el planeta, ya que afecta a todas las áreas geográficas y a todos los individuos a nivel mundial (Jiménez et al., 2010; Álvarez et al., 2020); es causado por la emisión de GEI, principalmente el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), y el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) (CEPAL, 2013).

En el caso específico de esta revisión sistemática de la literatura sobre herramientas para estimación de huella de carbono, la revisión bibliográfica se enfoca en recopilar y analizar las diferentes metodologías, modelos y herramientas existentes para calcular la huella de carbono de productos en el sector inmobiliario. Este capítulo proporciona una visión panorámica de las principales herramientas disponibles, sus ventajas y limitaciones, así como las tendencias actuales en el campo de la evaluación de la huella de carbono, de acuerdo con los siguientes apartados a) Análisis de ciclo de vida, b) Metodologías de estimación del impacto ambiental, c) Huella de carbono, d) Compensación de CO<sub>2</sub> equivalente, e) Investigaciones relacionadas.

### 2.1 Análisis de ciclo de vida

La creciente conciencia sobre la importancia de la protección ambiental y los posibles impactos asociados con los productos, tanto manufacturados como consumidos, han aumentado el interés por el desarrollo de métodos para comprender mejor y tratar esos impactos. Una de las técnicas desarrolladas en este sentido es el análisis del ciclo de vida (ACV). Este enfoque es fundamental en la evaluación del impacto ambiental de productos y organizaciones a nivel mundial permitiendo identificar puntos críticos y oportunidades de mejora hacia la sostenibilidad. Adicionalmente brinda información precisa para la planificación estratégica, definición de prioridades y evolución de productos o procesos desde el punto de vista medioambiental.

El ACV es una técnica que permite determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto, compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio (ISO 14040, 2006; Muñoz & Quiroz, 2014).

A continuación, se presentan algunas de las definiciones más utilizadas para el ACV:

Según la ISO 14040: “el Análisis de Ciclo de Vida es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados a un producto: compilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema, evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

En España la norma UNE 150-040-96 lo define como: “El Análisis de Ciclo de Vida es una recopilación y evaluación de las entradas y salidas de materia y energía, y de los impactos ambientales potenciales directamente atribuibles a la función del sistema del producto a lo largo de su ciclo de vida”.

Según el consejo nórdico de ministros: “El Análisis de Ciclo de Vida es un proceso para evaluar las cargas ambientales asociadas a un sistema de producción o actividad, identificando y cuantificando las cantidades de materia y energía utilizados, y los residuos generados, y evaluando los impactos ambientales derivados de estos”.

En su forma actual, el ACV constituye una herramienta de gestión ambiental y diseño de procesos menos contaminantes. Ha sido incorporado en el desarrollo de los sistemas de eco etiquetado, en la formulación de guías para el desarrollo de “productos ambientalmente favorables” y en las normas ISO.

- Norma ISO 14040: presenta los principios generales y requerimientos metodológicos del ACV de productos y servicios.
- Norma ISO 14044: Requisitos y directrices para la correcta aplicación del ACV.

El ACV aborda sistemáticamente la interacción entre la actividad humana y el medio ambiente, además considera los potenciales aspectos e impactos en el ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de materia prima, producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta la disposición final, justificando su valor como herramienta.

Por otro lado, el ACV contribuye a la innovación y al diseño de productos más sostenibles, permite identificar oportunidades para reducir el consumo de energía, minimizar los residuos y disminuir el uso de recursos naturales escasos. Esto no solo conduce a productos más ecológicos,

sino que también puede motivar la competitividad de las empresas en un mercado cada vez más enfocado en la sostenibilidad.

Según la ISO 14044 del 2006 el ACV tiene cuatro fases:

- *Definición de objetivo y alcance*
  - El alcance de un ACV, incluyendo los límites del sistema y el nivel de detalle, depende del tema y del uso previsto del estudio. La profundidad y amplitud del ACV puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de un ACV en particular.
- *Análisis de inventario*
  - La fase de análisis del inventario del ciclo de vida (ICV) es la segunda fase del ACV. Es un inventario de los datos de entrada/salida en relación con el sistema bajo estudio. Implica la recopilación de los datos necesarios para cumplir con los objetivos del estudio definido.
- *Evaluación de impacto ambiental*
  - La fase de evaluación del impacto del ciclo de vida (EICV) es la tercera fase del ACV. El objetivo de esta fase es proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del inventario del ciclo de vida (ICV) de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental.
- *Interpretación*
  - La interpretación del ciclo de vida es la fase final del ACV, en la cual se resumen y discuten los resultados del ICV o de la EICV o de ambos como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos.

El ACV es un marco sólido y ampliamente utilizado en la investigación relacionada con la sostenibilidad y la gestión ambiental. Permite una evaluación integral de los impactos ambientales y puede brindar información concisa para tomar decisiones y adoptar estrategias que promuevan la sostenibilidad y la reducción de la huella ecológica de productos y procesos, tales como los asociados a proyectos de construcción.

Al hablar de la evaluación del impacto ambiental que genera cualquier organización, se suele pensar en el término “Huella de Carbono”. El objetivo de ambas herramientas es permitir a las organizaciones cuantificar su impacto climático y medioambiental, sin embargo, existen diferencias entre ambas.

El Análisis de Ciclo de Vida analiza la suma global del impacto sobre el medio ambiente mientras que la Huella de Carbono se centra, únicamente, en cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con un producto, servicio o actividad. Es por ello por lo que podría decirse entonces que la Huella de Carbono es un subconjunto del ACV que se centra en emisiones de gases como el CO<sub>2</sub>, metano (CH<sub>4</sub>) y los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Se expresa, generalmente, en unidades de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>e) y es más simple y específica que el ACV, ya que se centra únicamente en una categoría concreta de impacto ambiental.

Entendiendo que el ACV abarca tres dimensiones para medir el impacto ambiental (Agua, Aire y Suelo), este esfuerzo académico se enfocará, por su alcance, en la dimensión del Aire. Para desarrollar este enfoque se exponen en este documento los factores a tener en cuenta para la estimación del aporte al cambio climático de proyectos inmobiliarios en Colombia.

## **2.2 Metodologías de estimación del impacto ambiental**

Una de las principales preocupaciones a nivel mundial es el cambio climático. Según el IPCC, se requiere una reducción significativa de los GEI, especialmente en países industrializados, para abordar sus impactos. La clave para implementar medidas efectivas de mitigación del cambio climático radica en calcular con precisión las emisiones de GEI (IPCC, 2021).

### **2.2.1 Metodologías de estimación para huella de carbono**

La confiabilidad, comparabilidad, trazabilidad y aplicabilidad de los resultados de la estimación de la huella de CO<sub>2</sub> dependen de la adherencia de la metodología utilizada a estándares internacionales, en los que el alcance y las limitaciones del cálculo de la huella de CO<sub>2</sub> se encuentren claramente establecidos (Pereira & Henao, 2020).

### 2.2.1.1 Greenhouse Gas – GHG Protocol

El Greenhouse Gas Protocol (Protocolo de Gases de Efecto Invernadero) es una herramienta ampliamente reconocida y utilizada para contabilizar y gestionar las emisiones de GEI de las organizaciones, productos y proyectos. Fue desarrollado por el World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD).

El Protocolo consta de tres partes principales: Alcance 1, Alcance 2 y Alcance 3, como se muestra en la Figura 1. Estos alcances representan las diferentes categorías de emisiones que una organización puede generar. El Alcance 1 incluye las emisiones directas de GEI, como la quema de combustibles en instalaciones de propiedad de la organización. El Alcance 2 abarca las emisiones indirectas asociadas con la generación de electricidad, calor o vapor comprados por la organización. El Alcance 3 comprende otras emisiones indirectas, como las provenientes de la cadena de suministro, viajes de negocios y disposición final de residuos.

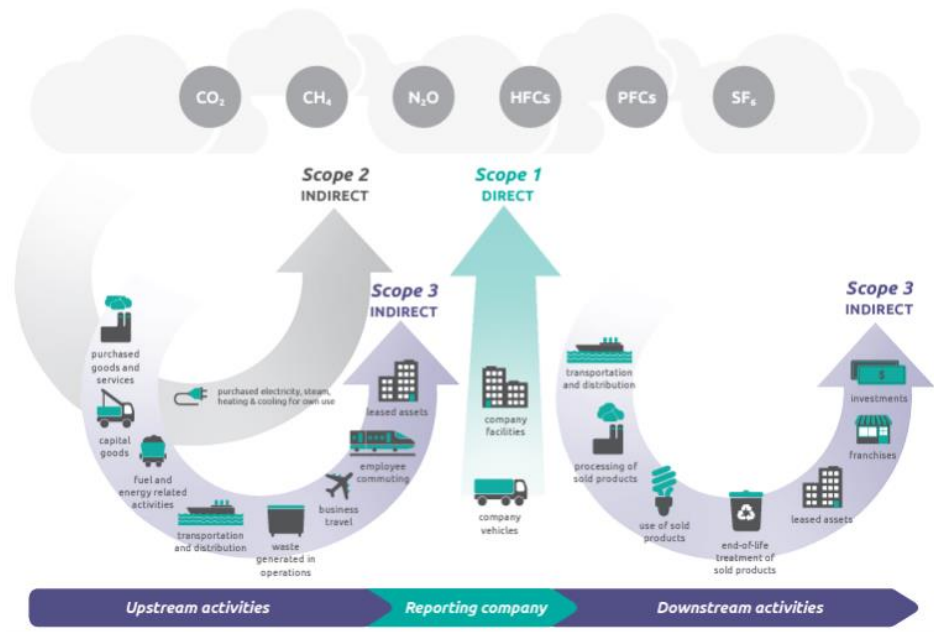


Figura 1 Alcances 1,2 y 3 del Greenhouse gas protocol (GHG, 2010)

### 2.2.1.2 ISO14064

Estándar de verificación basado en el GHG Protocol, que establece los mínimos normativos que se deben considerar para la estimación de la huella de CO<sub>2</sub>; no incluye una guía de buenas prácticas, como el GHG Protocol. Este estándar cuenta con 3 apartados fundamentales:

- ISO 14064-1: Se establece la secuencia de pasos para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero, iniciando por la planeación y alcance del inventario, seguido por la identificación y cálculo de las emisiones, finalizando por la interpretación y reporte de los resultados (World Resources Institute, 2001).
- ISO 14064-2: Establece los requisitos y directrices para la elaboración de un inventario de emisiones de GEI. Define los principios y métodos para identificar, cuantificar y registrar las emisiones de GEI, así como para documentar la metodología utilizada y la precisión de los datos. También incluye directrices para la elaboración de informes sobre las emisiones de GEI, que pueden ser utilizados para la comunicación interna y externa (Romero & Salazar, 2020).
- ISO 14064-3: Determina los requisitos para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero, clasificándolo de la siguiente manera (Spannalge, 2003), Directo: Todas aquellas emisiones derivadas de la combustión de fósiles, Indirectas de energía: Emisiones resultantes de la producción de energía eléctrica que consume la organización o necesarias para desarrollar el producto, Otras indirectas: Aquellas resultantes de diferentes consumos energéticos de las actividades desarrolladas por la organización o el producto (Homologable con el alcance 3 del protocolo GHG) (Spannagle, 2003).

### 2.2.1.3 Bilan Carbon

Estándar francés basado en la ISO 14064 y el GHG Protocol, creado por Jean-Marc Jancovici para la firma consultora Manicore. El Bilan Carbon toma como método de cuantificación de las emisiones de GEI el cálculo a partir de factores de emisión y ofrece una plataforma digital para realizar todo el proceso de estimación de la huella de carbono en organizaciones. Dentro de su programa plantea los mínimos requeridos para la estimación de la huella de CO<sub>2</sub> y se centra en el cálculo de factores de emisión para diferentes actividades (Romero & Salazar, 2020)

Cuenta con una base de datos disponible con información sobre factores de emisión normalizados para Francia, aunque permite hacer modificaciones y ajustes a los factores de emisión registrados. Es aplicable a todas las etapas del ACV y contempla en su alcance las fuentes de energía, transportes, producción de materiales, sistemas y gestión de residuos sólidos. Requiere

licencia para ser implementado, aunque el acceso a la información sobre factores de emisión es libre (World Resources Institute, 2018).

#### 2.2.1.4 PAS 2060:2020

Es un estándar creado por el British Standard Institution, dirigido al cálculo de emisiones en el plano institucional; se centra en brindar herramientas para alcanzar el objetivo de carbono neutro, mediante la cuantificación, reducción y compensación de las emisiones de GEI. La aplicación de este estándar supone el compromiso de la organización, bien sea en lograr su declaración de alcanzar la neutralidad (Romero & Salazar, 2020).

El PAS 2050 recomienda incluir todas las fuentes de emisiones que contribuyan a más del 1% de las emisiones de GEI previstas durante el ciclo de vida de la unidad funcional y, además, incluir al menos el 95% de las emisiones de GEI previstas durante el ciclo de vida de la unidad funcional. Además, cuando se haya determinado menos del 100% de las emisiones de GEI previstas del ciclo de vida, las emisiones evaluadas deberán escalarse para representar el 100% de las emisiones de GEI asociadas a la unidad funcional. En este estudio, bajo esta metodología, todos los procesos generadores de emisiones de GEI han sido incluidos dentro del límite para cumplir con el criterio del 100% (Días & Arroja, 2012).

#### 2.2.2 Factores de emisión de gases de efecto invernadero

Las mediciones directas pueden ser costosas y a veces no se dispone de suficiente información para realizar cálculos precisos. Por ello, se recurre a la metodología de cálculos estequiométricos (Implica determinar las cantidades de GEI producidas a partir de ciertas actividades, utilizando factores de emisión basados en la relación entre la cantidad de GEI emitidos y la actividad que los genera, como la quema de combustibles fósiles), que permite estimar las emisiones de GEI asociadas a diversas actividades mediante el uso de factores de emisión de CO<sub>2</sub> ajustados a nivel local o nacional. Este enfoque es ampliamente utilizado debido a su conveniencia y reconocimiento en estándares internacionales. Sin embargo, la calidad de los resultados depende de la precisión de estos factores, los cuales deberían adaptarse idealmente al contexto específico de cada ciudad o región. (Fundación Natural, 2016) El cálculo de las emisiones de GEI para los materiales según la constante de emisión está dado por la expresión descrita en la Ecuación 1.

$$\text{Emisión GEI} = \gamma \times \beta \quad (1)$$

Dónde:

- $\gamma$ : Es el factor de emisión del material dado en kg o Ton de CO<sub>2</sub> equ. / kg
- $\beta$ : Es la cantidad del material según el análisis realizado en kg.

Los factores de emisión serán determinados de acuerdo con las siguientes fuentes de información presentada en orden jerárquico:

- Declaración ambiental del producto: Es un informe cuantitativo que proporciona información objetiva y verificable sobre los impactos ambientales de un producto a lo largo de su ciclo de vida (Guía ISO 14025).
- Factor de emisión de literatura: Dada la dificultad de obtener declaraciones ambientales de producto confiables, se procederá a consultar en la literatura las contantes de emisión para aquellos materiales objetivo-resultantes del análisis de Pareto.

### **2.3 Huella de carbono**

Durante los últimos años, en el seno de la comunidad profesional del sector de la construcción ha aumentado el interés por conocer y reducir el impacto ambiental provocado por la utilización de determinados materiales en la edificación, con el objetivo de promover una construcción más sostenible y respetuosa con el entorno, utilizando la metodología del Análisis de ciclo de vida (ACV) u otras metodologías para la definición de los impactos ambientales (Méndez & Burgos, 2008).

La huella de carbono es una herramienta crucial en el sector de la construcción debido a su capacidad para medir y evaluar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con la actividad constructiva, permite cuantificar y evaluar el impacto ambiental de las actividades de construcción a lo largo de todo el ciclo de vida de un edificio, desde la extracción de materias primas hasta su demolición. Al conocer las fuentes de emisiones de GEI, las empresas y profesionales de la construcción pueden identificar áreas de mejora para reducir su impacto ambiental y adoptar prácticas más sostenibles. Además, la huella de carbono ayuda a cumplir con

regulaciones y normativas que exigen la medición y reducción de las emisiones de carbono en el sector de la construcción (Pardo, 2022).

La huella de carbono es la medida que cuantifica la cantidad de emisiones de GEI expresadas en equivalentes de CO<sub>2</sub> que son liberadas a la atmosfera como resultado de las intervenciones humanas, esta cuantificación comprende todas las actividades del proceso que describe el ciclo de vida de un producto, iniciando por las materias primas hasta el desecho final como residuo (Vigilizzo, 2010).

La investigación de emisiones de gases de efecto invernadero se realiza a en diferentes escalas (global, nacional e industrial). No obstante, es factible obtener una estimación aproximada de las emisiones de GEI asociadas a un producto o servicio, así como a los distintos procesos o etapas involucradas en su creación.

El efecto invernadero se define como el proceso natural por el cual ciertos gases en la atmósfera retienen el calor del sol y evitan que este se disipe hacia el espacio exterior. Estos gases de efecto invernadero (GEI), incluyen el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), el óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y otros (ONU, 1992), cuyas equivalencias en CO<sub>2</sub> equivalente se encuentran en la Tabla 1.

*Tabla 1 Potencial de calentamiento global (Durkee, 2006)*

<b>Gas de efecto invernadero</b>	<b>Fórmula química</b>	<b>Global warming potencial (GWP en 100 años)</b>
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	28
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	265
Fluoro carbonos	HFC	4-12400
Perfluorocarbonos PFC	PFC	6630-23500
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	23500

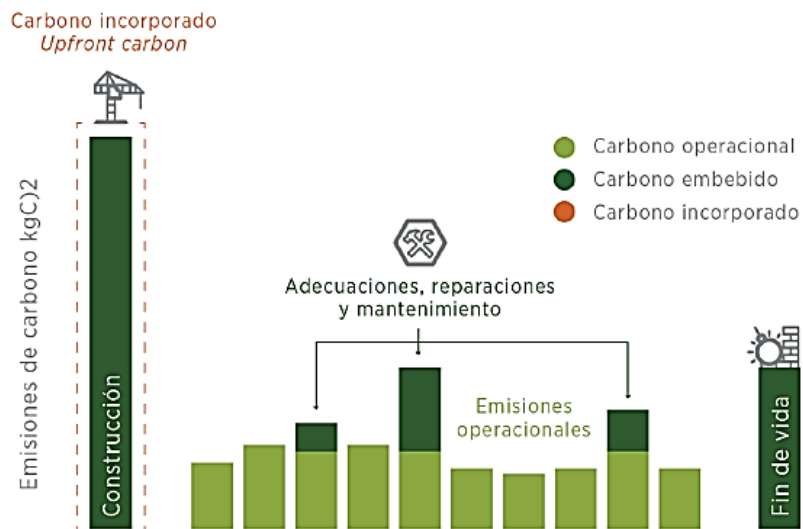
El CO<sub>2</sub> es el gas que más perjudica el equilibrio de radiación del planeta, este se produce de forma natural y también como subproductos de la combustión de la biomasa y procesos industriales que hacen uso de recursos naturales. De acuerdo con el IPCC, este gas sirve como referencia para medir otros gases efecto invernadero (Ham, 2000).

El efecto invernadero es esencial para mantener la temperatura de la tierra en un nivel adecuado para la vida, puesto que, sin él, el planeta sería demasiado frío. Sin embargo, la actividad humana, como la quema de combustibles fósiles y la deforestación, ha aumentado la concentración

de estos gases en la atmósfera, lo que provoca un aumento adicional del efecto invernadero, lo que lleva al calentamiento global y el cambio climático. La CMNUCC se estableció para abordar estos problemas y mitigar los impactos del cambio climático (ONU, 1992).

El concepto de huella de carbono se originó en 2003 como un derivado de la huella ecológica, cuya definición se atribuye a Wackernagel y Rees en 1996. Esta métrica se utiliza como un indicador crucial para la medición de las GEI, expresadas en kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalente (kg CO<sub>2</sub> eq), (Espíndola y Valderrama, 2017).

La huella de carbono de un producto se divide en dos momentos clave, el primero se relaciona con el carbono incorporado el cual, abarca todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) generadas durante la fase de construcción o fabricación del producto. El segundo se refiere al carbono operacional, es decir, todas aquellas emisiones generadas durante la operación del producto final o aquellas que se generen por remodelaciones y adecuaciones en la vida útil del producto. En la Figura 2 se observa la distribución de estas emisiones mediante un análisis de vida completo. (CCCS, 2021).



*Figura 2 Interacción entre el carbono operacional, embebido e incorporado a lo largo del ciclo de vida de la edificación (CCCS, 2021).*

En este orden de ideas, las emisiones incorporadas se dividen en dos categorías: las iniciales, que comprenden la energía (carbono) consumida durante la fase de construcción de la edificación, y las recurrentes, que incluyen la energía utilizada (y las emisiones de carbono correspondientes) para su mantenimiento y reparación a lo largo del tiempo.

Las principales actividades que inciden en las emisiones de GEI durante su operación, son las relacionadas con el transporte, la generación de residuos y los consumos energéticos requeridos durante el trabajo de oficina y el desarrollo de las obras de construcción. Las actividades asociadas a los procesos constructivos están ligadas a la preparación del terreno, los movimientos de tierra, la ejecución de las cimentaciones y estructura, la instalación de elementos de fachada, cubierta y obra blanca, los procesos de demolición, la gestión de RCD, la operación de los campamentos de las obras y el transporte de materiales, entre otros. (CCCS, 2023).

## **2.4 Compensación de CO<sub>2</sub> equivalente**

La compensación de CO<sub>2</sub> equivalente es un proceso mediante el cual se busca contrarrestar las emisiones de GEI liberados a la atmósfera por actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva, entre otros. En otras palabras, la compensación de CO<sub>2</sub> consiste en pagar a otros para que reduzcan o eliminen sus emisiones con el fin de compensar las propias, porque les resulta más barato o fácil hacerlo (Foro económico mundial, 2022).

Compensar una tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente emitida a la atmósfera se puede llevar a cabo mediante un aporte económico proporcional a la emisión generada a través del pago de impuestos o bien, a través de un proyecto que evite o capture la misma cantidad de CO<sub>2</sub>, presente en los mercados de carbono.

En los mercados de carbono se compran y venden unidades de carbono (por ejemplo, cupos transables de emisión o unidades de reducciones o remociones de GEI). Estos mercados han sido establecidos con el objetivo de reducir las emisiones de GEI y permiten su intercambio entre entidades o jurisdicciones. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

Esta práctica tuvo una década turbulenta. Su reputación se desplomó en 2011-13 -junto con los precios antes de protagonizar una semi recuperación a partir de 2019, sin embargo, sigue habiendo serias preocupaciones. Una de las críticas es que los datos subyacentes, relativos al verdadero impacto de un proyecto de compensación, no son fiables. Otra es que la compensación se ve a veces como una tarjeta de "salida de la cárcel" para las empresas. Por estas y otras razones, el papel de la compensación de carbono en la lucha contra el cambio climático sigue siendo limitado (Foro económico mundial, 2020).

Dependiendo de si los participantes adquieren estas unidades de carbono para cumplir una obligación legal o de manera voluntaria, los mercados pueden clasificarse como regulados o voluntarios.

Los mercados regulados o de cumplimiento se crean para dar cumplimiento a metas obligatorias de reducción de emisiones a nivel internacional, regional, nacional y/o subnacional. Dentro de los cuales podemos encontrar los mercados creados bajo el Protocolo de Kioto que se podrán cumplir a partir de dos mecanismos: (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022)

- Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL): permitía a los países desarrollados acreditar reducciones de proyectos realizados en países en desarrollo.
- Mecanismo de Implementación conjunta (JI, por sus siglas en inglés): permitía a los países acreditar reducciones de proyectos en otros países industrializados.

El Acuerdo de París plantea de forma general, mediante su artículo 6, dos mecanismos cooperativos que crean dos nuevos mercados de carbono:

- Artículo 6.2: Marco de cooperación que permite la transferencia internacional de resultados de mitigación entre países.
- Artículo 6.4: Mecanismo administrado por la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) para comerciar unidades de carbono derivadas de proyectos específicos.

Para los Sistemas de Comercio de Emisiones (SCE), los gobiernos establecen un límite máximo, sobre las emisiones de GEI que uno o más sectores de la economía pueden generar. Las empresas reguladas deberán tener derechos de emisión para respaldar sus emisiones de GEI. Estos sistemas son uno de los instrumentos de precios al carbono que los países alrededor del mundo están implementando para dar cumplimiento a sus compromisos frente al Acuerdo de París. En el caso del sistema de reducción de emisiones, al ser un SCE, se crea un mercado regulado de carbono porque las empresas cubiertas tienen la obligación de respaldar cada tonelada de GEI que emitan. Bajo este mercado, si las empresas no cumplen podrían ser sancionadas con multas. El objetivo del Sistema es contribuir con el cumplimiento de la meta de reducciones de Colombia, establecida en el marco del Acuerdo de París (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2022).

Para que una iniciativa de mitigación pueda certificar sus reducciones o absorciones debe demostrar su integridad ambiental, es decir, debe garantizar que, si se declara una tonelada de reducción de emisiones, éstas deben haberse reducido en una tonelada. Las reducciones o absorciones de emisiones deben ser: (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2022).

- **Adicionales:** generan un beneficio neto a la atmósfera respecto a su línea base. Además, las reducciones no hubieran ocurrido en ausencia de la iniciativa que genera los créditos.
- **Reales:** haber ocurrido y provenir de una iniciativa existente.
- **Cuantificables:** pueden ser medidas de manera precisa y confiable.
- **Verificables:** por lo que deben disponer de datos en cantidad y calidad suficientes para demostrar el cumplimiento de la normativa nacional y de los requisitos del estándar de carbono. La verificación la realiza un tercero (organismo independiente del estándar y del titular de la iniciativa).
- **Permanentes:** no deben ser reversibles ni tener una duración o efecto limitado en el tiempo.

Como parte de los instrumentos económicos para dar cumplimiento a la Política Nacional de Cambio Climático, Colombia estableció un impuesto al carbono a través de la Ley 1819 de 2016. El impuesto instaura una tarifa fija sobre el contenido de carbono de los combustibles fósiles. Como un instrumento complementario al impuesto y con el objetivo de incentivar la implementación de iniciativas de mitigación que generen reducciones de emisiones o remociones de GEI, se consolida en el decreto 926 de 2017, la No Causación del Impuesto Nacional al Carbono. Esta no causación significa que el impuesto no es cobrado a las entidades que certifiquen ser carbono neutro, es decir que neutralizan las emisiones de GEI generadas por el uso de los combustibles fósiles. (Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, 2022).

Un claro ejemplo de este tipo de proyectos es la red de reducción de emisiones por deforestación y la degradación forestal (REED+), el cual el estudio adelantado por West et al (2020) destaca la importancia de establecer con precisión las líneas de base para los créditos de carbono en los proyectos REDD+. Utilizar tendencias históricas como líneas de base puede llevar a sobreestimar los créditos de carbono cuando las tasas de deforestación han disminuido significativamente debido a factores externos. Las políticas futuras deberían considerar

metodologías más sólidas, como el método de control sintético, para establecer líneas de base precisas .

Además, el estudio indica que el bajo rendimiento de algunos proyectos REDD+ puede atribuirse a un diseño ineficaz del proyecto, a problemas de ejecución o a la escasez de ingresos. Los responsables políticos deben centrarse en apoyar proyectos bien diseñados que reduzcan eficazmente la deforestación, aborden los problemas de ejecución sobre el terreno y garanticen una financiación suficiente para las actividades de los proyectos.

Otras de las estrategias de compensación son los bonos de carbono, la investigación adelantada por Grau (2022), menciona que los bonos por compensaciones de emisiones de CO<sub>2</sub> desempeñan un papel crucial en la descarbonización al permitir a las organizaciones compensar sus emisiones de gases de efecto invernadero invirtiendo en proyectos de reducción de emisiones en otros lugares.

La contribución de los bonos de carbono se ve reflejado en la contribución a la mitigación del cambio climático fomentando la inversión en proyectos de energías renovables, eficiencia energética y reforestación. Además ayuda a las empresas a cumplir sus compromisos de reducción de emisiones, especialmente aquellas que no pueden reducir sus emisiones internamente de manera efectiva, de igual manera promueven la cooperación internacional en la lucha contra el cambio climático al permitir la transferencia de tecnología y conocimientos entre países.

En el análisis de los bonos de carbono, el régimen tributario de cada país juega un papel fundamental en este escenario, dónde la inclusión incentivos fiscales fomenta la adopción de tecnologías limpias y la reducción de emisiones de GEI. Por ejemplo, exenciones fiscales para empresas que invierten en energías renovables. Por otro lado, la imposición de impuestos sobre las emisiones de GEI puede ser una herramienta efectiva para desincentivar la contaminación y fomentar la reducción de emisiones, estos impuestos ayudan a internalizar los costos ambientales y promover prácticas más sostenibles (Grau, 2022).

De esta manera, la compensación de CO<sub>2</sub> equivalente es fundamental para lograr la neutralidad en emisiones de gases de efecto invernadero, impulsado a través de la innovación tecnológica y la adopción de prácticas sostenibles en diversos sectores. Esto incluye el desarrollo de tecnologías más limpias, procesos industriales más eficientes y sistemas de gestión de residuos más efectivos.

Al fomentar la inversión en proyectos de mitigación de carbono, las compensaciones contribuyen a acelerar la transición hacia una economía menos dependiente de los combustibles fósiles y más orientada hacia fuentes de energía limpias y renovables. Esto es fundamental para abordar el cambio climático y cumplir con los objetivos del Acuerdo de París de limitar el calentamiento global a menos de 2°C hacia el 2030.

## **2.5 Política pública**

En Colombia, el gobierno y los gobiernos locales han desarrollado un marco normativo y de incentivos tributarios para fomentar la construcción sostenible. Estas políticas buscan promover prácticas constructivas que minimicen el impacto ambiental, mejoren la eficiencia energética y reduzcan el uso de recursos naturales.

### **2.5.1 Ley 1715 de 2014**

La Ley 1715 de 2014, conocida como la Ley de Energías Renovables, fue promulgada en Colombia con el objetivo de integrar las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional y promover la eficiencia energética. Esta ley establece una serie de incentivos tributarios y beneficios financieros para fomentar la inversión en tecnologías limpias y sostenibles. Entre los incentivos más destacados se encuentra la deducción del 50% del valor de las inversiones realizadas en proyectos de eficiencia energética y energías renovables del impuesto sobre la renta, la exención del Impuesto sobre el Valor Agregado (IVA) para equipos y materiales relacionados, y la depreciación acelerada de activos utilizados en dichos proyectos. Estos incentivos buscan no solo estimular la adopción de energías renovables, sino también reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y promover un desarrollo económico más sostenible (Congreso de Colombia, 2014).

Además de los incentivos fiscales, la Ley 1715 de 2014 también contempla la creación de un Fondo de Energías No Convencionales y Gestión Eficiente de la Energía (FENOGE), que financia proyectos y programas relacionados con energías renovables y eficiencia energética. Este fondo apoya tanto a entidades públicas como privadas en la implementación de tecnologías limpias y en la gestión eficiente de la energía. La ley también establece un marco regulatorio para facilitar la conexión de proyectos de generación de energía renovable al sistema interconectado nacional, promoviendo la diversificación de la matriz energética de Colombia. En conjunto, estas medidas

refuerzan el compromiso del país con la sostenibilidad y la transición hacia una economía baja en carbono (Congreso de Colombia, 2014).

### 2.5.2 Resolución 0549 de 2015

La Resolución 0549 de 2015, emitida por el Ministerio de Minas y Energía de Colombia, establece requisitos de eficiencia energética para las edificaciones nuevas en el país, con el objetivo de promover el uso racional y eficiente de la energía. Esta normativa es aplicable a todas las nuevas construcciones, incluidas viviendas, edificios comerciales e industriales. Entre los aspectos más destacados se encuentran la orientación del edificio y la calidad de los materiales de la envolvente térmica, así como estrategias de ventilación natural y el uso de luminarias eficientes que maximicen la luz natural. (Ministerio de minas y energía, 2015)

Los sistemas de climatización también son un foco importante de la resolución, que exige la instalación de equipos de alta eficiencia energética y el mantenimiento adecuado para garantizar su rendimiento a largo plazo. Además, se fomenta la integración de energías renovables, como paneles solares, en el diseño y operación de las edificaciones. Estos requisitos buscan reducir el consumo energético, disminuir los costos operativos y mejorar el confort térmico y lumínico de los ocupantes.

La implementación de la Resolución 0549 incluye procedimientos de certificación y verificación del cumplimiento de los requisitos, además de programas de formación para profesionales del sector. Los beneficios esperados son significativos: reducción de los costos energéticos, mejora del confort en las edificaciones y un impacto ambiental positivo mediante la disminución de la huella de carbono del sector de la construcción. Esta normativa representa un paso importante hacia un desarrollo más sostenible y responsable con el medio ambiente en Colombia.

### 2.5.3 Acuerdo 0575 de 2023

El Acuerdo 0575 de 2023, adoptado por el Concejo Municipal de Santiago de Cali, establece un marco normativo innovador para promover la construcción sostenible y la eficiencia energética en la ciudad. Este acuerdo tiene como objetivo alinear los esfuerzos locales con las políticas nacionales e internacionales de sostenibilidad, incentivando el uso de materiales de construcción

con bajas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y tecnologías que optimicen el uso de recursos naturales. Además, fomenta el diseño y construcción de edificaciones que minimicen el impacto ambiental, promoviendo prácticas que contribuyan a la mitigación del cambio climático.

De este acuerdo se deriva el Sello de Cali construye sostenible, destinada a reconocer y fomentar las prácticas de construcción sostenible en la ciudad. Este sello tiene como objetivo destacar los proyectos de construcción que cumplen con altos estándares de sostenibilidad y eficiencia energética, incentivando a desarrolladores y constructores a adoptar métodos y materiales que reduzcan el impacto ambiental y promuevan un uso más eficiente de los recursos, el sello cuenta con dos categorías de certificación una aplicable a proyectos inmobiliarios y la otra a proyectos de urbanismo, cada una de estas certificaciones tiene tres tipos de sello bronce, plata y oro, para los cuales se establecen los puntajes mínimos para alcanzar esta certificación (Consejo de Santiago de Cali, 2023).

Para incentivar la adopción de estas prácticas sostenibles, el acuerdo incluye varios beneficios tributarios y financieros. Por ejemplo, ofrece reducciones en impuestos locales para el cliente final, como el impuesto predial en un 5%, 7.5% y 10% según el nivel de certificación alcanzado en el proyecto, y exenciones fiscales como el descuento en el impuesto de delineación urbana aplicable para los constructores en aquellos proyectos que cumplan con los criterios de sostenibilidad establecidos. Facilita el acceso a créditos hipotecarios con tasas de interés preferenciales y subvenciones para proyectos que incorporen tecnologías y prácticas de construcción sostenible. Adicionalmente, se crea un fondo municipal destinado a apoyar la investigación y el desarrollo de tecnologías sostenibles en el sector de la construcción, impulsando la innovación y la adopción de soluciones energéticamente eficientes (Consejo de Santiago de Cali, 2023).

La implementación del Acuerdo 0575 de 2023 implica la creación de un sistema de certificación para proyectos de construcción sostenible, asegurando que se cumplan criterios claros y verificables. Las autoridades municipales estarán a cargo de supervisar y garantizar el cumplimiento de los estándares establecidos, también se contemplan programas de formación para profesionales del sector y campañas de sensibilización para la comunidad, promoviendo la adopción de prácticas sostenibles y el uso eficiente de la energía. En conjunto, estas medidas esperan no solo reducir las emisiones de GEI y el consumo energético en las edificaciones, sino

también mejorar la calidad de vida de los ciudadanos, posicionando a Santiago de Cali como una ciudad comprometida con la sostenibilidad y la lucha contra el cambio climático.

## **2.6 Investigaciones relacionadas**

En la revisión de trabajos realizados anteriormente hay casos relacionados en los que se aborda el análisis del ciclo de vida estudiando diferentes contextos según la necesidad que ha dado lugar a su investigación y la profundidad de su alcance.

Para poder tomar decisiones que disminuyan el impacto ambiental causado por la construcción, este debe ser cuantificado desde la etapa de diseño por lo que es necesario contar con herramientas sencillas de implementar (Freire & Marrero, 2015).

Entre los casos más similares encontramos el trabajo realizado por Al-Omari et. al. (2003) quienes implementaron la modalidad de estudio de casos para realizar un análisis de ciclo de vida de estructuras de concreto seleccionadas en Jordania. Su investigación pone en evidencia que la etapa operacional de las diferentes estructuras de concreto que analizaron es la que presenta mayor contribución en las emisiones de carbono.

En este trabajo concluyen que, si se hace una evaluación profunda del carbono embebido en estas estructuras y de cómo interactúan con el ecosistema circundante, podría llegar a conseguirse una reducción significativa en las emisiones de carbono, en el deterioro ambiental y sus consecuencias.

Por su parte, Chen et. al. (2022), en una de las investigaciones más actuales, evalúan el consumo de energía y las emisiones de carbono asociadas a los diez materiales de construcción más utilizados en China por año. Su objetivo es identificar oportunidades para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en la industria de la construcción a gran escala. Sus resultados revelan que el cemento, el acero y el ladrillo representan más del 70% del uso total de energía y de las emisiones de carbono de todos los materiales de construcción. Además, encuentran que las diferencias en el consumo de energía y las emisiones de carbono entre los edificios de acero y hormigón y los de ladrillo y hormigón no son significativas. Sin embargo, hay variaciones sustanciales en el uso de energía y las emisiones de carbono entre las distintas regiones. Las regiones oriental y sudoriental tienen un mayor consumo de materiales de construcción, un uso de energía y unas emisiones de carbono significativamente mayores que otras regiones. El documento propone varias estrategias

para reducir el consumo de energía y las emisiones de carbono en el sector de la construcción en China.

En el caso de Evangelista et al (2018) propusieron evaluar y medir el desempeño ambiental de cuatro edificios residenciales populares en Brasil con diferentes diseños. Su análisis abarca todo el ciclo de vida de los edificios considerando varios tipos de impactos, tales como, las emisiones de carbono y el consumo de energía.

Sus resultados muestran que la fase operativa, igualmente, tiene la mayor incidencia ambiental, mientras que las cimentaciones, estructuras, mampostería y revestimientos son los elementos constructivos de mayor influencia desde su etapa constructiva. En lo que se refiere a los materiales, el hormigón, la cerámica y el acero tienen el mayor impacto medioambiental.

Otro caso relacionado es el de Aflah et al (2022), en el cual, se realiza un estudio exhaustivo a través del ACV, logrando cuantificar y comparar las emisiones generadas por la construcción de una edificación de madera y otra edificación en acero estructural, y así poder construir un criterio ambientalista para hacer frente a la escasez de madera que generó la pandemia en Nueva Zelanda.

En este caso, se pudo comprobar que el material escogido para la construcción es un factor clave si se tiene en cuenta su ciclo de vida completo. Por ejemplo, el acero goza de un alto nivel de reciclabilidad y esta característica aporta de manera significativa en el carbono que este tipo de viviendas podría compensar.

El desarrollo del proyecto OERCO2, tiene objetivo proporcionar una herramienta fácil de usar y accesible para estimar la huella de carbono de los edificios residenciales. Esta herramienta es crucial para fomentar la concienciación medioambiental y la sostenibilidad en el sector de la construcción, ya que permite a los usuarios no especializados evaluar el impacto medioambiental de sus proyectos de edificación. Además, el énfasis en la influencia de los materiales de construcción sobre la huella de carbono, así como la comparación con otros estudios para validar los resultados, pone de relieve la importancia de tener en cuenta la elección de materiales en las prácticas de construcción sostenible (Guzmán et al, 2018)

En Colombia y Latinoamérica, la investigación adelantada por Villafuerte (2017) identifica diversas metodologías utilizadas para calcular la huella de carbono. Algunas de las metodologías más comunes incluyen el Protocolo GHG y el IPCC 2006. El Protocolo GHG es ampliamente

utilizado para la medición de emisiones de GEI y la elaboración de inventarios de carbono, proporciona directrices detalladas para la cuantificación y reporte de emisiones de GEI, lo que lo convierte en una herramienta fundamental para calcular la huella de carbono de las organizaciones. Por otro lado, el IPCC ha desarrollado metodologías específicas para la estimación de emisiones de GEI, siendo el informe de 2006 una referencia importante. Este informe incluye directrices detalladas para calcular las emisiones de diferentes fuentes, lo que lo convierte en una guía clave para la medición de la huella de carbono.

Siguiendo con el contexto Colombiano, Pardo et al (2022) analiza las fases 1 y 2 del ciclo de vida de la edificación en su estudio, utilizando el software Umberto NXT CO2. Este software es una herramienta especializada en la evaluación de la huella de carbono y la energía incorporada de productos, procesos y sistemas, lo que lo convierte en una opción adecuada para realizar análisis detallados en el sector de la construcción.

Umberto NXT CO2 permite calcular y evaluar las emisiones de GEI y el consumo de energía a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o edificación, lo que incluye desde la extracción de materias primas hasta la fabricación, transporte, construcción y eventual disposición del material.

Estokova et al. (2017) realizaron un análisis de emisiones de GEI en proyectos residenciales netos en Eslovaquia, calculando las emisiones promedio durante un período de 100 años. En este estudio centrado en edificaciones exclusivamente residenciales con un área promedio de 168 m<sup>2</sup>, se encontró que la emisión promedio fue de 36.2 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por metro cuadrado construido. Por otro lado, Roh and Tae (2017) llevaron a cabo un análisis similar en Corea, evaluando proyectos con un área total ejecutada de 87,000 m<sup>2</sup> durante un período de 50 años, y obtuvieron una emisión promedio de 49.4 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por metro cuadrado.

Atmaca (2022) revisó 28 estudios científicos que estimaron la huella de carbono incorporada en proyectos inmobiliarios a nivel global, discriminados por continentes y desarrollados entre 1998 y 2017. Según el análisis, que abarcó investigaciones en América (5 artículos), Asia (7 artículos), Europa (14 artículos) y Oceanía (2 artículos), la emisión promedio de GEI por metro cuadrado construido en edificaciones residenciales se estableció en 43.9 kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

### 3 METODOLOGÍA

#### 3.1 Descripción

La metodología adoptada es resultado de la revisión bibliográfica y la mitigación de riesgos relacionados con el cumplimiento de la reglamentación nacional y la huella de carbono generada por los proyectos típicos de construcción de vivienda en el mercado actual. Adicionalmente, esta metodología está direccionada al cumplimiento de los objetivos planteados para este trabajo de grado, considerando los diferentes tipos de variables para la estimación de la huella de carbono, objetivos evaluados eventualmente en la estimación de huella de carbono más cercana al contexto colombiano, entendiendo las particularidades de los sistemas productivos, de transporte, constructivos y de gestión de residuos que posee el sector de la construcción en Colombia. En la Figura 3 se presenta el resumen metodológico del trabajo a realizar, detallando sus etapas y resultados obtenidos, garantizando la ejecución de cada fase del proyecto.

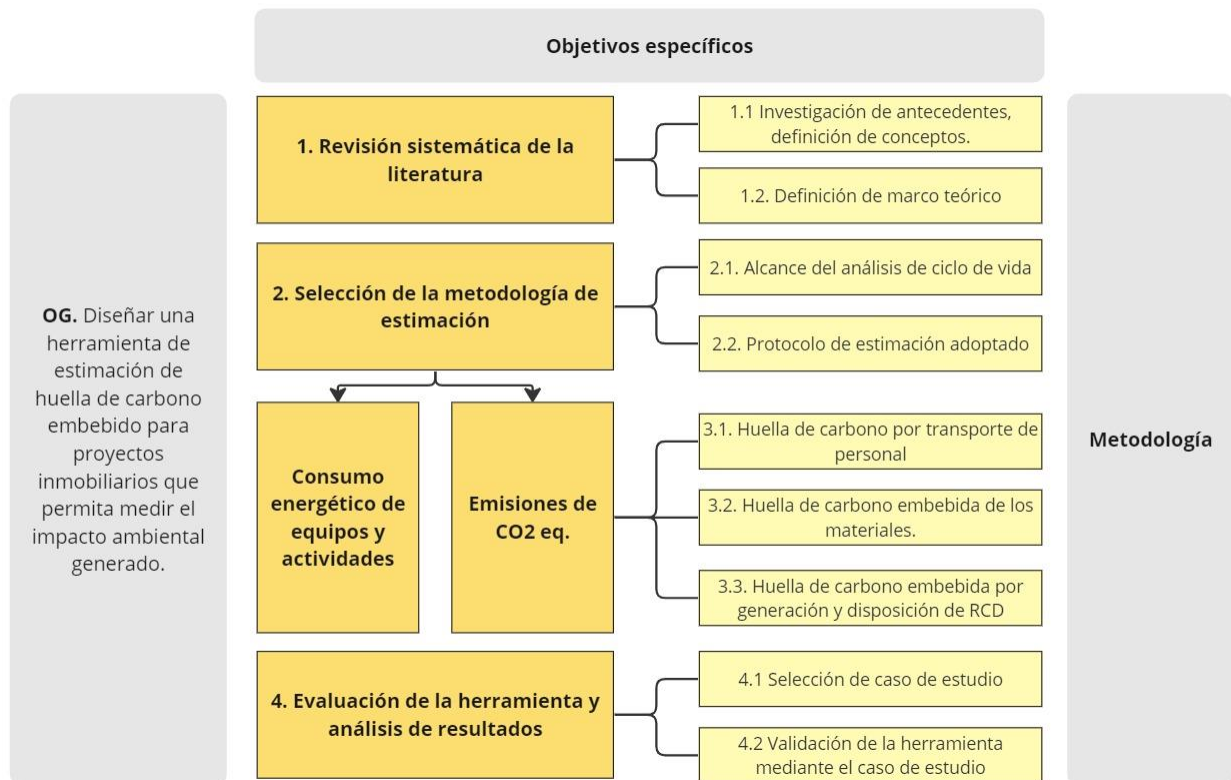


Figura 3 Resumen metodológico a implementar

La metodología descrita en la imagen anterior esboza los pasos requeridos para lograr el objetivo general del proyecto, a partir de la investigación preliminar, la determinación de los lineamientos operacionales de la herramienta, la selección del estudio de caso y el análisis de los resultados obtenidos agrupados en 3 fases.

**Fase 1.** En esta etapa inicial del trabajo de grado, se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para profundizar en la comprensión de conceptos clave, tales como el análisis de ciclo de vida (ACV), el desarrollo sostenible, los objetivos de desarrollo sostenible, la construcción sostenible, la evaluación de huella de carbono (HC) y la estimación de carbono embebido. Estos conceptos son fundamentales para determinar la metodología más adecuada en la estimación de la HC en proyectos inmobiliarios dentro del contexto colombiano.

**Fase 2.** Aquí se establecieron los lineamientos operativos que guían el funcionamiento de la herramienta de estimación adoptando los principios del Protocolo de Gases de Efecto Invernadero (GHG Protocol), siguiendo las pautas identificadas en la revisión bibliográfica. Según las metodologías revisadas para estimar huella de carbono, la estrategia más apropiada en Colombia es la ISO 114064. Para el caso particular de este trabajo de grado, esta normativa se complementa con la guía de descarbonización para las empresas del sector de la construcción emitida por el CCCS. En este estudio, se decide implementar el análisis parcial del ciclo de vida conocido como "De la cuna a la puerta", tomando en cuenta las condiciones de producción y transporte del material desde la fábrica hasta el proyecto de construcción, omitiendo las fases de operación, mantenimiento y deconstrucción de la edificación definiendo el alcance de la investigación. Se utilizaron datos de la revisión sistemática de la literatura, así como declaraciones ambientales de productos, que posibilitaron un enfoque detallado en los procesos productivos de la cadena de suministro de materiales en el país.

Una vez entendida la incidencia de la cadena de suministro de materiales en las emisiones de GEI, se dio paso a la adopción de los demás lineamientos para la estimación de HC con el objetivo de establecer el impacto generado por factores como la energía adquirida para la ejecución del proyecto, el transporte asociado al personal requerido en la obra como lo son los directos y los requeridos por los contratistas y la generación y disposición final de residuos de construcción y demolición con el uso de la herramienta Power Business Intelligence.

**Fase 3.** Para seleccionar el estudio de caso, se tuvo en cuenta la totalidad de proyectos inmobiliarios en ejecución en Constructora Bolívar que presentaran fechas de inicio entre el último semestre del año 2021 y el primer semestre del 2022. Posteriormente se realizó una evaluación cualitativa de cada proyecto para determinar cuál podría tener mayor impacto al ser analizado y cuál posee un mayor alcance. Una vez definido el estudio de caso, se aplica la herramienta de estimación considerando la información recopilada de consumos, proveedores y estrategias de construcción sostenible que se hayan implementado en la construcción del proyecto seleccionado. El estudio de caso cumple con las condiciones de un proyecto inmobiliario típico de la región, cuyos proveedores principales y la mano de obra son de carácter local. En este sentido, el análisis de los resultados brinda insumos importantes para cerrar las brechas existentes en aquellas variables que, dentro del contexto nacional, no se encontró información suficiente.

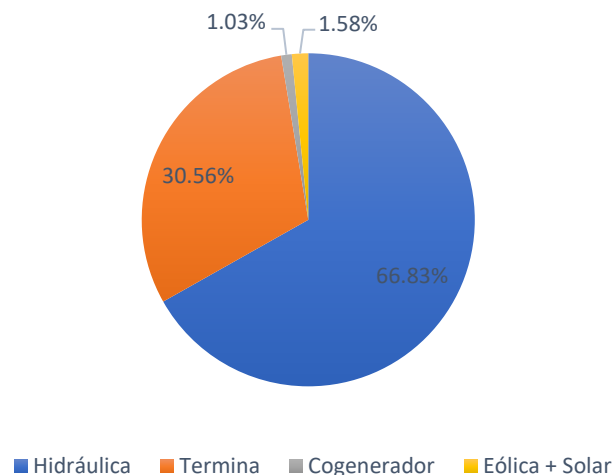
### **3.2 Conformación de base de datos**

Para la construcción de las bases de datos utilizadas en el desarrollo de la herramienta de estimación, se han abarcado múltiples trabajos de investigación en los que se establecieron referencias desde diferentes enfoques como el punto de partida para los análisis propuestos.

#### **3.2.1 Emisiones de GEI para la energía adquirida**

Según el consumo eléctrico del proyecto, se segrega lo correspondiente a las actividades propias del campamento (Oficina de ingenieros, oficina de personal operativo, almacén), equipos de gran envergadura (Torre grúa) y la iluminación del proyecto a partir de la trazabilidad generada por el área encargada a través del pago de facturas mensual.

En Colombia, la capacidad efectiva neta de generación para el 2023 fue de 18.777 MW, de los cuales 66,8% corresponden a energía hidráulica, el 30,5% a energía térmica, 1,1% energía por cogeneración, el 1,48% solar y el 0,1% restante a energía eólica, como se muestra en la Figura 4. Así las cosas, el país cuenta con una de las matrices de generación eléctrica más limpias si lo comparamos con los demás países, esto es, que no se emiten en gran medida gases contaminantes durante su generación (Corficolombiana, 2023).



*Figura 4 Matriz energética para Colombia (UPME, 2024).*

Debido a la conformación de la matriz energética en Colombia; considerando las pérdidas en el transporte del recurso, desde su generación hasta su lugar de destino, conforme a lo establecido en la resolución No. 000762 del 2023 el factor de emisión de GEI es de 0.112 ton CO<sub>2</sub> equ / MWh (Unidad de planeación minero-energética, 2023).

### 3.2.2 Emisiones de GEI para los materiales

De acuerdo con el levantamiento de información bibliográfica para la determinación de factores de emisión (FE) en los materiales arrojados por el análisis de Pareto en el estudio de caso (3.5.1), se identificó el nulo desarrollo de las declaraciones ambientales de producto por parte de los proveedores que abastecieron el proyecto inmobiliario del estudio de caso, dónde de 26 proveedores solo 2 suministraron información sobre las EPD. Debido a lo anterior, se procedió con la consecución de la información de la revisión de literatura internacional, salvaguardando las diferencias de estos sistemas productivos con el de nuestro país y la incertidumbre que conservan estos datos dada su heterogeneidad.

Si se considera la variabilidad de la información recopilada desde fuentes internacionales asociada a los factores de emisión de manera determinística, es requerido introducir la incertidumbre de los datos a partir de un modelo estadístico que permita homogenizar dicha variación. Según la metodología empleada por Otálvaro y Cordão-Neto (2011) se optó por abordar el análisis desde un punto de vista probabilístico acorde con el modelo de “Primer orden, segundo momento”.

### 3.2.2.1 Metodología determinística

La metodología determinística puede proporcionar resultados claros y precisos en situaciones donde las condiciones son bien conocidas y estables, ya que no tiene en cuenta la incertidumbre inherente a muchos procesos y, por lo tanto, puede no ser adecuada en todas las circunstancias (Montgomery, D. C, & Runger, G. C, 2013). La metodología determinista para este trabajo se fundamenta en los siguientes pasos:

- i) Identificación de actividades y materiales que tengan mayor incidencia en el proyecto, a través de un análisis de Pareto.
- ii) De acuerdo con el alcance en el análisis de ciclo de vida, los factores de emisión son considerados de la cuna a la puerta.
- iii) Recopilación de factores de emisión para estos materiales y unificación de unidades de medición para el cálculo. Para construir esta base de datos se abordaron once artículos, tres trabajos de grado relacionados con determinación de huella de carbono, dos EPD nacionales y cuatro informes de sostenibilidad emitidos por proveedores como Argos y Sidoc.
- iv) Identificación de proveedores de los materiales escogidos, teniendo en cuenta el lugar de despacho de estos.

En síntesis, se construyó una base de datos con los FE encontrados para aquellos materiales que según el análisis de Pareto deben considerarse en el análisis por su influencia. Como parte del análisis estadístico de la información, se utilizó la media aritmética como mecanismo para determinar los FE con los cuales la herramienta calcula las emisiones de GEI.

Desde el diseño de la herramienta se contempla la capacidad de identificar los diferentes proveedores que abastecen a cada obra, incluyendo el proyecto seleccionado como estudio de caso. Por tanto, de acuerdo con las EPD emitidas por proveedores como Holcim (Concreto 21 MPa y Concreto 28 MPa) y Gerdau Diaco (Acero), se utilizarán los FE consignados en tales declaraciones de manera determinística para aquellas cantidades de material suscritas a los mismos proveedores. Por otro lado, para aquellos proveedores que no cuentan con EPD, se definieron los FE de acuerdo con la metodología descrita anteriormente.

### 3.2.2.2 Metodología probabilística

Una vez obtenido el valor de los FE de cada material según la metodología determinística, se introdujo la incertidumbre en el cálculo de las emisiones resultantes por los factores calculados a partir de la metodología empleada por Otálvaro y Cordao-Neto (2011), descrita en las siguientes etapas:

- i) Emplear los factores de emisión recopilados en peso ó en términos de (Kg) todas las cantidades por cada uno de los materiales.
- ii) Hallar la mayor cantidad de factores de emisión, según el criterio de: La cuna a la puerta.
- iii) Suponer que estos factores tienen una distribución normal probabilística para calcular los parámetros estadísticos según Burlington, R. S., e May. (1970).

Calculando la media como el promedio a partir de los valores recopilados, empleando la Ecuación 2 para la desviación estándar:

$$\sigma [x_j]: \frac{Max [x_j] - \min [x_j]}{N_s} \quad (2)$$

Donde:

- $\sigma$  : Es la desviación estándar de la variable independiente j.
- $Max [x_j]$ : Es el valor máximo de la variable j.
- $\min [x_j]$ : Es el valor mínimo de la variable j
- $N_s$ : Es un parámetro que escala el número de desviaciones estándar en función del mismo número de datos (ver Tabla 2)

Tabla 2 Valor  $N_s$  en función del número de datos (Burlington y May, 1970)

Número de datos	NS
2	1.128
3	1.693
4	2.059
5	2.326
6	2.534
7	2.704
8	2.847
9	2.970
10	3.079
15	3.472

iv) Agregar la incertidumbre en las ecuaciones 3 y 4 mediante el método de primer orden, segundo momento (FOSM). Método que consiste en aproximar la varianza de la variable independiente mediante el uso de series de Taylor. En caso de variables sin factor de correlación, la media y la varianza de la función independiente se podrían calcular como:

$$E [GEI]: GEI(E[x_1], E[x_2], E[x_3], \dots, E[x_n]) \quad (3)$$

$$\sigma^2 [GEI]: \sum_{j:1}^n \left( \frac{\partial GEI}{\partial x_j} \right)^2 x \sigma^2 [x_j] \quad (4)$$

Donde:

- $E [GEI]$ : Es el valor medio o esperanza de la emisión de CO<sub>2</sub>.
- $E [x_j]$ : Es el valor medio o esperanza de cada variable independiente j que contribuye a la generación (factores de emisión).
- $\sigma^2 [x_j]$ : Es la varianza de cada variable independiente j que contribuye a la generación (factores de emisión).

Cada derivada parcial de la Ecuación 5 se calcula como:

$$\frac{\partial GEI}{\partial x_j} \approx \frac{GEI (E[x_1], E[x_2], E[x_j] + \Delta x_j, \dots, E[x_n]) - E[GEI]}{\Delta x_j} \quad (5)$$

Donde  $\Delta x_j$  es el incremento en el factor de emisión j, calculado como el 10% de la desviación estándar.

- v) Estimar la contribución de cada variable independiente en la varianza separando los términos de la sumatoria en la Ecuación 3.

### 3.2.3 Emisiones de GEI para el transporte de material.

Las emisiones generadas por el transporte de materiales son un componente crucial en la estimación del carbono embebido porque contribuyen significativamente a la huella de carbono total, especialmente si los materiales se transportan largas distancias o se utilizan medios con alta intensidad de carbono, como camiones o aviones. Evaluar estas emisiones es esencial para contabilizar todas las etapas del ciclo de vida de un producto, desde la extracción de materias primas hasta su desecho final.

Según la conformación de la base de datos de los proveedores que abastecen los materiales en cada proyecto, la Ecuación 6 describe el cálculo para el aporte de GEI por el transporte de material.

$$GEI_{TM} = DR \times Consumo_{prom} \times C.E_{Gasolina} \quad (6)$$

Donde:

- i) DR: Distancia recorrida en km desde el punto de origen del despacho hasta el punto de entrega.
- ii) Consumo<sub>prom</sub>: De acuerdo con la información entregada por el proveedor sobre qué vehículo realiza el recorrido, se determina el consumo específico de combustible expresado en m<sup>3</sup> / km.
- iii) C.E<sub>Gasolina</sub>: Constante de emisión de la gasolina expresado en kg CO<sub>2</sub> equ / m<sup>3</sup>

La distancia recorrida se calculará por medio de la extensión de Google Maps, denominada *Distance matrix service*, la cual arroja los kilómetros que separan la dirección de origen y la dirección de destino, este servicio se utilizará como insumos en los subcapítulos 3.2.3, 3.2.4.1 y 3.2.4.2, en la Figura 5 se presenta el código de la extensión.

```

1 function calcularDistancias() {
2   const sheet = SpreadsheetApp.getActiveSpreadsheet().getSheetByName('0-D Trabajadores');
3   const range = sheet.getDataRange();
4   const values = range.getValues();
5
6   const apiKey = 'AIzaSyDRpm9pmH5bwjzVtd5amWPBXQUCz928io'; // Reemplaza con tu clave de API real
7
8   for (let i = 1; i < values.length; i++) { // Comenzar en 1 para omitir la fila de encabezado
9     const origen = values[i][4]; // Columna E (índice 4)
10    const destino = values[i][6]; // Columna G (índice 6)
11
12    if (origen && destino) {
13      const url = `https://maps.googleapis.com/maps/api/distancematrix/json?origins=${encodeURIComponent(origen)}&destinations=${encodeURIComponent(destino)}&key=${apiKey}`;
14
15      console.log(url);
16
17      try {
18        const response = UrlFetchApp.fetch(url);
19        const json = JSON.parse(response.getContentText());
20
21        console.log(response);
22
23        if (json.status === 'OK' && json.rows[0].elements[0].status === 'OK') {
24          const distancia = json.rows[0].elements[0].distance.text;
25          sheet.getRange(i + 1, 8).setValue(distancia); // Columna H (índice 8) para la distancia
26        } else {
27          sheet.getRange(i + 1, 8).setValue('Error');
28        }
29      } catch (error) {
30        Logger.log('Error fetching data for row ${i + 1}: ${error}`);
31        sheet.getRange(i + 1, 8).setValue('Error');
32      }
33    }
34  }
35 }

```

*Figura 5 Código de cálculo para distancias entre un punto de origen y un punto destino (Google, 2023)*

### 3.2.4 Emisiones de GEI para el transporte de personal

Para estimar el carbono embebido, involucrando las dinámicas socioculturales propias de la construcción y los modos de transporte de los trabajadores del medio, se incluyó en la base de datos que usa la herramienta una medición real de distancias recorridas a diario, transporte usado, metodologías alternativas de movilidad y emisiones de GEI.

Este capítulo se divide en la estimación de GEI para los trabajadores directos de la constructora con el fin de tomar decisiones en búsqueda de la implementación de mecanismos alternativos de movilidad y aquellos trabajadores indirectos para determinar las tipologías de transporte y la ubicación de los trabajadores con el fin de optimizar los recorridos.

#### 3.2.4.1 Personal directo

De acuerdo con las condiciones del personal directo, se toma la información del equipo de obra directamente de la base de datos de la constructora asociada, donde se captura la siguiente información por cada uno de los trabajadores.

- i) Origen: Se toma de la base de datos de la constructora la ciudad y la dirección específica del lugar de residencia de cada trabajador directo, con el fin de calcular los kilómetros recorridos desde su origen hasta el destino.

- ii) Modo de transporte: Se establece una selección de medios de transporte típicos según la caracterización realizada (Automóvil, motocicleta > 125 cc, motocicleta < 125 cc, camioneta, bicicleta, caminando, transporte público, transporte informal)
- iii) Frecuencia de viaje: Número de viajes realizados en la semana, tomando en cuenta los días laborables en el proyecto.
- iv) Inicio y fin del viaje: Fecha de inicio y fin en la que el trabajador directo realizó el viaje durante su permanencia en el proyecto.

#### 3.2.4.2 Personal de contratistas

En función de la caracterización demográfica y socio económica del trabajador de la construcción en el sur occidente colombiano, se genera una encuesta origen – destino (O-D) tomando los parámetros presentados en el subcapítulo 3.2.3.1, en este caso particular del personal de contratistas sólo se toman en consideración los criterios i) Origen y ii) Medio de transporte.

Con respecto a los criterios iii) Frecuencia de viaje y iv) Inicio y fin del viaje, los datos se tomaron de la base de datos del control de acceso biométrico, sistema utilizado en la compañía para registrar la información demográfica del trabajador y el acceso de manera diaria al proyecto.

Analizando la base de datos del control de acceso biométrico se encontró el ingreso promedio diario de 200 trabajadores de contratistas, sin embargo, por la alta rotación de personal, natural para algunas actividades, solamente se logró impactar al 90% del personal, es decir un total de 180 encuestados. Este dato se consideró representativo y, para efectos de la precisión de la estimación, se optó por ignorar el 10% restante ya que no es personal que está presente de manera constante en la obra, sino que rota eventualmente según el desarrollo de sus actividades.

Para el diligenciamiento de la encuesta se contó con la colaboración del personal de seguridad y salud en el trabajo del proyecto, lo que permite tener la trazabilidad completa de las respuestas diligenciadas por los encuestados, así como también el análisis para los medios de transporte y las ciudades que más trabajadores aportan según la ubicación del proyecto, por último, el diseño de la encuesta se llevó a cabo en Google Forms como se puede observar en la Figura 6.

Figura 6 Encuesta O-D aplicada a los trabajadores de contratistas.

Es importante aclarar que una vez el encuestado selecciona la ciudad o municipio en el cual vive, en la segunda parte de la encuesta se diligencia la información del origen (Dirección exacta del lugar de residencia) y medio de transporte (Según la lista desplegable que se determinó en los modos más utilizados) así cómo se muestra en la Figura 7.

Figura 7 Encuesta O-D aplicada a los trabajadores de contratistas.

De acuerdo con la información recopilada de la encuesta, se procede a realizar el cálculo del aporte a las GEI mediante la Ecuación 7.

$$GEI_{TT}: DR \times Consumo_{prom} \times C.E_{Gasolina} \quad (7)$$

Donde:

- i) DR: Distancia recorrida en km desde el punto de origen del despacho hasta el punto de entrega.
- ii) Consumo<sub>prom</sub>: Consumo promedio del combustible utilizado por el vehículo en el que realiza el viaje, expresado en m<sup>3</sup> / km.
- iii) C.E<sub>Gasolina</sub>: Constante de emisión de la gasolina expresado en kg CO<sub>2</sub> equ / m<sup>3</sup>

Las emisiones de GEI por el transporte de trabajadores se independizó para cada uno de ellos, a medida que el trabajador generó un nuevo registro de acceso en la obra se tomó en cuenta como un recorrido más desde el punto de origen suministrado mediante la encuesta, puesto que se espera que la presencia del trabajador sea durante el tiempo de ejecución de su actividad y no durante duración total del proyecto.

### 3.2.5 Emisiones de GEI por maquinaria.

Para la estimación de emisiones correspondientes a la maquinaria utilizada en los diferentes proyectos se consideraron los tipos de maquinaria más comunes en la clasificación de proyectos inmobiliarios de la constructora. Entre ellas se destacan: Motoniveladora, Retroexcavadora de Llanta (Pajarita), Retroexcavadora de oruga y Volquetas. Se utilizó la Ecuación (8) para la estimación de GEI correspondiente al uso de este tipo de equipos dentro de las obras. Por la forma en que opera la constructora del caso de estudio, no se consideraron equipos menores como mezcladoras, vibradores, pulidoras, etc.

$$GEI_{Mq} = \frac{\text{Consumo}_{prom} \times C.E_{Gasolina} \times CM}{RM} \quad (8)$$

Donde:

- i) Consumo<sub>prom</sub>: Consumo promedio del combustible utilizado por el vehículo que realiza la entrega, expresado en m<sup>3</sup> / h.
- ii) C.E<sub>Gasolina</sub>: Constante de emisión de la gasolina expresado en kg CO<sub>2</sub> equ / m<sup>3</sup>
- iii) CM: Cantidad de material en m<sup>3</sup> trabajado en las actividades de movimiento de tierras.
- iv) RM: Rendimiento de la maquina elegida para la actividad en m<sup>3</sup>/h

### 3.2.6 Emisiones de GEI por el aprovechamiento y la disposición de RCD.

En la estimación de GEI para los RCD es válido analizarlo desde dos aristas posibles, la primera de ella es el trasiego del residuo hasta el sitio de disposición final más cercano a la zona de ejecución del proyecto inmobiliario, la segunda, es el aprovechamiento directo del residuo en las actividades que se permita en la obra. En el primer escenario, la estimación de GEI está dada por la Ecuación 9.

$$GEI_{RCD_{SDF}}: \frac{Distancia_{SDF} \times Consumo_{prom} \times C.E_{Gasolina} \times Volumen_{material}}{Rendimiento_{vol}} \quad (9)$$

Donde:

- i) Distancia<sub>SDF</sub>: Distancia en km por viaje desde el lugar de ejecución hasta el sitio de disposición final, expresado en km x viaje
- ii) Rendimiento<sub>vol</sub>: Se trabaja como una constante de 8 m<sup>3</sup> x viaje
- iii) Consumo<sub>prom</sub>: Consumo promedio del combustible utilizado por la volqueta en m<sup>3</sup>/ km.
- iv) C.E<sub>Gasolina</sub>: Constante de emisión de la gasolina expresado en kg CO<sub>2</sub> equ / m<sup>3</sup>
- v) Volumen<sub>material</sub>: Cantidad de RCD aprovechado en las actividades expresado en m<sup>3</sup>

De acuerdo con las condiciones de aprovechamiento directo de RCD en las actividades de movimiento de tierra dentro del proyecto y tomando en cuenta que en la etapa de generación del residuo se considera dentro del consumo de los materiales (Consumo teórico + desperdicio), para el segundo escenario las GEI por aprovechamiento de RCD se calcula mediante la Ecuación 10

$$GEI_{RCD}: \frac{Consumo_{prom} \times C.E_{Gasolina} \times Volumen_{material}}{Rendimiento_{maq}} \quad (10)$$

Donde:

- i) Rendimiento<sub>maq</sub>: Tasa de trabajo para el material, expresada en m<sup>3</sup>/h.
- ii) Consumo<sub>prom</sub>: Consumo promedio del combustible utilizado por la maquina expresado en m<sup>3</sup> / h.
- iii) C.E<sub>Gasolina</sub>: Constante de emisión de la gasolina expresado en kg CO<sub>2</sub> equ / m<sup>3</sup>
- iv) Volumen<sub>material</sub>: Cantidad de RCD aprovechado en las actividades expresado en m<sup>3</sup>

### 3.3 Diseño de herramienta de cálculo

La herramienta de estimación diseñada se rige al cálculo de la huella de carbono desde los 3 alcances mencionados anteriormente en el presente documento. Con la ayuda de la guía de descarbonización para las empresas del sector de la construcción (CCCS, 2023), los actores de la cadena de valor de la construcción de edificios interesados en medir la huella de carbono y definir un plan en el corto, mediano y largo plazo, podrán establecer claramente sus límites organizacionales y operacionales.

Por otro lado, aquellas compañías que tengan dentro de sus políticas el carácter de sostenibilidad podrán tener la facultad de tomar decisiones relacionadas con las metas y ambiciones específicas de la organización, tanto desde las responsabilidades directas asociadas a los alcances para cada categoría de empresa, como en articulación con las metas y acciones definidas en la Hoja de Ruta Nacional de Edificaciones Neto Cero Carbono (RNENCC) (CCCS, 2023). En la Tabla 3 se muestran las fuentes de emisión y los indicadores para cada uno de los alcances planteados en el diseño de la herramienta.

*Tabla 3 Descripción de los alcances y fuentes emisión para la estimación de carbono embbebido (CCCS, 2023).*

<b>Alcance</b>	<b>Fuente de emisión</b>	<b>Indicador</b>
1	Combustión por vehículos y maquinaria propios	m <sup>3</sup> /Km recorrido/ año kg CO2eq/año por tipo de vehículo
	Emisiones fugitivas por refrigerantes, extintores y otros	Kg CO2eq de refrigerante fugado / año
2	Transporte trabajadores directos	Kg CO2eq por transporte de los empleados / año
	Energía adquirida por equipos	Consumo kWh/año
3	Emisiones generadas por subcontratistas	Kg CO2eq emitidas por subcontratista / año
		% de trabajadores usando sistema de transporte masivo / año
	Transporte: Trabajadores en vehículos no propios	% de trabajadores usando transporte alternativo / año
		Ton CO2eq emitidas por transporte/año
	Residuos de construcción y demolición	Ton RCD generados / año % RCD aprovechados en obra / año Kg CO2eq emitidas por generación de RCD/año

Alcance	Fuente de emisión	Indicador
	Emisiones embebidas en materiales y productos	Kg CO <sub>2</sub> eq carbono embebido / año
	Transporte de materiales	Km recorridos en el transporte de insumos por parte de terceros / año Kg CO <sub>2</sub> eq emitidas por transporte / año

La herramienta de estimación se diseñó en el ambiente de *Power BI*, la cual es una plataforma visual interactiva utilizada para presentar datos y análisis de manera gráfica y dinámica. Los tableros en *Power BI* permiten a los usuarios recopilar, analizar y visualizar datos de diversas fuentes en un solo lugar, facilitando la toma de decisiones informadas a través de gráficos, tablas y otros elementos visuales.

*Power BI* ofrece numerosas ventajas que la convierten en una ayuda contundente para el análisis y visualización de datos. Su capacidad de conectividad permite la integración en tiempo real con diversas fuentes de datos, asegurando que la información esté siempre actualizada. Además, su interfaz interactiva permite a los usuarios explorar los datos de manera dinámica, filtrando y profundizando en la información según sea necesario. *Power BI* maneja eficientemente grandes volúmenes de datos, superando las limitaciones de herramientas como Excel. Sus opciones avanzadas de visualización y análisis facilitan la identificación de patrones y tendencias, mientras que la posibilidad de automatizar informes y actualizaciones ahorra tiempo y reduce errores. Por último, *Power BI* mejora la colaboración dentro de las organizaciones mediante la compartición fácil y segura de tableros y reportes, permitiendo una toma de decisiones más informada y oportuna.

El tablero de *Power BI*, consta de 3 páginas dónde se observa información en diferentes niveles de la estimación de carbono embebido y del proyecto, en función de los alcances e indicadores descritos en la Tabla 3, las páginas del tablero contienen la siguiente información

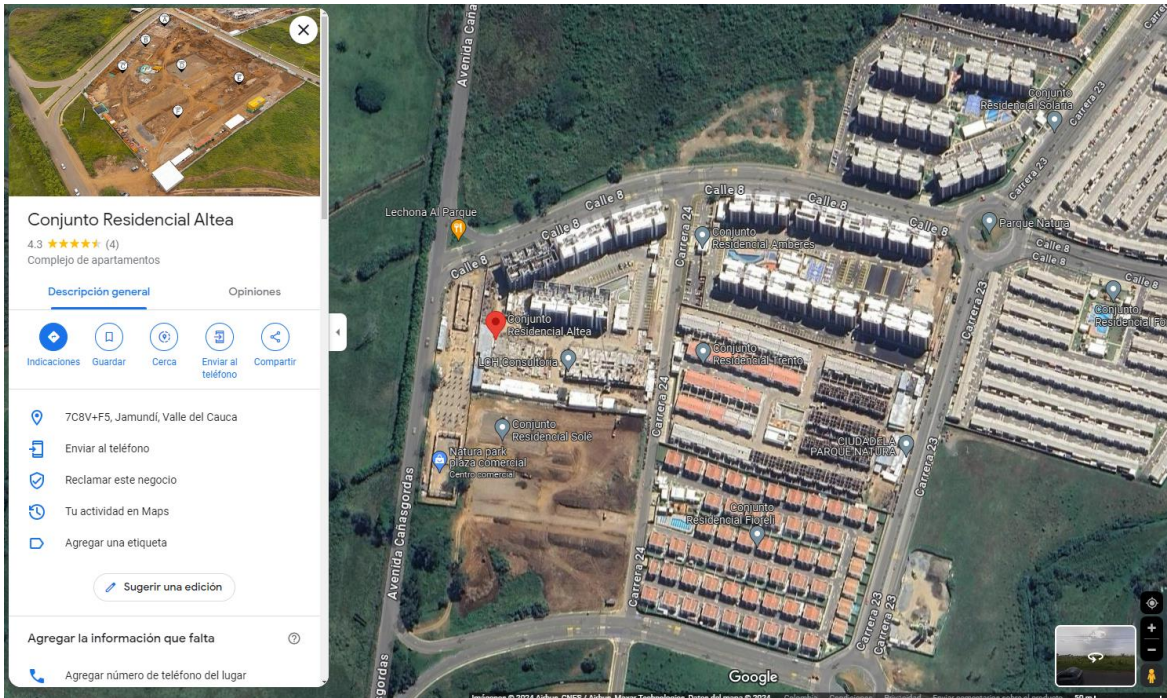
- Página 1: Información general del proyecto, su ubicación, segmentación por zona de influencia, fecha de inicio y fecha potencial de finalización de acuerdo con la programación del proyecto. Se presenta el resultado final de emisiones de GEI junto con el aporte porcentual de cada uno de los alcances en la metodología de estimación, dentro de cada alcance se presentan los indicadores más relevantes en función de la generación y estrategias de mitigación.

- Página 2: Se presenta el detalle del alcance 1 y el alcance 2 de la metodología de estimación adoptada, dónde para cada alcance se presenta el aporte de cada indicador en las emisiones totales. Particularmente para el alcance 2, se presenta el consumo mensual de energía eléctrica del proyecto, junto con los picos de consumo a lo largo de la ejecución y el aporte a las emisiones de GEI que tuvo cada mes.
- Página 3: Se muestra a detalle el alcance 3 en función de cada indicador, específicamente para las emisiones por los materiales se presenta una gráfica de acuerdo con la cantidad presupuestada, proyección y consumida de los materiales considerados en el análisis, así como también, las diferencias positivas o negativas en la generación teoría y real con respecto al consumo de los materiales. En el indicador de transporte de material, se presenta la segmentación de proveedores en función de su distancia con respecto al caso de estudio, así como también la generación para cada uno de ellos y la correspondiente gráfica que permita analizar la generación de GEI de manera mensual por el transporte de material.

Finalmente, se realiza un análisis económico como medida de mitigación del riesgo, alineado con las metas establecidas en la Hoja de RNENCC. Este análisis abarca el proceso de compensación de las emisiones de GEI generadas por el caso de estudio. Para aquellos indicadores con información teórica preliminar, se efectúa un análisis comparativo para mitigar las emisiones en relación con la situación actual del caso de estudio. El cálculo de las compensaciones se abordará desde dos escenarios: el primero, mediante la compensación por especies arbóreas, considerando los pocos factores de captura de CO<sub>2</sub> disponibles; y el segundo, a través de la adquisición de bonos de carbono en el mercado actual.

### **3.4 Estudio de caso**

El proyecto elegido fue “Altea” de Constructora Bolívar Cali, un proyecto inmobiliario de vivienda ubicado en el municipio de Jamundí, Valle del Cauca (3°15'58.2” N -76° 33' 26.9” O), como se observa en la Figura 8.



*Figura 8 Localización del proyecto (Google Maps, 2024)*

Altea es un proyecto de 368 apartamentos distribuido en dos torres de diez apartamentos por piso y cuatro torres de ocho apartamentos por piso, cada una con una altura de seis pisos. Como sistema principal de resistencia sísmica el proyecto contempla muros en concreto vaciados en sitio resistentes a cortante para las seis unidades estructurales de torres.

Adicionalmente el proyecto cuenta con 28,353 m<sup>3</sup> construidos de viviendas, vías, portería, UAR, salón social, piscina de adultos y de niños, gimnasio, zona de juegos y de BBQ. La disposición general se puede visualizar de en la planta urbana presentada en la Figura 9.



*Figura 9 Planta urbana del caso de estudio*

Cada apartamento cuenta con un área construida promedio de 76.25 m<sup>2</sup> (área privada de 70.75 m<sup>2</sup>) y un precio de venta inicial de \$261,900.000 (201.4 SMMLV para el 2024). Este proyecto cuenta con 3 tipologías de acabados lo cual incrementa el precio final del inmueble, estas permiten encontrar diferentes consumos y generación de residuos de materiales utilizados para realizar actividades de acabados.

El caso de estudio cuenta con certificación EDGE tipo “EDGE Certified”, siendo la manera tradicional en la que se puede obtener este reconocimiento: se otorga al cumplir un ahorro de mínimo de 20% en energía, 20% en agua y 20% en energía incorporada en los materiales en el edificio. Puntualmente para Altea, los ahorros estimados en recursos son los siguientes:

- Energía: 30%
- Agua: 20%
- Energía incorporada de los materiales: 20%

Este proyecto cuenta con 2 tipologías de inmueble, dónde su principal diferencia es la distribución del acceso (Izquierdo y Derecho), cada uno de los inmuebles cuenta con su habitación principal, vestier y baño privado, al igual que una alcoba auxiliar, espacio para sala y comedor, baño social, cocina y zona de oficinas. En la Figura 10 se puede observar la planta tipo del inmueble con la distribución y medidas de cada espacio y en la Figura 11 un avance general del proyecto.



Figura 10 Planta de inmueble tipo – Altea (Constructora Bolívar, 2024).



Figura 11 Avance de obra. Enero 2024 (Constructora Bolívar, 2024).

### 3.4.1 Resumen de cantidades de obra ejecutadas

De acuerdo con la segmentación de hitos dentro de la ejecución del proyecto, el caso de estudio tiene la siguiente configuración de áreas y materiales elegidos para su ejecución:

- i) Cimentación: Vigas T invertidas con una altura promedio de 30 cm, se utilizó 866 m<sup>3</sup> de concreto plástico de 3,000 PSI, 90 toneladas de acero recto y figurado. Un contrapiso de 8 cm de espesor, dónde se utilizó 497 m<sup>3</sup> de concreto plástico de 3,000 PSI, 17 toneladas de acero en malla estándar y especial de refuerzo.
- ii) Estructura: Muros y losa fundidos en sitio con espesores entre 8 y 15 cm. Se utilizaron 1,000 m<sup>3</sup> de concreto plástico de 4,000 PSI; además 99.86 ton de acero recto y figurado. Las losas cuentan con un espesor promedio de 10 cm, en las que se dispuso de 958 m<sup>3</sup> de concreto plástico de 3,000 PSI y 46 ton. de acero en malla estándar y especial de refuerzo.
- iii) Mampostería: Muros en fachada, se utilizaron 163,713 unidades de mampostería, 8.8 m<sup>3</sup> de mortero estabilizado a 8 horas y 1.2 Ton de acero de refuerzo entre grafil y varillas.
- iv) Cubierta: Diseño de cubierta convencional con desagüe central y lateral de la cubierta, se utilizaron 394 unidades de tejas UPVC de 2.5 mm con un área promedio de 12.6 m<sup>2</sup>.
- v) Instalaciones: Redes eléctricas, sanitarias, hidráulicas y de gas para cada uno de los inmuebles, así como también los tramos correspondientes al urbanismo.
- vi) Acabados en muro: De acuerdo la tipología de ventas los inmuebles cuentan con acabado en concreto a la vista, estuco y 1 mano de pintura o 3 manos de pintura.
- vii) Carpintería: Carpintería metálica para puertas y ventanas en cada uno de los apartamentos, además, de acuerdo con la tipología de ventas los inmuebles pueden contener carpintería de madera en baños y cocina (Muebles inferiores y superiores).

Dentro del diseño de la herramienta se plantea la conexión directa con la ERP utilizada por la compañía desarrolladora del caso de estudio, en esta se encuentran las cantidades presupuestadas, proyectadas y finalmente consumidas de cada uno de los materiales utilizados en el proyecto. En el Anexo 1 se presenta la discriminación del presupuesto concebido para el estudio de caso en la ERP.

El costo directo del proyecto proyectado al año de finalización es de \$47'022,933,000, sin embargo, debido a los diferentes acontecimientos que han conllevado al aumento en el costo de los materiales, mano de obra y alquiler de equipo, el costo directo actual es de \$52'519,280,010. Es importante aclarar que bajo la proyección del costo directo del proyecto se tenían 46 unidades con el máximo nivel de acabados, situación que finalizó con 109 unidades con esta tipología de venta. A partir de la tipología de vivienda con la que cuenta este proyecto, se realizó un análisis de Pareto donde se obtuvo los materiales a considerar dentro del análisis para la estimación de GEI.

La elección de este proyecto como estudio de caso se debe a su excelente manejo de residuos de construcción y demolición (RCD) dónde durante toda la ejecución lograron el 99.98% de aprovechamiento y una generación de solo 1,867.16 ton según los parámetros establecidos en la Resolución 1257 del 2021 por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Además, la inclusión de materiales alternativos de construcción como la escoria negra en la estructura de las vías a nivel de subbase, este material se utilizó como reemplazo total del material natural utilizado convencionalmente fomentando la simbiosis industrial entre uno de los aliados de la compañía y los proyectos inmobiliarios.

#### 3.4.2 Análisis de Pareto para los materiales

El análisis de Pareto, también conocido como el principio 80/20, es una técnica que permite identificar y priorizar los factores más significativos o los problemas más importantes que afectan a un sistema. Este enfoque se basa en la observación de que, en muchas situaciones, aproximadamente el 80% de los efectos provienen del 20% de las causas (García, 2010).

En esta oportunidad, el análisis de Pareto aplicado para la selección de materiales considerados en la cuantificación de emisiones de GEI implica dos puntos de decisión principales:

- Relevancia en el presupuesto: Este punto implica identificar los materiales de construcción que más influyen en el presupuesto total del proyecto. Esto se determina mediante la asignación de costos a cada material utilizado en la construcción.
- Cantidad de emisiones unitarias generadas por cada material: Se evalúa la cantidad de emisiones de GEI asociadas a la producción, transporte, instalación y disposición final de cada material de manera preliminar con la media aritmética de los factores de

emisión recopilados. Además, se cuantifican las emisiones de CO2 equivalente (CO2e) por unidad de material utilizado. Los materiales que generen más emisiones unitarias se considerarán prioritarios en el análisis incluyendo aquellos que, aunque no tengan factores de emisión altos, puedan generar una cantidad de emisiones significativas dada la cantidad utilizada dentro del tipo de proyecto.

En la Figura 12, se observa el análisis de Pareto realizado para el caso de estudio identificando aquellos materiales que, en conjunto, representan el mayor porcentaje de cantidad y costo dentro de la estructura de costos del proyecto.

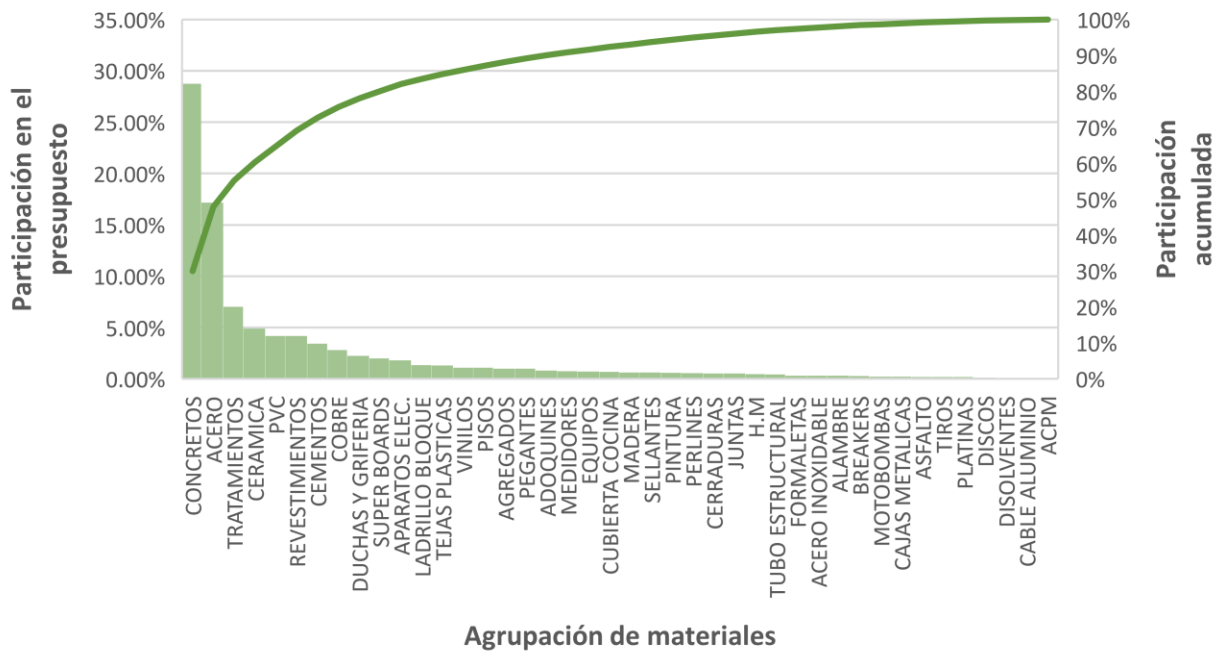


Figura 12 Diagrama de Pareto - Estudio de caso

Una vez identificados los materiales a considerar en el análisis de Pareto para la estimación de GEI, se correlacionan los códigos de los insumos en la ERP y los códigos destinados para cada constante de emisión de los materiales seleccionados. Además, tomando en cuenta la unidad de presentación de materiales como el acero galvanizado y el PVC cuyos elementos son presentados por unidades o longitud de tubería se genera la conversión de unidades con el peso de cada insumo adquirido en el proyecto. En la Tabla 4 se presentan el número de relaciones de insumos que tiene cada uno de los materiales seleccionados por el análisis de Pareto.

*Tabla 4 Relación de materiales - insumos en ERP*

<b>ID</b>	<b>Descripción</b>	<b>N° de insumos relacionados</b>
M1	Cemento	1
M2	Concreto 21 Mpa	5
M3	Concreto 28 Mpa	2
M4	Ladrillo	2
M5	Acero	10
M6	Pintura	4
M7	Cerámica	12
M8	Mortero 1:3	3
M10	Grava	1
M11	Arena	1
M12	Acero galvanizado	38
M13	PVC	107
M14	Teja ecoroof	1
M15	Asfalto	2
M16	Cobre	8
M17	Gasolina	1

El análisis de Pareto permitió seleccionar estratégicamente los materiales a considerar en el análisis de huella de carbono de la herramienta, ya que se consideran sólo aquellos con una incidencia alta y directa en el valor del presupuesto de la obra y que por el volumen de cantidades utilizadas pueden representar un impacto alto en la estimación de carbono embebido en la estimación realizada.

## 4 RESULTADOS

En este capítulo, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos a partir del desarrollo y la implementación de la herramienta para la estimación de la huella de carbono embebido a partir de la información del caso de estudio escogido. La herramienta, desarrollada como un tablero interactivo en *Power BI*, utiliza una serie de bases de datos estructuradas específicamente para capturar y procesar la información relevante. Estos resultados se enfocan en el caso de estudio seleccionado, proporcionando una visión profunda de cómo la herramienta puede ser utilizada para evaluar y gestionar la huella de carbono embebida en diferentes contextos.

### 4.1 Conformación de bases de datos

En este subcapítulo se exponen los resultados logrados en la conformación de las nueve bases de datos creadas como pilar esencial de la herramienta de estimación. Estas consolidan la información específica del caso de estudio, considerando las particularidades del proyecto seleccionado (proveedores, materiales, personal directo e indirecto), cabe destacar que se tuvo que recopilar información inédita en la historia de la compañía para realizar una estimación de la huella de carbono embebido.

#### 4.1.1 Consumo de materiales (ERP)

Según lo expuesto previamente, el cálculo de emisiones de GEI por el uso de materiales en la construcción depende de la cantidad utilizada propiamente dicha. Es por ello por lo que, para el caso de estudio, se incluyó la información de consumo de materiales plasmada en la ERP de control del proyecto.

Un sistema ERP (Enterprise Resource Planning, por sus siglas en inglés) es un software de gestión empresarial que integra y automatiza muchas de las prácticas de negocio asociadas con los aspectos operativos o productivos de una empresa, en el caso particular de la compañía analizada se utiliza la ERP de origen colombiano llamada SINCO, la cual permite realizar integraciones directas con tableros PBI. Para la herramienta desarrollada se generó una conexión directa a la base de datos del caso de estudio extrayendo el valor consumido de los materiales analizados anteriormente, en la Tabla 5 se observan las cantidades consumidas de los materiales de manera

general, el detalle de cada consumo dentro de cada capítulo presupuestal se puede observar en el Anexo 1.

*Tabla 5 Cantidades consumidas de los materiales analizados en el caso de estudio*

<b>ID</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
M1	Cemento	Kg	833,054
M2	Concreto 21 MPa	Kg	6,875,275
M3	Concreto 28 MPa	Kg	2,331,050
M4	Ladrillo	Kg	39,378
M5	Acero	Kg	939,461
M6	Pintura	Kg	62,724
M7	Cerámica	Kg	235,277
M8	Mortero 1:3	Kg	70,280
M9	Grava	Kg	136,459
M10	Arena	Kg	4,802,448
M11	Acero galvanizado	Kg	1,088
M12	PVC	Kg	155,308
M13	Teja ecoroof	Kg	27,817
M14	Asfalto	Kg	615,582
M15	Cobre	Kg	182,367

Una de las bondades propuestas dentro de la herramienta es el poder organizar y discriminar la información importada desde el registro realizado en la ERP durante el desarrollo de la obra. Esta ventaja permitiría mantener control y realizar un seguimiento continuo al comportamiento de la huella de carbono generada dentro de los diferentes proyectos.

#### 4.1.2 Factores de emisión para los materiales

De acuerdo con la metodología utilizada para la obtención de los factores de emisión tenidos en cuenta en los materiales resultantes del análisis de Pareto descrita en el subcapítulo 3.2.2, se presentan los factores de emisión resultantes por el método determinístico en la Tabla 6 y el proceso de investigación en las diferentes bases de datos, artículos de investigación, trabajos de grado y declaraciones ambientales de producto de materiales como el concreto de 21 MPa, concreto de 28 MPa y acero.

Tabla 6 Factores de emisión para materiales según el método determinístico

ID	Descripción	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	F. E
M1	Cemento	0.735 <sup>C</sup>	0.983 <sup>D</sup>	0.68 <sup>F</sup>	0.86 <sup>G</sup>	0.977 <sup>H</sup>			0.847
M2	Concreto 21 MPa	0.123 <sup>B</sup>	0.125 <sup>D</sup>	0.193 <sup>E</sup>	0.1 <sup>F</sup>	0.297 <sup>H</sup>	0.209 <sup>J</sup>		0.175
M3	Concreto 28 MPa	0.212 <sup>E</sup>	0.48 <sup>G</sup>	0.241 <sup>J</sup>					0.311
M4	Ladrillo	0.24 <sup>B</sup>	0.292 <sup>C</sup>	0.233 <sup>D</sup>	0.2 <sup>G</sup>	0.29 <sup>H</sup>	0.24 <sup>J</sup>		0.249
M5	Acero	1.86 <sup>B</sup>	2.38 <sup>C</sup>	2.608 <sup>D</sup>	2.82 <sup>F</sup>	3.15 <sup>G</sup>	2.2 <sup>H</sup>	2.89 <sup>J</sup>	2.558
M6	Pintura	2.91 <sup>B</sup>	2.144 <sup>D</sup>	6.55 <sup>H</sup>	1.23 <sup>J</sup>				3.209
M7	Cerámica	0.78 <sup>B</sup>	1.23 <sup>J</sup>						0.755
M8	Mortero 1:3	0.15 <sup>B</sup>	0.199 <sup>D</sup>	0.15 <sup>F</sup>	0.14 <sup>J</sup>				0.160
M9	Grava	0.002 <sup>C</sup>	0.004 <sup>F</sup>						0.002
M10	Arena	0.003 <sup>C</sup>	0.01 <sup>F</sup>						0.005
M11	Acero galvanizado	2.03 <sup>B</sup>	4.186 <sup>D</sup>						3.108
M12	PVC	2.594 <sup>D</sup>	11.86 <sup>F</sup>	9.74 <sup>H</sup>	2.2 <sup>J</sup>				6.604
M13	Teja ecoroof	2.74 <sup>A</sup>	3.12 <sup>J</sup>						2.740
M14	Asfalto	0.162 <sup>C</sup>	0.073 <sup>J</sup>						0.118
M15	Cobre	9.41 <sup>H</sup>	3.83 <sup>I</sup>	4.95 <sup>J</sup>					6.063

(Vandkunsten, 2019)<sup>A</sup>, (Kumanayake et al, 2018)<sup>B</sup>, (Chen et al, 2022)<sup>C</sup>, (Solis, 2021)<sup>D</sup>, (Holcim, 2023)<sup>E</sup>, (Torres et al, 2014)<sup>F</sup>, (Zhang et al, 2015)<sup>G</sup>, (Luo et al, 2019)<sup>H</sup>, (Craig, 2018)<sup>I</sup>, (CCCS, 2024)<sup>J</sup>

Para cada uno de los 15 materiales resultantes del análisis de Pareto, se consideraron al menos dos factores de emisión provenientes de diferentes fuentes de información, los materiales M2 y M3 cuentan con una declaración ambiental de producto, sin embargo, el proveedor que facilitó la información no abasteció material al caso de estudio, razón por la cual no se tomó en cuenta como un dato determinístico, ahora bien, para el material M5 se utilizó el factor de emisión registrado en la declaración ambiental exclusivamente para la cantidad suministrada por dicho proveedor, sin embargo, este material contó con el abastecimiento de 3 proveedores más a los cuales se aplicó el factor de emisión arrojado por el análisis probabilístico. A continuación, se utilizó la media aritmética como medida estadística para identificar el valor central de estos datos, determinando así el factor de emisión utilizado para calcular las emisiones de estos materiales.

Es importante aclarar, que, debido a la variabilidad en las fuentes de información para estos factores de emisión, se consideró introducir la incertidumbre sobre las emisiones totales calculadas a partir del método de primer orden segundo momento, para ello en la Tabla 7 se observa el cálculo de las emisiones de GEI de acuerdo con los factores de emisión encontrados en la Tabla 6.

Tabla 7 Emisiones de GEI en los materiales seleccionados.

ID	Descripción	Unidad	Cantidad	F.E	Emisión (Ton CO <sub>2</sub> )	$\sigma$	$\sigma^2$
M1	Cemento	Kg	833,054	0.847	705.59	0.691	0.477
M2	Concreto 21 MPa	Kg	6,875,275	0.175	1,199.73	0.258	0.066
M3	Concreto 28 MPa	Kg	2,331,050	0.311	724.95	0.355	0.126
M4	Ladrillo	Kg	39,378	0.249	9.81	0.213	0.045
M5	Acero	Kg	939,461	2.558	2,403.41	2.462	6.062
M6	Pintura	Kg	62,724	3.209	201.25	5.953	35.434
M7	Cerámica	Kg	235,277	0.755	177.63	0.133	0.018
M8	Mortero 1:3	Kg	70,280	0.160	11.22	0.131	0.017
M9	Grava	Kg	136,459	0.003	0.41	0.002	0.0001
M10	Arena	Kg	4,802,448	0.005	25.61	0.008	0.0001
M11	Acero galvanizado	Kg	1,088	3.108	3.38	2.386	5.695
M12	PVC	Kg	155,308	6.604	1,025.58	10.781	116.247
M13	Teja ecoroof	Kg	27,817	2.930	81.51	0.691	0.477
M14	Asfalto	Kg	615,582	0.118	72.33	0.097	0.009
M15	Cobre	Kg	182,367	6.063	1,105.76	7.148	51.090
<b>Total</b>					<b>7,748.21</b>		

En la Tabla 7 se consolida la desviación estándar ( $\sigma$ ) y la varianza ( $\sigma^2$ ) de los factores de emisión asociados en cada material considerado, estos datos se utilizaron en el análisis probabilístico, por lo que, la incertidumbre de los datos se considera dentro del 10% de su desviación estándar, en este orden de ideas, se inicia el proceso de iteración para cada uno de los materiales en función de la incertidumbre asociada. Es válido aclarar que estas cantidades corresponden a la cantidad de material utilizado realmente en obra según el registro de la ERP.

Ahora bien, en la Tabla 8 y en la Tabla 9 se observan las iteraciones realizadas y las emisiones totales de GEI para cada uno de los escenarios.

Tabla 8 Aporte probabilístico de cada variable independiente.

	Cemento	Concr. 21 Mpa	Concr. 28Mpa	Ladrillo	Acero	Pintura	Cerámica
	0.916	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847
	0.175	0.200	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.311	0.311	0.346	0.311	0.311	0.311	0.311
	0.249	0.249	0.249	0.270	0.249	0.249	0.249
	2.558	2.558	2.558	2.558	2.804	2.558	2.558
	3.209	3.209	3.209	3.209	3.209	3.804	3.209
	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755	0.768
	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	3.108	3.108	3.108	3.108	3.108	3.108	3.108
	6.604	6.604	6.604	6.604	6.604	6.604	6.604
	2.930	2.930	2.930	2.930	2.930	2.930	2.930
	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118
	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063
Ton CO <sub>2</sub> equ.	7,805.74	7,925.27	7,830.91	7,749.04	7,979.51	7,785.54	7,751.33
Derivada	105,540,656	36,996,683	206,166,909	339,436,880	30,311,012	12,211,416	544,636,657
Dev (2) *Var	5.31E+15	9.07E+13	5.34E+15	5.23E+15	5.56E+15	5.28E+15	5.23E+15
Varianza	7.43E+16						
Desviación	272,697,940						
COV	34.9%						
Contribución	9%	15%	9%	0.13%	31%	3%	2%

Tabla 9 Aporte probabilístico de cada variable independiente

	<b>Mortero 1:3</b>	<b>Grava</b>	<b>Arena</b>	<b>Acero galv.</b>	<b>PVC</b>	<b>Teja ecoroof</b>	<b>Asfalto</b>	<b>Cobre</b>
	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847	0.847
	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175	0.175
	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311	0.311
	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249	0.249
	2.558	2.558	2.558	2.558	2.558	2.558	2.558	2.558
	3.209	3.209	3.209	3.209	3.209	3.209	3.209	3.209
	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
	0.173	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	0.005	0.005	0.006	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	3.108	3.108	3.108	3.347	3.108	3.108	3.108	3.108
	6.604	6.604	6.604	6.604	7.682	6.604	6.604	6.604
	2.930	2.930	2.930	2.930	2.930	2.999	2.930	2.930
	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.118	0.127	0.118
	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.063	6.778
Ton CO <sub>2</sub> equ.	7,749.13	7,748.24	7,752.17	7,748.46	7,915.66	7,750.18	7,754.19	7,878.56
Derivada	552,080,686	32,473,505,358	8,793,888,636	30,305,294	6,862,587	104,694,598	743,973,301	10,299,7678
Dev (2) *Var	5.23E+15	5.22E+15	5.23E+15	5.23E+15	5.47E+15	5.23E+15	5.23835E+15	5.41992E+15
Varianza								
Desviación								
COV								
Contribución	0.14%	0.01%	0.33%	0.04%	13%	1%	1%	14%

A partir de la incorporación de la incertidumbre en el factor de emisión, se recalcularon las emisiones totales utilizando el factor resultante para cada uno de los materiales, este proceso generó 15 datos de emisión total. Con estos resultados, se aplicaron las Ecuaciones 3, 4 y 5, lo que permitió determinar la contribución de cada material considerando la variabilidad de los datos recopilados en la revisión bibliográfica.

Para comprender la variabilidad de los datos obtenidos, se calculó el coeficiente de variación muestral (CV), el cual permite comparar la variabilidad relativa entre diferentes conjuntos de datos, incluso si las medias de los conjuntos son muy diferentes. Un CV bajo indica que los datos están más concentrados alrededor de la media, lo que sugiere mayor consistencia y menor variabilidad relativa, con un CV de 39% indica que la desviación estándar es el 39% del valor medio del conjunto de datos.

Ahora bien, según la contribución que tuvo cada material en las emisiones totales de GEI y entendiendo el resultado anteriormente descrito, es imperativa la necesidad de contar con las declaraciones ambientales de producto para materiales como el acero (31%), concreto 21 MPa (15%), cobre (14%), PVC (13%) y cemento (9%), dónde su alta contribución se debe por su elevada influencia en el presupuesto de los proyectos inmobiliarios en Colombia. Aunque el peso del PVC, por su naturaleza no lo hace un valor considerable, si se debe tener en cuenta por el alto factor de emisión de este material generado desde el proceso productivo, el análisis detallado de la incidencia de los materiales se expresa en el capítulo 4.2.3 considerando las virtudes de la herramienta diseñada.

Actualmente, persiste la casi inexistencia de declaraciones ambientales de producto o factores de emisión precisos para aquellos materiales que aportan la mayor contribución a la huella de carbono. La falta de información específica produce una estimación inexacta, especialmente cuando se utilizan datos genéricos o estimaciones provenientes de otros países o regiones. Estas estimaciones externas a menudo no consideran la variabilidad de los datos locales, lo que puede llevar a discrepancias significativas. Además, sin un proceso probabilístico adecuado para manejar esta variabilidad, los cálculos pueden no reflejar con precisión las condiciones y prácticas locales, lo que resulta en una evaluación incompleta e imprecisa del impacto ambiental real. Esta situación subraya la necesidad urgente de desarrollar y estandarizar declaraciones ambientales de producto

específicas para diferentes materiales y regiones, asegurando así que las evaluaciones de huella de carbono sean más fiables y representativas de la realidad local.

#### 4.1.3 Consumos y rendimientos de combustible para equipos

A partir del levantamiento de los equipos utilizados en la construcción del caso de estudio, el transporte de materiales por parte de los proveedores, y los medios de transporte utilizados por el personal directo e indirecto de la constructora involucrada, se realizó la clasificación de estos equipos y modos de transporte según el tipo de combustible (fósil y energía) y su respectivo consumo observados en la Tabla 10.

*Tabla 10 Equipos y medios de transporte considerados en el análisis del caso de estudio.*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Tipo de combustible</b>	<b>Unidad</b>	<b>Consumo promedio</b>
E1	Mezcladora	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.00140
E2	Saltafín	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.00048
E3	Minicargador	ACPM	m <sup>3</sup> /h	0.00750
E4	Motobomba	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.00200
E5	Motoniveladora	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.01650
E6	Vibrocompactador	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.01400
E7	Retroexcavadora de llanta	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.01600
E8	Retroexcavadora de oruga	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.01600
E9	Volqueta	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00025
E10	Finisher	Gasolina	m <sup>3</sup> /h	0.08050
E11	Torre grúa	Energía	kw/h	28.0000
E12	Cortadora de ladrillo	Energía	kw/h	4.00000
E13	Bomba sumergible	Energía	kw/h	2.40000
E14	Mixer	Gasolina	l/km	0.00330
E15	Camión	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00038
E16	Automóvil	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00004
E17	Motocicleta < 125 CC	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00025
E18	Motocicleta > 125 CC	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00003
E19	Camioneta	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00075
E20	Bicicleta - Caminando	No aplica	-	0
E21	Transporte público	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00030
E22	Transporte informal	Gasolina	m <sup>3</sup> /km	0.00005

En función de las actividades para las cuales se requieren los equipos en el movimiento de material granular (E1 – E3, E5 – E10) se extrajo de cada ficha técnica los rendimientos de operación para el material trabajado en el caso de estudio, de acuerdo con la información consignada en la ERP se obtuvo el volumen trabajado durante todo el proyecto. En este orden de ideas, en la Tabla 11 se establecen los valores para los equipos considerados.

*Tabla 11 Rendimientos teóricos para los equipos analizados*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Rendimiento</b>
E1	Mezcladora	m <sup>3</sup> /h	0.85
E2	Saltafín	m <sup>3</sup> /h	25.0
E3	Minicargador	m <sup>3</sup> /h	1.00
E5	Motoniveladora	m <sup>3</sup> /h	68.0
E6	Vibrocompactador	m <sup>3</sup> /h	50.0
E7	Retroexcavadora de llanta	m <sup>3</sup> /h	70.0
E8	Retroexcavadora de oruga	m <sup>3</sup> /h	70.0
E9	Volqueta	m <sup>3</sup>	8.00
E10	Finisher	m <sup>3</sup> /h	33.6

Tomando en cuenta la información de la Tabla 10 y la Tabla 11 se realizó el cálculo de las emisiones GEI en los numerales 4.1.4, 4.1.5 y 4.1.6.

#### 4.1.4 Transporte de los materiales

En la creación de la base de datos para el transporte de los materiales resultantes del análisis de Pareto, se consideraron seis aspectos demográficos del proveedor. Estos aspectos incluyen la ciudad y dirección de origen del despacho, el vehículo utilizado para el transporte del material y el NIT, que se utilizó para la homologación con el sistema ERP. A través de las entradas de almacén, se determinó la frecuencia de visita a la obra. Es relevante aclarar que cada entrada registrada en el ERP está vinculada a una remisión y a un único viaje. Por lo tanto, el número de entradas se considera como el número de viajes realizados entre la dirección de origen y la dirección de destino, que en este caso de estudio es carrera 24 #5 - 269, Jamundí, Valle del Cauca.

Una vez consolidada esta información se realizó el cálculo de la distancia para cada uno de los proveedores por recorrido como se observa en la Tabla 12, cuyos proveedores son aquellos que han abastecido el caso de estudio.

Tabla 12 Información demografica de los proveedores.

ID	Proveedor	NIT	Ciudad	Dirección de salida	Distancia (Km)	Vehículo
P1	Cementos Argos	890100251	Jamundí	Cra 23 # 8 - 122	1.0	Mixer
P2	Ladrillera Meléndez	817000019	Santander de Quilichao	Cra 14 #4-1	35.4	Camión
P3	Castelus me Colombia	900713252	Medellín	Calle 7 Sur #42 70	458.0	Camión
P4	Siderúrgica del occidente	890333023	Yumbo	Calle 12 A #37-15	32.0	Camión
P5	Diacó SA	891800111	Tunja	Calle 2 #7-14	618.0	Camión
P6	Paz del río	860029995	Yumbo	Cra 23 #13-125	36.7	Camión
P7	Conaldesa	805017736	Palmira	Calle 3 #4-190	53.6	Camión
P8	Aceros y mallas	900624777	Yumbo	Calle 13 #27A-74	42.6	Camión
P9	Trefilados y mallas	900301315	Yumbo	Cra 30 #10-279	34.8	Camión
P10	Pintuco Colombia	890900148	Medellín	Calle 19a # 43 B - 41	460	Camión
P11	Corona	860500480	Cali	Cra 1 # 62-80	29.6	Camión
P12	Alfagres	860032550	Cali	Calle 5 #79A - 151	18.1	Camión
P13	Cerámica italia	890503314	Cali	Cra 8 # 52-34	27.0	Camión
P14	Perea y CIA	800006785	Yumbo	Calle 10 # 31-70	49.3	Volqueta
P15	Dragados del valle	900648418	Jamundí	Calle 14 # 11-72	3.9	Volqueta
P16	Materiales Vera	901159719	Cali	Calle 21a #34a-75	28.6	Volqueta
P17	Inversiones Alianza	901058640	Cali	Calle 7a #56 - 136	20.0	Volqueta
P18	Disaguas	800224306	Yumbo	Cra 36 # 10 -140	32.9	Camión
P19	Imevalle	890308786	Yumbo	Cra 29 A # 10 -166	34.3	Camión
P20	Distribuciones electricas	901254982	Pasto	Calle 22 # 20B - 21	363.0	Camión
P21	Mexichem	860005050	Bogotá	Cra 72 # 59 - 28 Sur	476.0	Camión
P22	Distribuciones PVC	805001071	Cali	Calle 15 # 11- 46	24.6	Camión
P23	Sonepar	860531287	Cali	Calle 23 # 5 -98	26.4	Camión
P24	Dispetrocom	800209893	Jamundí	Calle 25 # 19 - 05	4.5	Camión
P25	Interlift	900512637	Bogotá	Calle 80 #116B - 61	482.0	Camión

A partir de la tabla anterior, se puede observar una segmentación de proveedores según la distancia a la ubicación del proyecto. El 76% de los proveedores se encuentra en un radio de menos de 50 km, el 4% está entre 50 y 100 km, y el 20% restante a más de 200 km de distancia. Este último grupo del 20% corresponde principalmente a proveedores como Pintuco y Castelus, cuyas operaciones principales están en Medellín, y Diaco, cuya planta está en la ciudad de Tunja.

De igual manera se observa que el transporte está segmentado en tres tipos de vehículo, camión en el 80.77% de los proveedores, volqueta en el 15.38% y mixer en el 3.85%, estos vehículos tienen factores de emisiones similares puesto que ningún proveedor reportó la existencia de una flota híbrida o eléctrica en el transporte de los materiales hasta el caso de estudio, por ello, se asume que todos los vehículos tienen consumo de combustible fósil considerado en el análisis de este trabajo de grado.

En la consulta directa a la ERP se obtuvo el número de entradas relacionadas para los 25 proveedores descritos en la tabla anterior, por ello en la Tabla 13 se presenta el cálculo de CO<sub>2</sub> equivalente por viaje y en total para cada proveedor teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la Ecuación 6.

*Tabla 13 Cálculo de CO<sub>2</sub> equivalente por transporte de materiales*

<b>ID</b>	<b>Proveedor</b>	<b>N° de entradas</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. Por trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
P1	Cementos Argos	80	0.43	34.27
P2	Ladrillera Meléndez	2	1.75	3.49
P3	Castelus me Colombia	7	22.59	158.14
P4	Siderúrgica del occidente	84	1.58	132.59
P5	Diacó SA	26	30.48	792.57
P6	Paz del río	3	1.81	5.43
P7	Conaldesa	23	2.64	60.81
P8	Aceros y mallas	7	2.10	14.71
P9	Trefilados y mallas	2	1.72	3.43
P10	Pintuco Colombia	60	22.69	1,361.41
P11	Corona	40	1.46	58.40
P12	Alfagres	11	0.89	9.82
P13	Cerámica italia	5	1.33	6.66
P14	Perea y CIA	8	1.60	12.80
P15	Dragados del valle	7	0.13	0.89
P16	Materiales Vera	32	0.93	29.70
P17	Inversiones Alianza	7	0.65	4.54
P18	Disaguas	34	1.62	55.18
P19	Imevalle	16	1.69	27.07
P20	Distribuciones electricas	39	17.91	698.31
P21	Mexichem	84	23.48	1,972.26
P22	Distribuciones PVC	35	1.21	42.47
P23	Sonepar	58	1.30	75.53
P24	Dispetrocom	13	0.22	2.89
P25	Interlift	1	23.78	23.78
<b>Total</b>				<b>5,587.14</b>

Tomando en cuenta la segmentación por tipología de vehículo, dónde el factor de emisión se encuentra muy cercano en los tres modos de transporte reportado por los proveedores, se observó que la distancia recorrida y la frecuencia del viaje son las variables que afectan la emisión total por transporte de material.

De acuerdo con la Tabla 13 Castelus de Colombia, Pintuco, Mexichem e Interlift son aquellos que bajo el análisis de un trayecto generan mayor emisión de GEI debido a la distancia entre el punto de producción y el caso de estudio, sin embargo, al realizar el análisis en el tiempo de ejecución total del caso de estudio, se observó que Mexichem y Pintuco son los proveedores que mayor emisión generan tanto por trayecto cómo de manera general en el proyecto. En ambos casos se observa que además de la distancia, estos proveedores tuvieron las frecuencias más altas 84 y 60 respectivamente en toda la duración del proyecto, sólo superado por Cementos Argos y Siderúrgica de occidente los cuales son locales y se encuentran a una distancia menor de 50 km.

En función de lo anterior, trabajar con proveedores locales cómo Argos y Siderúrgica de Occidente es crucial para la reducción de emisiones de GEI, principalmente debido a la disminución significativa en las distancias de transporte. Al optar por proveedores cercanos, los productos recorren menores distancias, lo que reduce las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros gases contaminantes asociados al transporte. Además, esta práctica disminuye el uso de combustibles fósiles, ya que se requiere menos combustible para transportar productos en distancias más cortas, contribuyendo así a una menor huella de carbono y ayudando a mitigar el cambio climático de manera efectiva.

Ahora bien, tomando en cuenta las emisiones de GEI para la producción de los materiales reportadas en el capítulo 4.1.2 y las emisiones generadas en el transporte de estos dónde se agruparon aquellos proveedores registrados en la ERP que transportaron la misma agrupación de materiales hacia el caso de estudio, con esta información se construyó la Tabla 14 dónde se observa la incidencia de estos dos componentes en la emisión de GEI total para cada material.

Tabla 14 Incidencia de la producción y el transporte en la emisión total por cada material.

ID	Descripción	Emisión producción (Ton CO <sub>2</sub> )	Emisión de transporte (Ton CO <sub>2</sub> )	Total emisiones (Ton CO <sub>2</sub> )	% Participación producción	% Participación transporte
M1	Cemento	705.60	5.14	710.73	99.3%	0.7%
M2	Concreto 21 MPa	1,199.74	18.05	1217.78	98.5%	1.5%
M3	Concreto 28 MPa	724.96	6.07	731.02	99.2%	0.8%
M4	Ladrillo	9.81	161.63	171.44	5.7%	94.3%
M5	Acero	2,403.41	1009.54	3412.95	70.4%	29.6%
M6	Pintura	201.25	1361.41	1562.66	12.9%	87.1%
M7	Cerámica	177.63	74.88	252.51	70.3%	29.7%
M8	Mortero 1:3	11.23	5.00	16.23	69.2%	30.8%
M9	Grava	0.41	21.68	22.08	1.9%	98.1%
M10	Arena	25.61	13.45	39.06	65.6%	34.4%
M11	Acero galvanizado	3.38	1148.33	1151.71	0.3%	99.7%
M12	PVC	1,025.58	1722.49	2748.07	37.3%	62.7%
M13	Teja ecoroof	81.51	2.89	84.39	96.6%	3.4%
M14	Asfalto	72.33	12.80	85.13	85.0%	15.0%
M15	Cobre	1,105.76	23.78	1129.53	97.9%	2.1%
	<b>Total</b>	7,748.20	5,587.15	13,335.30		

Al encontrar materiales que tienen tan alta incidencia desde su proceso de producción como lo son el cemento, el concreto, el mortero, el acero, la arena, la teja y el cobre, se halla un indicador claro de los procesos productivos que deberían tener foco para ser optimizados en lo que corresponde a emisiones mejorando los consumos de energía en el flujo completo del suministro y en el almacenamiento. Por otro lado, materiales como la pintura, el ladrillo, la grava, el acero galvanizado y el PVC, tienen una participación mayoritaria desde el transporte asociado a su requerimiento, determinado por la frecuencia de traslados necesarios.

Este resultado tiene un gran peso considerando que alrededor de los diferentes proveedores se pueden plantear diferentes estrategias de mitigación de emisiones, que incluso, pueden representar beneficios económicos tanto para el proveedor como para el consumidor. Por mencionar algunas de ellas, la implementación de flotas de transporte híbridas, 100% eléctricas, e incluso mejoras en la disposición logística reduciendo distancias recorridas por selección de proveedores locales y el aseguramiento de cargas completas que permitan maximizar la eficiencia del transporte.

#### 4.1.5 Caracterización del transporte de personal directo e indirecto

Para estimar con precisión la huella de carbono asociada al desarrollo de un proyecto inmobiliario de este segmento, y para esta investigación, es fundamental caracterizar el modo de transporte usado por trabajadores directos de la constructora e indirectos vinculados a través de contratistas de obra.

A través de encuestas Origen-Destino se levantó la información suficiente para determinar la influencia del transporte requerido para mantener el personal necesario en el desarrollo de la obra generando una visión detallada de las emisiones relacionadas con el traslado diario para los mismos empleados como un componente significativo en las emisiones de GEI. Este levantamiento se realizó con el apoyo del personal de seguridad y salud en el trabajo de la obra analizada buscando garantizar un alcance amplio y suficiente dentro de la población presente en el estudio de caso desde el control de acceso biométrico. Con base en lo anterior, se construyó la siguiente base de datos para trabajadores directos de la constructora Tabla 15.

*Tabla 15 Información demográfica del personal directo*

<b>Código</b>	<b>Personal</b>	<b>Dirección de salida</b>	<b>Dirección obra</b>	<b>Distancia (Km)</b>	<b>Vehículo</b>	<b>Fecha inicio</b>	<b>Fecha fin</b>
D1	Director de obra	Av 6A N #38N - 60		28.4	Automóvil	01/05/2022	15/06/2024
D2	Residente de estructura	Cra 90 #45- 196		17.0	Automóvil	01/05/2022	01/03/2024
D3	Residente de acabados	Cra. 42 #11- 133		21.5	Automóvil	01/09/2022	15/05/2024
D4	Residente de urbanismo	Calle 60B #107-148	Carrera 24 #5 - 269,	16.7	Motocicleta > 125 CC	01/05/2022	01/06/2023
D5	Practicante	Cra. 67 #11B- 20	Jamundí	19.7	Automóvil compartido	01/07/2022	01/12/2022
D6	Auxiliar administrativo	Calle 47B N #3 N-112		29.2	Motocicleta < 125 CC	01/08/2022	30/04/2024
D7	Almacenista	Cra 44A #40- 113		20.7	Motocicleta < 125 CC	01/05/2022	15/06/2024
D8	Inspector SST	Calle 66 #1- 129		29.7	Motocicleta < 125 CC	01/05/2022	15/05/2024

Tomando en cuenta la información demográfica de cada trabajador, se realizó el cálculo de las emisiones de GEI emitidas por cada trayecto y las emisiones totales generadas en todo el proyecto por el transporte del personal directo, en la Tabla 16 se observa el resultado de los cálculos realizados, dónde se obtuvo una emisión total de 1.54 Ton CO<sub>2</sub> equivalente.

*Tabla 16 Emisiones de GEI generadas por transporte de personal directo*

<b>ID</b>	<b>Distancia</b>	<b>Días hábiles laborados</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. Por trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
D1	28.4	555	0.0002	0.0859
D2	17	480	0.0001	0.0445
D3	21.5	445	0.0001	0.0522
D4	16.7	284	0.0001	0.0216
D5	19.7	110	0.0001	0.0138
D6	29.2	457	0.0009	0.4331
D7	20.7	555	0.0007	0.3728
D8	29.7	533	0.0010	0.5137
<b>Total</b>				<b>1.5375</b>

Analizando la información obtenida de las encuestas origen-destino se puede evidenciar que una proporción del 62% recorre una distancia mayor a 20 km. a diario para acudir a la obra o sitio de trabajo. Lo anterior, representaría un argumento suficiente para plantear estrategias de mitigación de emisiones con las que se procure garantizar desplazamientos mínimos para el personal que asiste a la obra, tales como la implementación de sistemas de transporte colectivo o la oferta de vivienda temporal alrededor de macroproyectos como los que ejecuta la constructora del caso, donde se puede garantizar una continuidad de condiciones laborales para diferentes individuos y en el mismo sentido a sus comunidades.

En el caso de los trabajadores vinculados por medio de contratistas, las encuestas recogieron la información suficiente para conocer los medios predominantes, las distancias recorridas, la frecuencia de los desplazamientos y los modos de transporte utilizados. Extrapolando esta información se podría identificar oportunidades de mejora desde el punto de vista ambiental como la necesidad de implementar sistemas de transporte que garanticen la sostenibilidad dentro de la región o la adopción de medidas como la promoción de prácticas de movilidad compartida.

La información correspondiente modo de transporte, lugar de origen, distancia recorrida a diario por cada trabajador se presenta en el Anexo 2 en el cual se consolidan las emisiones generadas por el transporte generado por trabajadores indirectos; para el cálculo se consideró la capacidad promedio de pasajeros de los medios de transporte intermunicipales disponibles. A continuación, en la Tabla 17 se resumen los hallazgos.

*Tabla 17 Emisiones de transporte de trabajadores indirectos por tipo de vehículo*

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>N° Trabajadores por tipo de vehículo</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq.</b>	<b>% Participación</b>
Automóvil	1.00	0.02	0.07%
Motocicleta < 125 CC	58.00	17.75	71.31%
Motocicleta > 125 CC	28.00	0.97	3.89%
Bicicleta	15.00	0.00	0.00%
Transporte público	18.00	4.11	16.53%
Transporte informal	48.00	2.04	8.20%
Caminando	12.00	0.00	0.00%
<b>Total</b>	<b>180.00</b>	<b>24.89</b>	<b>100%</b>

De esta forma se puede realizar un análisis que puede ser sólido desde la precisión y la relevancia, y que también puede servir de base para desarrollar estrategias que contribuyan a la reducción de la huella generada por la construcción como sector productivo, según las metas y objetivos trazados. Es evidente que la población de trabajadores indirectos, asociados a contratistas utiliza en mayor medida como medio de transporte la motocicleta de menos de 125 CC. Con una representación del 71% de emisiones sobre los demás medios de transporte. Luego de la motocicleta, el transporte público es el de mayor aporte con un 16% de participación. El 51,6% de esta población utiliza modos de transporte alternativos y colectivos como el transporte público, transporte informal, la bicicleta o la caminata. Este análisis también muestra una proporción de un 27% de la población que debe utilizar transporte informal, lo cual es muestra de la infraestructura disponible y las condiciones de desarrollo de la zona. Además, pone en evidencia el potencial de desarrollo en cuanto a transporte que se tiene hoy en día en la región.

#### 4.1.6 Generación y aprovechamiento de RCD

De acuerdo con la Resolución 1257 de 2021, la generación de residuos de construcción y demolición (RCD) se mide en función del volumen entregado en un sitio de disposición final autorizado. Así, se creó la base de datos presentada en la Tabla 18, que muestra la generación mensual de RCD para el caso de estudio según los valores reportados por el gestor ambiental asignado al proyecto. Además, se incluye el volumen de aprovechamiento interno, resultado de las buenas prácticas de separación implementadas en el caso de estudio.

*Tabla 18 Generación mensual de residuos de construcción y demolición (Ton)*

Año	Residuo	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
2022	Cartón	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.11	0.11
	Chatarra	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	2.02	0.00	0.80	3.74
	Madera	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.55	6.70	10.05	3.35	3.30	5.50	33.45
	Ladrillo	0.00	0.00	0.00	0.00	16.6	12.9	0.00	0.00	0.00	0.00	18.5	0.00	48.10
	RCD Aprov	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	188.60	46.1	80.7	0.00	49.4	0.00	364.94
	Tierra aprov. Interna	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Tierra aprov. Externa	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	11050	0.00	894	0.00	0.00	0.00	11944.20
	Total	0.00	0.00	0.00	0.00	16.6	12.9	11,243	52.8	985.6	5.37	71.2	6.41	12,394.54
2023	Chatarra Mixta	2.28	1.73	1.05	1.23	2.60	2.28	2.40	4.05	3.05	1.53	1.77	2.81	26.78
	PVC	0.16	0.09	0.13	0.21	0.06	0.12	0.11	0.33	0.00	0.39	0.13	0.13	1.84
	RCD Aprov.	93.5	0.00	0.00	0.00	257	0.00	388.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	739.64
	Cartón	0.07	0.00	0.00	0.07	0.11	0.07	0.00	0.07	0.00	0.18	0.15	0.71	1.42
	Madera	4.60	1.60	0.00	1.20	3.90	1.20	0.00	10.3	4.80	5.50	3.40	1.20	37.72
	Plástico	0.00	0.04	0.00	0.00	0.05	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.23
	Envases productos químicos	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
	Sustancias líquidas	0.00	0.00	0.06	0.13	0.00	0.14	0.00	0.08	0.00	0.08	0.04	0.10	0.61
	Sacos de Cemento	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01
	Total	100.61	3.47	1.24	2.84	263.7	3.81	391.1	14.83	7.85	7.69	5.52	5	808.26

A partir de la información anterior existe una caracterización para el tipo de residuo, esta segmentación está dada de la siguiente manera según el equipo ambiental de la constructora a la cual pertenece el caso de estudio.

- Aprovechable: Chatarra mixta, PVC, RCD aprovechado interno, cartón, madera, plástico, sacos de cemento.
- Pétreo: RCD
- Aprovechable pétreo: RCD aprovechado.
- Tierra: Tierra de excavación aprovechado interno, tierra de excavación aprovechado externo.
- Peligroso: Envases productos químicos, sustancias líquidas.

Es importante aclarar que según la Resolución 1257 del 2021, el material proveniente de excavación es clasificado como RCD, sin embargo, no es considerado dentro del volumen de generación de los mismos, esto no quiere decir que el gran generador sea eximido de su manejo, es por ello que la trazabilidad de la información referida a la tierra de excavación distribuida en otros proyectos de la compañía, permita ser considerado dentro del volumen de aprovechamiento externo, dentro de lo cual es factible hallar el aporte a las emisiones de GEI en estas actividades.

Por otro lado, según la clasificación presentada anteriormente dentro del volumen de generación se toman en cuenta todas las clasificaciones a excepción de la clasificación “Tierra”, además, sólo se cuenta como aprovechamiento el volumen registrado en las clasificaciones “Aprovechable” y “Aprovechable pétreo”. Estas actividades de aprovechamiento fueron reemplazos parciales o totales de material granular para el mejoramiento de subrasante en las vías internas del proyecto, de esta manera, se considera factible determinar el aporte de emisiones de GEI en las actividades de aprovechamiento interno.

Ahora bien, de acuerdo con el municipio en el cual se localiza el proyecto, el año de cierre estimado para las obligaciones ambientales, el volumen de RCD teórico y el porcentaje de aprovechamiento real y teórico se presenta en la Tabla 19 la gestión de los RCD durante toda la ejecución del proyecto.

Tabla 19 Generación y aprovechamiento de RCD general - Caso de estudio

<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>
RCD Teórico	Ton	6,894.50
RCD pétreo aprovechado externo	Ton	0
RCD pétreo aprovechado entre obras	Ton	1,732.25
RCD no pétreo aprovechado (reciclaje)	Ton	134.53
RCD pétreo disposición final	Ton	0
Residuos peligrosos y especiales	Ton	0.38
<b>Total, de RCD generado</b>	Ton	1,867.16
% Meta de aprovechamiento	%	15%
Meta de aprovechamiento por alcanzar	Ton	280.07
<b>Total, aprovechamiento actual</b>	Ton	1,866.78
% de aprovechamiento actual	%	99.98%
RCD tierra de excavación	Ton	11,944.20

Las aproximaciones teóricas en el caso de estudio responden a factores que ha consolidado la constructora del caso de estudio por experiencia, según el tipo de proyecto a desarrollar, el área construida y los sistemas constructivos empleados en el mismo. En este análisis se establece la altura promedio de generación de acuerdo con las regulaciones tomadas por el área ambiental y la densidad del RCD según la investigación realizada por la constructora, adoptando un valor de 1.648 Ton / m<sup>3</sup>. Con esta base de información la proyección teórica de generación de RCD para el caso de estudio se acerca a las 6.89 ton, pero el alto desempeño en la gestión ambiental permitió finalizar con un valor de 1.87 ton, solo el 27 % de la estimación inicial. Los resultados positivos se centraron en una excelente separación de residuos en la fuente que generaba facilidades para el aprovechamiento interno de los RCD generados. De igual manera, se atacaron los desperdicios resultantes de actividades como la fundición de apartamentos y el traslado de materiales delicados al disponer de acopios cercanos a puntos clave de la ejecución (Cortadora de ladrillo o el sitio de instalación del ladrillo).

Tomando en cuenta la información presentada a lo largo del subcapítulo y los parámetros establecidos en las Ecuaciones 9 y 10 en la Tabla 20 se consolida el cálculo de las emisiones de GEI por disposición final y aprovechamiento de RCD.

Tabla 20 Emisiones GEI por disposición final y aprovechamiento interno de RCD

Descripción	Volumen (m <sup>3</sup> )	Distancia (km)	Rendimiento viaje (m <sup>3</sup> /km)	Rendimiento (m <sup>3</sup> /h)	Consumo transporte (m <sup>3</sup> /km)	TON CO <sub>2</sub> eq. total
Disposición final	0.00	65	8	-	0.0025	0.000
Aprovechamiento interno vías	1,586.76	0	-	70	-	0.028
Aprovechamiento relleno entre vifas	280.01	0	-	25	-	0.004
Aprovechamiento externo Parque Natura	9,555.36	0.80	8	-	0.0025	0.180
Aprovechamiento externo Vivero parque residencial	2,388.84	21	8	-	0.0025	1.25
					Total	1.44

Con respecto a la emisión total por disposición final y aprovechamiento de RCD se puede observar que el mayor aporte se da por el transporte hacia el macroproyecto Vivero Parque Residencial el cual se encuentra a una distancia de 21 km y generó 1.25 Ton CO<sub>2</sub>, representando el 86.8% de la emisión total. Este transporte se generó teniendo en cuenta la solicitud de material natural para la conformación de zonas verdes, así como RCD en las actividades avaladas por el consultor de suelos (Mejoramiento de subrasante). Por otro lado, observamos que el ítem de disposición final no tuvo incidencia en la emisión total, teniendo en cuenta que no se dispuso RCD en el sitio de disposición final autorizado.

Es importante tener en cuenta que el sitio de disposición final autorizado por la corporación autónoma responsable del proyecto es Gustavo Garrido, ubicado en el predio La Carmelita, Vereda Caucaseco en el municipio de Candelaria, la distancia entre el caso de estudio y el sitio de disposición final es de 65 km calculado con la extensión Distance matrix service, sin embargo, como fue mencionado anteriormente dada la buena gestión por parte del equipo ambiental de la constructora, el caso de estudio no tuvo salida de RCD hacia un sitio de disposición final.

De acuerdo a lo anterior las emisiones de GEI asociadas a los RCD están dadas por las actividades de aprovechamiento interno, la primera consiste el reemplazo parcial del material granular utilizado en la conformación de las vías internas, por lo cual, es requerido el maquinado

(Retro excavadora de llantas) y compactación del material (Vibrocompactador), la segunda actividad es el relleno entre vigas de cimentación, dónde es requerido un acarreo interno del material y un proceso de compactación con un equipo tipo saltarín.

Por otro lado, el aprovechamiento externo de este material donde se considera el transporte del mismo mediante un vehículo tipo “volqueta” hacia los dos lugares de destino reportados por el equipo de seguimiento ambiental, observando la Tabla 19 se evidencia que el 80% del material fue transportado al macroproyecto Parque Natura, ubicado en el municipio de Jamundí a 0.8 km del lugar de origen, el 20% restante fue trasladado al macroproyecto Vivero parque residencial ubicado a 21 km del caso de estudio.

En el aprovechamiento externo sólo se considera imputable al caso de estudio las emisiones asociadas al transporte de la tierra proveniente de excavación, teniendo en cuenta que las actividades de maquinado y compactación de este material se imputan por el proyecto inmobiliario el cual requiere la adecuación de zonas verdes, así mismo las emisiones referidas a estos trabajos deben ser asociadas al proyecto que corresponda.

El rendimiento de los equipos utilizados es tomado de cada ficha técnica según la maquinaria reportada por los contratistas asignados a las actividades de movimiento de tierras y transporte de material, para lo cual se comunicó el uso de una retroexcavadora de llantas, un vibrocompactador y una volqueta, posteriormente se realizó la homologación con la Tabla 11, por último, es importante aclarar que estos equipos trabajan a gasolina.

#### 4.1.7 Pesos por material (PVC - Acero Inoxidable)

Cada material utilizado dentro de un proyecto inmobiliario tiene una huella de carbono específica y su impacto ambiental depende directamente de su peso y volumen requerido. Conocer el peso exacto de cada material utilizado permite realizar una cuantificación acertada de las emisiones relacionadas al uso de estos.

En este sentido se realizó una medición detallada del peso de 157 insumos utilizado dentro de la obra, 107 en la categoría del PVC y 50 insumos en la categoría de acero inoxidable, todos ellos utilizados en gran medida para realizar instalaciones eléctricas e hidrosanitarias. Con base en esta información se construyó la siguiente base de datos que se puede observar en el Anexo 2. Es válido mencionar que, aunque son elementos que no tienen mucho peso, se utilizan en grandes

cantidades durante el desarrollo de proyectos inmobiliarios y generan cantidades de transporte considerables.

#### 4.1.8 Consumo de energía eléctrica.

Cada uno de los proyectos de la constructora elegida cuenta con un macro medidor de energía para el consumo provisional del fluido eléctrico durante el proceso de construcción, es por ello, que la conformación de la base de datos se da en función del consumo general del proyecto en dónde están considerado el consumo del campamento, los grandes equipos (Torre grúa, moto bomba y cortadora de ladrillo), así como la herramienta menor utilizada en diferentes actividades en el proceso constructivo.

En función de este análisis en la Tabla 21 se presenta de manera mensual el consumo para el caso de estudio, así como también la generación de GEI debido al consumo eléctrico en el caso de estudio, este análisis se realizó tomando en cuenta un factor de emisión para el consumo energético de 0.112 ton CO<sub>2</sub> equ / MWh.

*Tabla 21 Consumo de energía y emisión asociada*

<b>Año</b>	<b>Mes</b>	<b>Consumo (kWh)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq</b>
2022	Agosto	3,300	0.37
	Octubre	7,500	0.84
	Noviembre	7,260	0.81
	Febrero	7,380	0.83
2023	Marzo	11,160	1.25
	Agosto	10,740	1.20
	Octubre	15,960	1.79
	Enero	45,180	5.06
2024	Marzo	4,440	0.50
	Abril	1,440	0.16
	Mayo	1,320	0.15
		<b>Total</b>	<b>12.96</b>

El proceso actual de medición en los proyectos de construcción enfrenta una barrera significativa en la detección del consumo de los grandes equipos, los cuales representan el mayor porcentaje del consumo de energía eléctrica en los proyectos. Sin la especificación detallada de este consumo, es complejo tomar decisiones sobre la presencia de estos equipos en función de las

emisiones de GEI generadas por cada uno de ellos. Sin embargo se observa un aumento del 51% para el consumo energético en marzo comparado con el mes de febrero del 2023, este consumo se mantuvo hasta el mes de octubre del 2023 dónde en la EDT se observa el inicio de actividades de estructura y mampostería en las cuales se requiere el uso de 2 torres grúas y una cortadora de ladrillo de mesa debido al ritmo de ejecución y los frentes de trabajo manejados en el caso de estudio.

Se observó el pico del consumo de energía eléctrica en el mes de enero del 2024 con un aumento significativo de 2.8 veces el consumo reportado en el mes de octubre y una emisión de GEI asociada de 5.06 Ton de CO<sub>2</sub>, representando el 39% de la emisión de GEI total. Aunque el reporte de enero en el 2024 consolide la información de noviembre, diciembre y enero, el aumento desproporcionando se debe a las actividades de cierre de año relacionadas con el proceso de acabados y detallado para las entregas de los inmuebles en función del cumplimiento de la meta trazada por la compañía.

De acuerdo con el análisis de los equipos y el requerimiento de otras actividades en el izaje de material, mecanismos de fundición como la bomba estacionaria o autobomba, que a priori tienen un consumo inferior a la torre grúa, no eran viables para el transporte de material a los pisos superiores de las torres debido a su tipología y a la necesidad de materiales para la estructura (acero, formaleta) y los acabados, donde la torre grúa permite realizar estos movimientos adicionales. Por otro lado, la cortadora de mesa es necesaria debido a la presencia de mampostería en la fachada y en la estructura de las zonas comunes del proyecto, donde los cortes para las ventanas de inspección o los elementos con dimensiones diferentes a las unidades comerciales deben realizarse con precisión según los requerimientos normativos.

#### 4.1.9 Emisiones por subcontratistas.

Según las políticas de contratación de la compañía del caso de estudio, se identificó que en las actividades del capítulo presupuestal de movimiento de tierra se asignan bajo la modalidad de todo costo, dónde los contratistas deben de disponer de la maquinaria y el material para la ejecución de las actividades. A partir de este hallazgo se realizó el levantamiento de los equipos utilizados por el contratista específico del caso de estudio, en él se encontró la presencia de una motoniveladora, un vibrocompactador y una retroexcavadora de llantas, en la Tabla 22 se consolida la información

específica de consumos, rendimientos y emisiones generadas a partir del volumen de material trabajado a lo largo de la ejecución del caso de estudio, esta información fue extraída de las fichas técnicas de los equipos.

*Tabla 22. Emisiones por subcontratistas y su maquinaria*

<b>Maquina</b>	<b>Volumen trabajado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Consumo (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Rendimiento (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Emisiones totales (Ton CO<sub>2</sub> eq.)</b>
Motoniveladora	33,353.6	0.002	68	0,25
Vibrocompactador		0.014	50	1,63
Retroexcavadora de llantas		0.016	70	1,44
			<b>Total</b>	<b>3.32</b>

En el análisis realizado se tomó el mismo volumen de material trabajado para cada uno de los equipos considerados por el contratista, este valor fue arrojado por la consulta directa a la ERP en las actividades contratadas en el cuerpo del contrato. Finalmente, las emisiones por subcontratistas representan el 0.02% de las emisiones totales en el análisis generado para este caso de estudio. Es importante tener en cuenta la calidad de información en la estructura de la compañía, dónde no se tiene una trazabilidad consignada y centralizada sobre los equipos con los que cuenta cada contratista que trabaja en las diferentes obras. Lo anterior genera una oportunidad en el área de negociaciones para generar una caracterización integral de los contratistas que permita tener un control más detallado sobre las diferentes actividades a realizar y sus rendimientos reales.

#### 4.1.10 Análisis general de la huella de carbono.

A lo largo del capítulo 4.1, se detalla el proceso de conformación de las bases de datos para la herramienta de estimación de la huella de carbono, resaltando la importancia de recopilar datos precisos y relevantes, así como los diferentes tipos de datos necesarios para evaluar las emisiones generadas en cada uno de los alcances establecidos.

La recopilación y estructuración de estos datos es fundamental para asegurar que nuestra herramienta proporcione estimaciones fiables y útiles, en la Tabla 23 se presenta la generación para cada uno de los indicadores y su incidencia en la emisión total.

Tabla 23 Emisiones de GEI generadas por cada alcance e indicador

Alcance	Indicador	Emisión Ton CO <sub>2</sub> eq. total	% Participación
1	Combustión por vehículo y maquinaria propia	6.29	0.05%
	Emisiones fugitivas	0	0.00%
2	Transporte trabajadores directos	1.54	0.01%
	Energía adquirida por equipos	12.96	0.10%
3	Emisiones por subcontratistas	3.32	0.02%
	Transporte trabajadores indirectos	24.89	0.19%
	Gestión de RCD	1.44	0.01%
	Emisiones por materiales	5,587.00	41.74%
	Emisiones por transporte de materiales	7,749.00	57.89%
	Total	13,386.4	100%

El caso de estudio seleccionado generó 13,386.4 Ton de CO<sub>2</sub> de los cuales, el alcance 3 tuvo el mayor aporte con un 99.8% (13,365.5 Ton de CO<sub>2</sub>), es decir, las emisiones generadas en la producción y transporte de materiales fueron los indicadores con mayor incidencia en la estimación final. En segundo lugar, se encuentra el alcance 2 aportando el 0.11% (14.5 Ton de CO<sub>2</sub>) en las emisiones totales de GEI, ya que la planta directa de la constructora solo tiene ocho funcionarios asignados a este proyecto, quienes cuentan con modos de transporte que generan bajas emisiones de GEI. Por último, el alcance 1 con un aporte del 0.05% (6.5 Ton de CO<sub>2</sub>) teniendo en cuenta que no hubo activación de ningún extintor durante la etapa de ejecución, razón por la cual, no se obtuvo un valor asociado a las emisiones fugitivas.

#### 4.2 Análisis financiero por compensaciones

Las compensaciones de CO<sub>2</sub> equivalente son mecanismos utilizados para equilibrar las emisiones de GEI producidas por una entidad, individuo, o proyecto mediante la inversión en iniciativas que reduzcan o eliminen una cantidad equivalente de CO<sub>2</sub> de la atmósfera. Los mecanismos son parte esencial de las estrategias para mitigar el cambio climático y pueden llevarse a cabo a través de varios tipos de proyectos y actividades. En este capítulo se presenta el número de especies arbóreas, los bonos de carbono necesarios para la compensación de las emisiones GEI emitidas en el caso de estudio y su respectiva inversión de acuerdo con las condiciones descritas en cada subcapítulo.

#### 4.2.1 Compensación por especies arbóreas

Según la emisión total de GEI en el caso de estudio y considerando que la cantidad de CO<sub>2</sub> captado por un árbol varía según su especie, edad, tamaño y condiciones ambientales, en la Tabla 24 se presentan los factores de captura de CO<sub>2</sub> promedio de un árbol maduro estandar, reportados por cuatro fuentes de información que no especifican las especies que fueron analizadas en estos estudios.

*Tabla 24 Factores de captura de CO<sub>2</sub>*

<b>Fuente</b>	<b>Unidad</b>	<b>Factor de captación</b>
U.S. Department of Agriculture, 2022	Ton CO <sub>2</sub> / año	0.015
Arbor Day Foundation, 2021	Ton CO <sub>2</sub> / año	0.022
Environmental Protection Agency, 2023	Ton CO <sub>2</sub> / año	0.022
Boston University, 2023	Ton CO <sub>2</sub> / año	0.022
	Promedio	0.020

Si se toma el factor de captación de CO<sub>2</sub> de la Tabla 24 y la emisión de GEI total de 13,386.4 ton CO<sub>2</sub> se estima necesario la siembra de 669,320 unidades arbóreas para compensar la generación de emisiones GEI en el caso de estudio. Según el manual de silvicultura de Santiago de Cali, siguiendo un patrón de siembra cuadrado o rectangular, para aquellas especies de crecimiento medio se recomienda una distancia de separación de 8 a 10 metros entre cada especie. En la Tabla 25 se consolida el área requerida por cada árbol según la separación y el área total de compensación requerida.

*Tabla 25 Área de compensación requerida*

<b>Separación (m)</b>	<b>Área requerida por árbol (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área de compensación total (Ha)</b>
8	16	1,070.91
9	20	1,338.64
10	25	1,673.30

Ahora bien, una vez se establece el número de especies necesarias existen costos asociados en el proceso de selección del lote, compra de especies, siembra y mantenimiento de estas. La constructora a la cual está ligado el caso de estudio realiza compensaciones por reubicación de especies existentes en predios propios o seleccionados por la corporación autónoma que tenga la jurisdicción sobre el proyecto.

Los costos asociados de la compensación de emisiones por GEI se relacionan en la Tabla 26 donde es importante tener en cuenta que cada corporación autónoma rige el tiempo de mantenimiento de cada especie por parte de la organización que realiza la siembra. De acuerdo con lo anterior la corporación autónoma regional del Valle del Cauca hasta el 2022 solicitó tres años para el mantenimiento de las especies, a partir de enero del 2023 se solicitan cinco años en este ítem.

*Tabla 26 Costos asociados a la compensación por especies arbóreas*

<b>Ítem</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo (\$)</b>
Suministro de árbol	Especie	35,700
Mano de obra instalación	Especie	30,300
Mantenimiento	Especie / mensual	2,000

De acuerdo con el número de especies requeridas para la compensación de las emisiones por GEI generadas en el caso de estudio, en la Tabla 27 se presenta el costo asociado para la compensación durante el primer año y a partir del segundo año en adelante.

*Tabla 27 Costos total por año y del segundo año en adelante*

<b>Ítem</b>	<b>Costo (\$)</b>	<b>Especies (und)</b>	<b>Costo año 1 (\$)</b>	<b>Costo año 2 – año 5 (\$)</b>
Suministro de árbol	35,700		\$23,894,724,000	0
Mano de obra instalación	30,300	669,320	\$20,280,396,000	0
Mantenimiento	2,000		\$1,338,640,000	\$5,354,560,000
		<b>Total</b>	<b>\$ 45,513,760,000</b>	<b>\$5,354,560,000</b>

Una vez es superado el quinto año luego de la siembra, el árbol ya se considera como consolidado y maduro, razón por la cual, no es estrictamente necesario su mantenimiento por parte de la organización que realizó la siembra, es por ello por lo que el costo total para la compensación de las emisiones por GEI generadas en el caso de estudio es de \$50,868,320,000 COP.

Si se compara el valor obtenido por compensación total de emisiones, con el valor total del presupuesto de ejecución, se hace evidente que actualmente el requerimiento es proporcionalmente alto y que incluso ya es insuficiente el área disponible en la ciudad para lograr compensar los

diferentes proyectos de construcción que se ejecutan en la misma. Por lo tanto, se recomienda establecer lineamientos claros sobre las políticas de compensación que deberán implementarse puesto que, bajo las condiciones actuales, el constructor en general siempre va a optar por alternativas mucho más convenientes económicamente.

#### 4.2.2 Compensación con bonos de carbono.

La segunda alternativa para la compensación de emisiones es mediante la adquisición de bonos de carbono presentes en el mercado mundial, sin embargo, no todos los proyectos existentes garantizan las mismas condiciones de captación de CO<sub>2</sub> puesto que no tienen el mismo enfoque. El análisis para la compensación se realizó basado en los mercados regulados, los cuales emiten bonos de carbono bajo esquemas obligatorios y normativos emitidos por gobiernos o estándares internacionales, así las cosas, la Tabla 28 consolida los precios por tonelada de CO<sub>2</sub> compensado en los principales mercados regulados.

*Tabla 28 Valor del bono de carbono en mercados regulados.*

<b>Mercado</b>	<b>País</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo del mercado</b>
EU ETS	Unión europea		85
California Cap-and-Trade	Estados Unidos	USD / Ton CO <sub>2</sub>	45.5
RGGI	Estados Unidos		13
Cercarbono	Colombia		10
<b>Promedio</b>			<b>38.37 USD</b>

De acuerdo con la información de la Tabla 28 y la emisión total de 13,386.4 ton CO<sub>2</sub> se estima una inversión anual de \$512,945 USD (\$2'143'367,868.59 COP con una TRM de 4,178.55 COP/USD) en bonos de carbono para la compensación de emisión de GEI emitidas a la atmosfera durante la ejecución del proyecto. La inversión requerida en la adquisición de bonos de carbono buscando la neutralidad de las emisiones de GEI generada representa el 4% de los costos directos del caso de estudio, sin embargo, este valor puede tender a disminuir entiendo la variabilidad en el mercado de bonos certificado de bonos de carbono, aún más la oportunidad renaciente en el contexto colombiano.

Ahora bien, comparando las 2 alternativas de compensación planteadas en este capitulo se encontró una mejor viabilidad económica en la adquisición de bonos de carbono siendo un 95.7% más económico que el proceso de siembra de especies arbóreas. Sin embargo, es necesario

determinar el mercado más idóneo para realizar la compra, donde se garantice mediante las entidades regulatorias la captura del CO<sub>2</sub> ofrecido en cada bono de carbono emitido al mercado, de igual manera, es imperativo profundizar en diferentes estudios que permitan conocer con exactitud los factores de captación de CO<sub>2</sub> por cada especie arborea, donde es importante considerar las variables que afectan en este estudio el cual debe estar regido por las especies autóctonas de la región, las condiciones climáticas, la edad y el tamaño de la especie.

### **4.3 Herramienta de estimación**

En este capítulo, se presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos mediante el tablero *Power BI* diseñado para la estimación del carbono embebido en proyectos inmobiliarios, según los parámetros descritos en el capítulo 3.3. Este análisis es crucial para validar la efectividad del tablero, identificar patrones y tendencias en los datos, y proponer recomendaciones basadas en los hallazgos. El capítulo está estructurado para proporcionar una comprensión clara del proceso de análisis y los resultados obtenidos, destacando la utilidad del tablero PBI en la gestión sostenible de proyectos inmobiliarios.

#### 4.3.1 Información general del proyecto.

En la primera página de la herramienta de estimación se presenta la información general del proyecto, esta nos permite observar un panorama completo sobre la generación de GEI y aquellos indicadores que más impactan en la estimación total de emisiones.

En la Figura 13 se puede observar los filtros asociados a cada hoja del tablero: obra, año y zona del proyecto dada la escalabilidad de la herramienta posibilitando la réplica de esta estimación para todos los proyectos de la compañía, así como también el análisis de las emisiones GEI para un año específico de ejecución o bien, durante toda la ejecución del proyecto. Por otro lado, se diseñó una etiqueta que contiene información relevante en cada hoja de la herramienta de estimación como la constante de captación de CO<sub>2</sub> equivalente por árbol y el valor promedio de un bono de carbono según el levantamiento de información descrito en el capítulo 4.2.

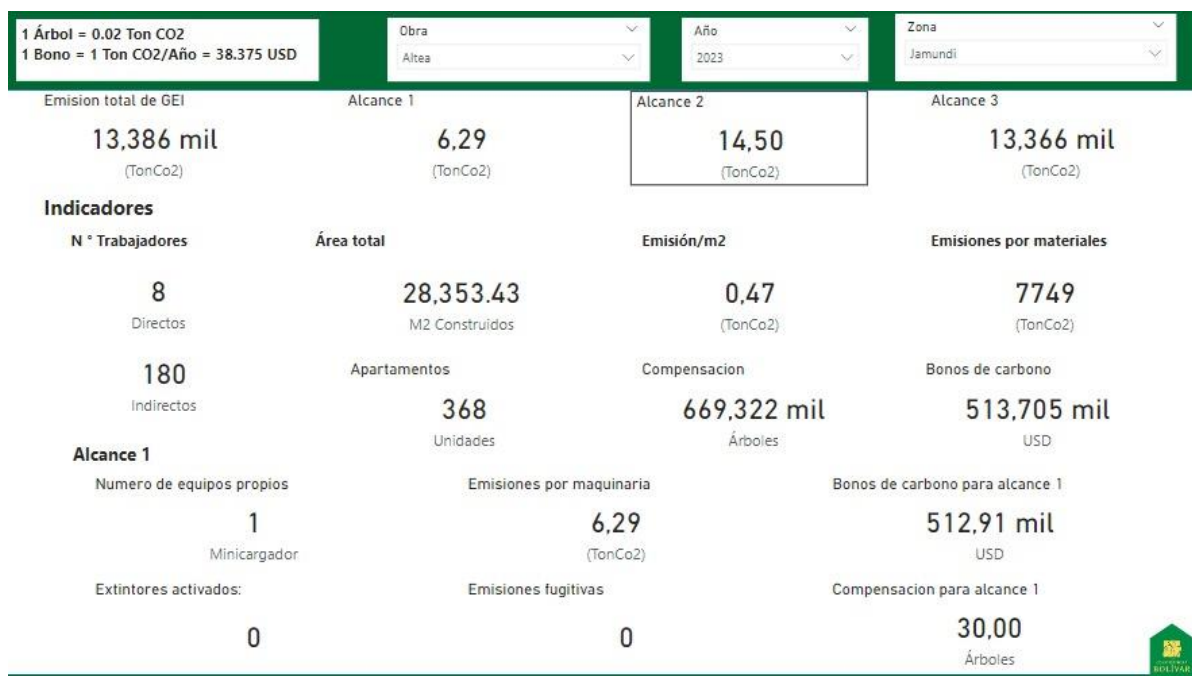


Figura 13 Interface general de la herramienta en el caso de estudio

En la pantalla principal, se observa la incidencia de cada alcance según la metodología propuesta, el número de trabajadores directos e indirectos, el número de inmuebles y el área total del proyecto. De igual manera, la pantalla principal presenta los indicadores más relevantes: emisiones de GEI por m<sup>2</sup>, el número de unidades de flora necesarios para compensar, así como también los bonos de carbono a adquirir para mitigar el impacto ambiental y el indicador que más ha aportado en las emisiones de GEI.

#### 4.3.2 Alcance 1 y 2

Dentro del alcance 1, se consideraron las emisiones directas de fuentes que son propiedad o están controladas por la compañía como generador de huella. Por ejemplo, la combustión en calderas, hornos y vehículos. Para el caso de estudio, la constructora no cuenta con equipos de su propiedad que puedan llegar a tener aporte en las emisiones calculadas. Sin embargo, la herramienta contempla la posibilidad que puede llegar a tener cualquier proyecto de construcción de contar con equipos de propiedad como lo sería un minicargador, una mezcladora a base de combustible, una motobomba, una bomba estacionaria para concreto, entre otros. Además de vehículos para transportes internos como camionetas o furgones, en la Figura 13 se presenta la información relacionada anteriormente.

En cuanto al alcance 2 del protocolo GHG, que abarca las emisiones generadas por el transporte de personal directo y las emisiones indirectas asociadas a la generación de electricidad, calor o vapor adquiridos consumidos por la compañía, se tuvieron en cuenta los consumos periódicos registrados dentro del servicio público de energía eléctrica asociados a las instalaciones provisionales y a los equipos de gran envergadura alimentados con fuerza eléctrica como la torre grúa. En la Figura 14 se observa la interface general para el alcance 2 con la emisión para cada indicador relacionado, los indicadores de compensación en número de árboles y bonos de carbono necesarios, así como la emisión total para este alcance.

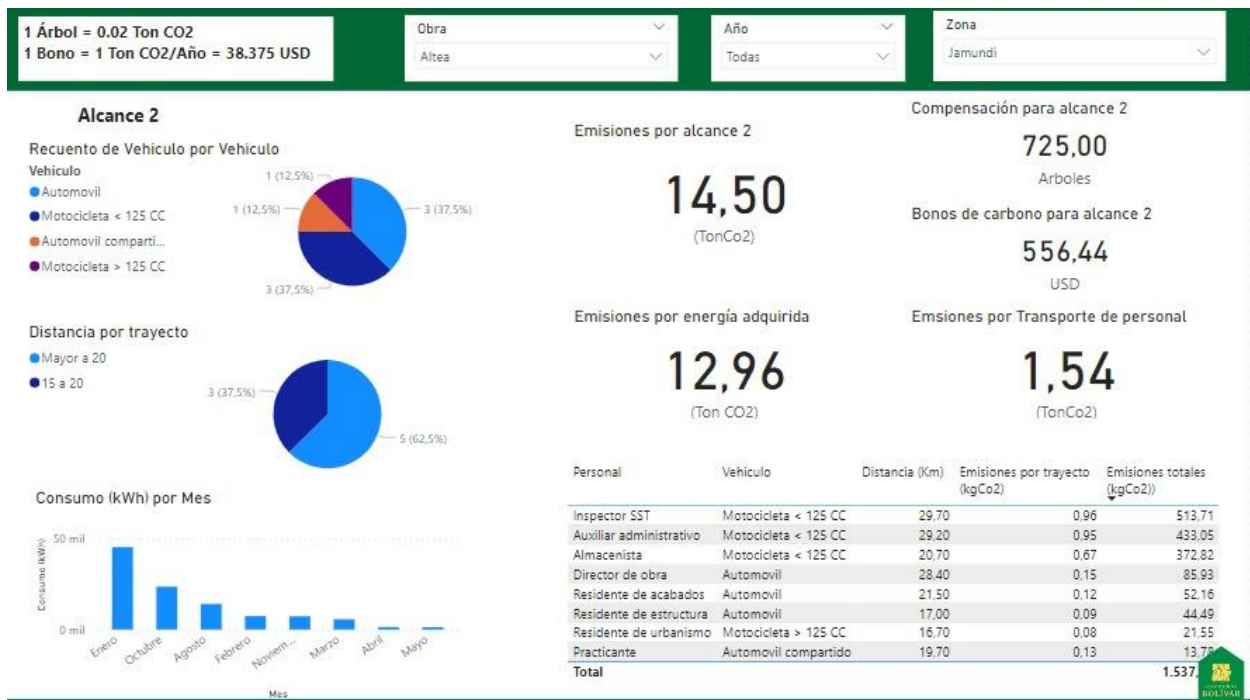
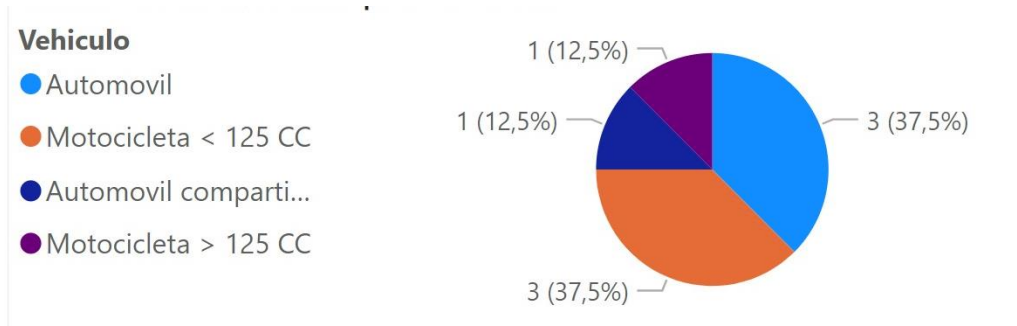


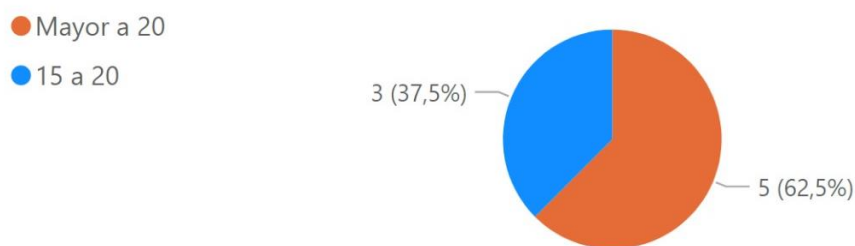
Figura 14 Interface general alcance 2

Con respecto a las emisiones de GEI generadas por transporte de personal directo se tuvo en cuenta 2 indicadores de acuerdo al origen – destino y el medio de transporte de cada funcionario, por lo cual, en la Figura 15 se observa que los modos de transporte más utilizados son el automóvil y la motocicleta < 125 CC con 3 funcionarios cada uno, mientras que modos alternativos de transporte como el carpolling o auto compartido solo lo utilizó 1 de 8 funcionarios, es decir, el 12.5%.



*Figura 15 Distribución de medios de transporte para el personal directo*

Con respecto a la distancia recorrida, en la Figura 16 se observa una segmentación del 62.5% de los funcionarios recorren más de 20 km diarios y el 37.5% de ellos están entre 15 y 20 km, de ello podemos observar que no se prioriza funcionarios que vivan a menos de 5 km del centro de trabajo, por lo cual, la distancia recorrida tiene una incidencia importante en las emisiones de GEI asociadas al transporte de personal directo.



*Figura 16 Segmentación de distancia por trayecto diario*

Complementando la información de la Figura 15 y la Figura 16, la Figura 17 exhibe el análisis generado para calcular las emisiones de GEI por trayecto de cada funcionario. Además, muestra las emisiones totales asociadas a los viajes realizados durante su estadía en el proyecto. En esta gráfica se observa cómo la distancia total recorrida aumenta conforme se suman los viajes de cada funcionario. Cuando uno de ellos informa un cambio en el medio de transporte utilizado, el sistema ofrece la opción de agregar este nuevo medio y calcular las emisiones de GEI correspondientes a cada uno.

Personal	Vehiculo	Distancia (Km)	Emisiones por trayecto (kgCo2)	Emisiones totales (kgCo2)
Inspector SST	Motocicleta < 125 CC	29,70	0,96	513,71
Auxiliar administrativo	Motocicleta < 125 CC	29,20	0,95	433,05
Almacenista	Motocicleta < 125 CC	20,70	0,67	372,82
Director de obra	Automovil	28,40	0,15	85,93
Residente de acabados	Automovil	21,50	0,12	52,16
Residente de estructura	Automovil	17,00	0,09	44,49
Residente de urbanismo	Motocicleta > 125 CC	16,70	0,08	21,55
Practicante	Automovil compartido	19,70	0,13	13,78
<b>Total</b>				<b>1.537,49</b>

*Figura 17 Emisiones por trayecto y totales asociadas al transporte de funcionario directos*

Ahora bien, con respecto a las emisiones de GEI asociadas al consumo de energía eléctrica se generó la gráfica de barras observada en la Figura 14 es factible analizar el consumo del fluido eléctrico según los meses que se reportan mediante la factura generada por el proveedor del servicio. Es importante aclarar que para estos grandes generadores es un común comportamiento generar una única factura para el consumo de dos meses, razón por la cual no es posible analizar el consumo mensual en el caso de estudio.

Por último, dentro del diseño de esta hoja en la herramienta de estimación, se observan diferentes etiquetas dónde se consolida la información de emisiones generadas por la energía adquirida, transporte de personal directo y las emisiones finales de GEI en el alcance 2, en la Figura 14 observamos una generación de 12.96, 1.54 y 14.5 Ton CO2 equivalente respectivamente.

Cada una de estas gráficas está suceptible de modificación a medida que los datos se actualicen en las bases de datos asociadas, de igual manera, su modificación está dada por la selección que se realice en los filtros descritos en el capítulo 4.2.1.

### 4.3.3 Alcance 3

En los 5 indicadores que se tienen evaluados dentro del alcance 3 para la estimación de huella de carbono embebida del caso de estudio, se establecieron 10 subindicadores de los cuales el 60% permite analizar el origen de las emisiones de GEI, mientras que el 40% restante considera las buenas prácticas en pro de la descarbonización cómo el uso de transportes alternativos o compartidos. En la Figura 18 se observa la hoja 1 para el alcance 3 y en la Figura 19 se observa la hoja 2 para el mismo alcance.

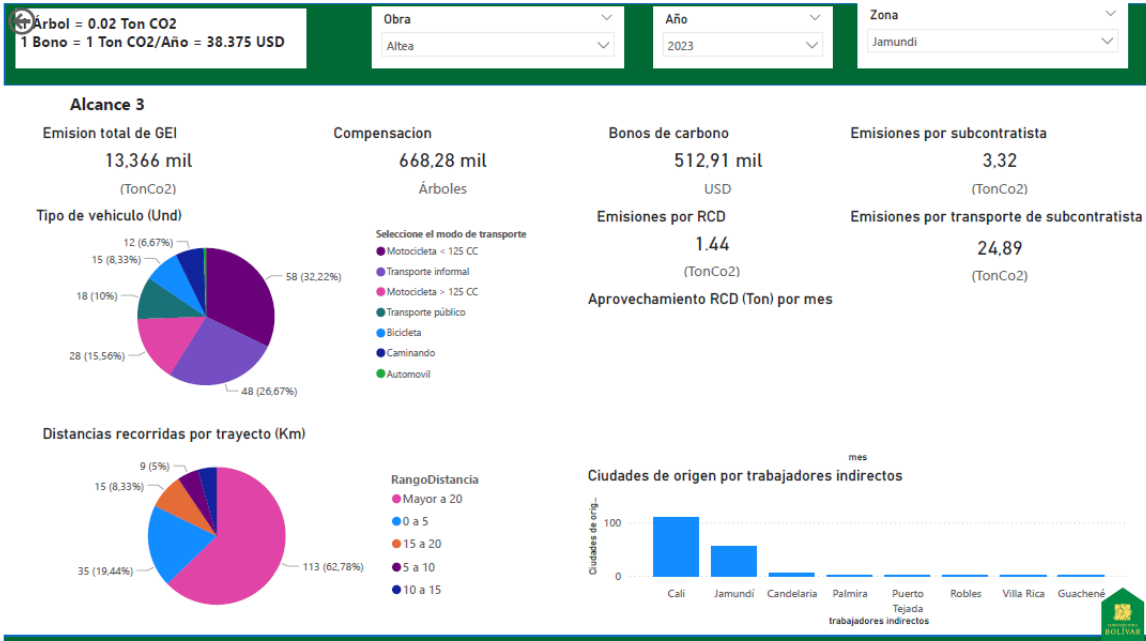


Figura 18 Hoja 1 para el alcance 3

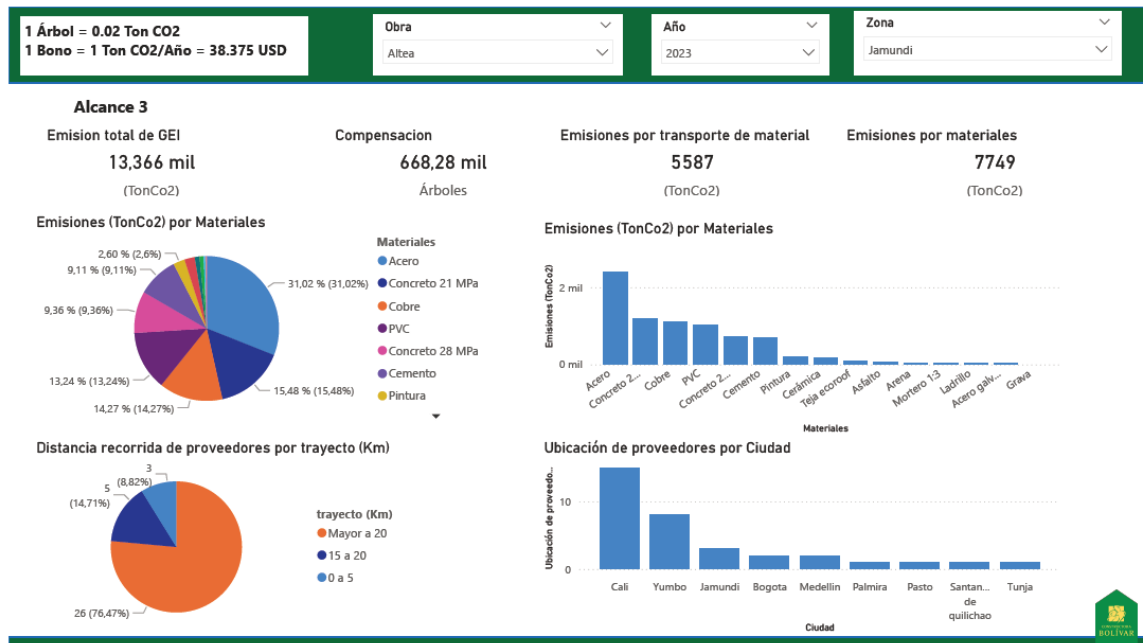


Figura 19 Hoja 2 para el alcance 3

Conforme al indicador “Emisiones generadas por subcontratistas” y las condiciones en los procesos constructivos en la maquinaria utilizada para 33,353.6 m<sup>3</sup> de material granular, se muestra en la herramienta de medición el aporte de 3.32 Ton CO<sub>2</sub> al total del alcance 3.

En la Figura 20 se observa la distancia recorrida por los trabajadores, donde 113 trabajadores (62.78%) recorren más de 20 km diarios, 35 trabajadores (19.44%) se encuentran dentro del principio de la centralidad, dando prioridad a la mano de obra del municipio con una distancia recorrida inferior a 5 km diarios.

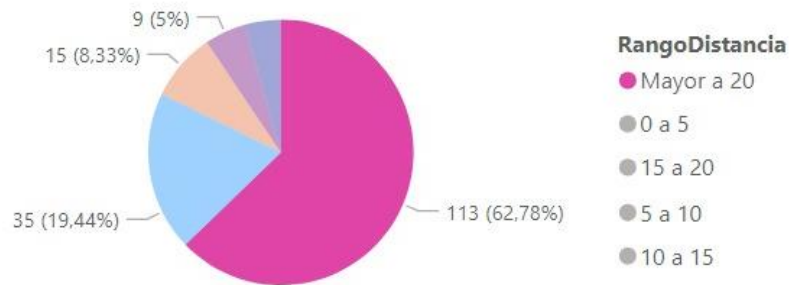


Figura 20 Distancia recorrida por los trabajadores indirectos

En el indicador “Transporte de trabajadores” podemos observar en la Figura 21 aquellos trabajadores que recorren más de 20 km diarios, el 24.44% se moviliza en motocicleta <125 CC, particularmente el caso de estudio arrojó el mismo porcentaje entre las estrategias de movilidad compartida para la reducción de emisiones GEI asociadas al transporte, 18.33% asociado al transporte informal predominante en los trayectos hacia los municipios cercanos al casco urbano de Santiago de Cali y un 6.11% correspondiente al transporte público donde en este modo de transporte se consideró el sistema de transporte municipal e intermunicipal entendiendo la caracterización demográfica de la encuesta O-D, puesto que el 68.5% de los trabajadores no reside en el municipio de Jamundí.

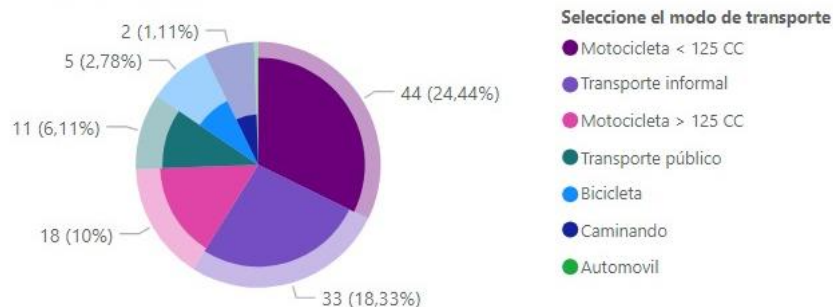
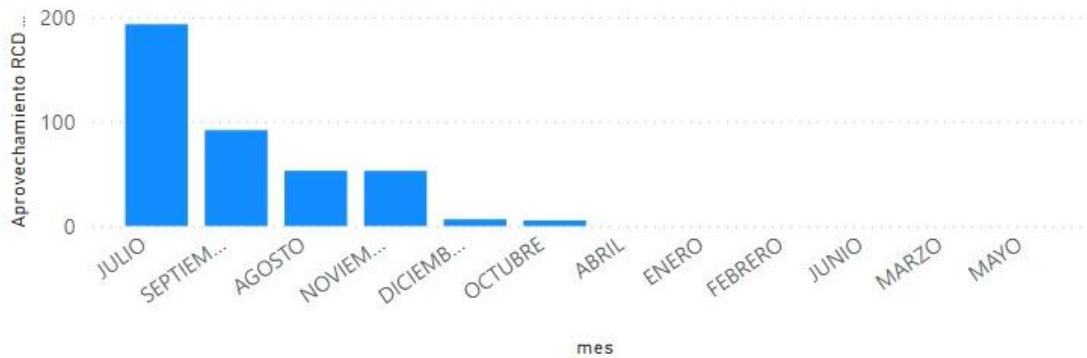


Figura 21 Tipos de vehiculos utilizados para distancias superiores a 20 km

En la Figura 22 se puede apreciar la gráfica planteada para el análisis de aprovechamiento de RCD en función de los estándares planteados en la metodología, observando la no generación de RCD durante todo el tiempo de ejecución y un aprovechamiento del 99.98%. Se presenta el pico de aprovechamiento en los meses de julio, septiembre y agosto, este comportamiento se da debido al inicio de las actividades correspondientes a la estructura, cubierta y acabados según la EDT del caso de estudio, es en estas actividades dónde se generan RCD pétreos (Concreto, ladrillo de arcilla) y RCD aprovechables (Madera, Superboard).



*Figura 22 Comportamiento del aprovechamiento de RCD*

La última sección del alcance 3 se reservó para las emisiones de GEI referidas a la producción de los materiales utilizados y el transporte de estos, en la Figura 23 se observa la contribución de cada material analizado. Se puede evidenciar que los materiales con mayor contribución son el acero, concreto de 21 MPa, cobre y PVC con un 31.02%, 15.48%, 14.27% y 13.24% respectivamente. En el caso específico del cobre se encuentra en la octava posición en función de la cantidad consumida del material encontrándose por debajo del concreto 28 MPa y Cerámica, sin embargo, el factor de emisión del cobre es el segundo más alto, solo por debajo del PVC.

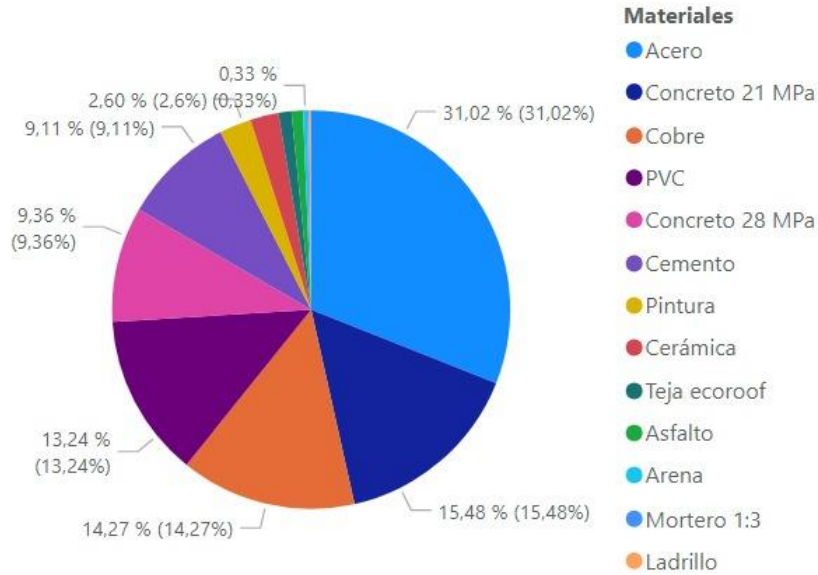
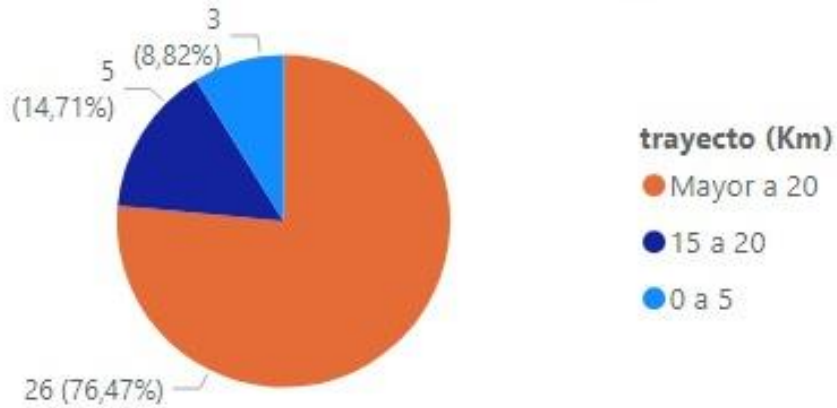


Figura 23 Incidencia de los materiales en las emisiones de GEI

Ahora bien, en la Figura 24 se presenta la distribución de los proveedores que abastecieron al caso de estudio para estos materiales, allí se evidencia una mayor concentración de los proveedores en la ciudad de Santiago de Cali seguido por los municipios de Yumbo y Jamundí, solo una pequeña parte se encuentra concentrado en Bogotá y Medellín, la Figura 25 complementa la información presentada anteriormente, discriminando los proveedores según la distancia recorrida por trayecto, este insumo es fundamental en el que se debe priorizar proveedores de la zona dónde se construye el proyecto, fomentando las centralidades y los viajes cortos entre la planta y el proyecto a abastecer.



Figura 24 Ubicación de proveedores según la ciudad



*Figura 25 Segmentación por distancia recorrida de cada proveedor por trayecto*

En este capítulo, hemos explorado el diseño de una herramienta integral para la estimación de la huella de carbono basada en PBI, abordando los tres alcances según el protocolo GHG y empleando diversas representaciones gráficas para visualizar los resultados obtenidos. La integración de compensaciones basadas en el número de especies y bonos de carbono ha demostrado ser crucial para mitigar el impacto ambiental de las actividades evaluadas.

Este enfoque no solo proporciona una evaluación precisa de las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también promueve la sostenibilidad ambiental al incentivar la protección de la biodiversidad y la adopción de prácticas compensatorias. Sin embargo, el desarrollo de esta herramienta no está exento de desafíos, como la necesidad continua de datos precisos y la adaptabilidad a diferentes contextos operativos.

## 5 CONCLUSIONES

A continuación, se presentan las conclusiones del trabajo realizado y recomendaciones para futuros trabajos de investigación

### 5.1 Conclusiones generales del proyecto.

El objetivo principal de este documento se centró en el diseño de una herramienta de estimación para el carbono embebido con la que se podrá identificar y aplicar medidas de reducción de emisiones de carbono efectivas promoviendo prácticas más sostenibles en la industria. Además, esta herramienta no solo contribuirá a la transparencia y responsabilidad ambiental empresarial de las corporaciones del sector construcción, sino que también fomentará la toma de decisiones informadas que alineen los proyectos inmobiliarios con los objetivos globales de mitigación del cambio climático.

Según el análisis, a los procesos constructivos, los modos de transporte utilizados, así como las distancias recorridas por los trabajadores, los proveedores considerados en el abastecimiento de los materiales que fueron analizados mediante la metodología determinística se estimó una emisión total de 13,386 Ton CO<sub>2</sub> generando un indicador de 0,5 Ton CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>, donde la mayor incidencia se dio en el alcance 3. Específicamente en los indicadores de emisión por materiales y emisión por transporte de materiales con una generación de 7,749 y 5,587 Ton CO<sub>2</sub> representando el 93% de las emisiones totales. Este resultado es determinante al permitir identificar un aspecto en el que se debe continuar investigando e implementando mejoras. Se hace referencia al flujo de los procesos de producción y su cadena de suministro.

Es prioritario poner en marcha estrategias que conduzcan al sector de la construcción a ser una industria más sostenible desde un contexto normativo y práctico que estimulen a todos los actores con influencia en la cadena de producción y suministro de materias primas a alinearse en la protección de los recursos disponibles. Los resultados de esta herramienta invitan a las gerencias de las compañías del sector construcción a tener conciencia de la huella generada al desarrollar proyectos inmobiliarios dentro de cualquier entorno y plantea la necesidad de mantener una industria que ha sido siempre atractiva por las grandes utilidades que puede brindar sin agredir el medio ambiente y su futuro.

El levantamiento de información necesaria para la estimación de huella de carbono embebida es un reto importante en las grandes organizaciones, dónde se evidencia un vacío importante en la trazabilidad del consumo energético para cada gran consumidor, la maquinaria utilizada en las actividades de movimiento de tierra y las características demográficas y de movilidad de los trabajadores tanto directos como indirectos. A lo largo del desarrollo de la herramienta se evidenció la relevancia que tiene la calidad de los datos disponibles, la cual permite una estimación cercana a las emisiones de GEI reales que se emitieron durante la ejecución del proyecto evaluado.

En este orden de ideas, es importante resaltar que solo el 8% de los proveedores analizados en el caso de estudio cuentan con declaración ambiental de producto, lo cual destaca la urgencia de promover y exigir desde el punto de vista normativo la adopción de DAPs entre los proveedores para mejorar la evaluación del impacto ambiental de los materiales y productos. Garantizar la certificación de DAPs por parte de los diferentes proveedores, permitirá a las constructoras tomar decisiones más informadas y sostenibles, reducir la huella de carbono de sus proyectos y alinearse mejor con los objetivos globales de sostenibilidad y mitigación del cambio climático.

De acuerdo con la incidencia de los materiales, es imperativa la necesidad de DAPs en materiales como acero, concreto, cobre y PVC los cuales generan el 74.01% de las emisiones totales por material ya sea por su peso total en el caso del acero y el concreto o bien tienen un factor de emisión muy elevado como el cobre y el PVC los cuales son extraídos de la literatura internacional debido a las dificultades mencionadas.

Los proveedores locales juegan un papel fundamental en la emisión de GEI, en el caso de estudio se evidenció que solo el 8.82% de los proveedores recorren distancias entre 0-5 km mientras que el 76.42% de ellos recorren distancias superiores a 20 km por trayecto, este indicador aportó el 38.9% de las emisiones totales de GEI generadas en el proyecto analizado. Este hallazgo genera una oportunidad importante para priorizar proveedores locales en la construcción de un proyecto inmobiliario es crucial para reducir la huella de carbono, principalmente debido a la reducción de emisiones de transporte al disminuir las distancias que los materiales deben recorrer, resultando en menores emisiones de gases de efecto invernadero.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los métodos de compensación para las emisiones de GEI y las restricciones de informaciones sobre los factores de captación en las especies de flora, es extremadamente necesario iniciar proyectos de investigación que aterricen los factores reales

para la mitigación de las emisiones de GEI, el análisis económico realizado por ambas estrategias demuestra la inviabilidad de realizar la siembra de especies de flora necesarias que tenga como objetivo fundamental la mitigación del cambio climático, razón por la cual la adquisición de bonos de carbono resulta ser más efectiva representando solo el 4% del costo directo del proyecto, como se evidenció en el estudio de caso.

## **5.2 Recomendaciones para futuros trabajos.**

Para abordar eficazmente la estimación, medición y mitigación de la huella de carbono generada por proyectos de construcción en el sector inmobiliario en Colombia, es fundamental establecer metodologías estandarizadas y adaptadas al contexto local. Esto implica desarrollar un marco claro que defina los alcances del cálculo de emisiones, así como los factores de emisión específicos para el país, considerando la diversidad de prácticas constructivas y condiciones climáticas regionales. Además, es crucial la recopilación de datos precisos y locales, mediante colaboraciones estratégicas con entidades gubernamentales, industria privada y académica. Esta información servirá de base para la creación de herramientas de software y bases de datos que faciliten el cálculo preciso y accesible de la huella de carbono, asegurando que los constructores puedan evaluar correctamente el impacto ambiental de sus proyectos desde las etapas iniciales de diseño hasta la ejecución.

Otro aspecto clave es la promoción de declaraciones ambientales de producto (DAP) para los materiales de construcción utilizados en Colombia. Estas declaraciones proporcionarán información crucial sobre el ciclo de vida de los materiales, incluyendo sus emisiones de gases de efecto invernadero, permitiendo a los desarrolladores tomar decisiones informadas que minimicen la huella de carbono de sus construcciones. Asimismo, la investigación sobre la captación de carbono por especies arbóreas locales es esencial para entender y aprovechar el potencial de los bosques colombianos como sumideros naturales de carbono. Estudios detallados sobre la eficacia de diferentes especies en la captación y almacenamiento de carbono ayudarán a integrar estrategias de reforestación y manejo forestal sostenible como parte integral de los proyectos de mitigación climática en el sector inmobiliario.

Para avanzar en el campo de la huella de carbono, es crucial realizar investigaciones complementarias que profundicen en el impacto de intervenciones sostenibles específicas. Estudios detallados podrían evaluar cómo la adopción generalizada de tecnologías limpias o la

implementación de políticas de compensación de carbono afectan tanto el entorno natural como el tejido socioeconómico. Además, es fundamental explorar los aspectos sociales y económicos de estas estrategias, incluyendo análisis exhaustivos de coste-beneficio y la equidad en la distribución de cargas y beneficios. Colaboraciones interdisciplinarias entre expertos en ingeniería, economía, y políticas públicas son esenciales para abordar de manera integral estos desafíos. Estas investigaciones no solo deben enfocarse en cuantificar las reducciones de emisiones, sino también en comprender cómo estas medidas pueden influir en los comportamientos individuales y organizacionales hacia prácticas más sostenibles, promoviendo así un cambio cultural que apoye la transición hacia una economía baja en carbono.

Finalmente, se recomienda principalmente al sector productivo de la construcción, como a todos los motores productivos de la región y del mundo, a invertir en iniciativas como esta que sensibilizan sobre el impacto que se da al desarrollar proyectos inmobiliarios que responden esencialmente a dinámicas de negocio o de industria. Tener al alcance un resultado como el que se obtuvo con el desarrollo de esta herramienta, permitirá construir soluciones y estrategias efectivas alrededor de la complejidad que representa mantener en viabilidad a uno de los sectores que más dinamiza la economía y, fundamentalmente, garantizar la disponibilidad de recursos para las generaciones venideras, para el futuro.

## 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Mardiana, A. (2015). Building Energy Consumption and Carbon dioxide Emissions: Threat to Climate Change. *Earth Science & Climatic Change*. S3. Recuperado de: <https://www.omicsonline.org/open-access/building-energy-consumption-and-carbon-dioxide-emissions-threat-to-climate-change-2157-7617-S3-001.php?aid=53007>

Ley 1715 de 2014, Diario Oficial No. 49.150, Congreso de la República de Colombia. (2014). <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=56789>

Ministerio de Minas y Energía de Colombia. (2015). Por la cual se establecen los requisitos de eficiencia energética para edificaciones nuevas (Resolución 0549 de 2015). [https://www.minenergia.gov.co/documents/Resolucion\\_0549\\_2015.pdf](https://www.minenergia.gov.co/documents/Resolucion_0549_2015.pdf)

Acuerdo 0575 de 2023, Acuerdo 2023, Consejo de Santiago de Cali. (2023). Recuperado de: <https://www.concejodecali.gov.co/documentos/5008/acuerdos023/#:~:text=Descripci%C3%B3n,Acuerdo%20No.,y%20se%20adoptan%20otras%20disposiciones.>

Linares-Rodriguez, M.C. (2023). Climate action information disclosure in Colombian companies: A regional and sectorial analysis. *ELSEVIER*. 51. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212095523002201>

Estokova, A., Vilcekova, S., Porhincak, M., 2017. Analyzing embodied energy, global warming and acidification potentials of materials in residential buildings. *Procedia Eng.* 180, 1675–1683.

Roh, S., Tae, S., 2017. An integrated assessment system for managing life cycle CO<sub>2</sub>emissions of a building. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73, 265–275.

Atmaca, A, Atmaca, N. (2022). Carbon footprint assessment of residential buildings, a review and a case study in Turkey. *Journal of cleaner production.* 340.

Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (2022). Impacto del proyecto acelerador de edificaciones neto cero carbono. <https://www.cccs.org.co/wp/mitigacion/impacto-del-proyecto-aencc/>

Al-Omari, O. (2023). Evaluating Carbon Footprint in the Life Cycle Design of Residential Concrete Structures in Jordan. *Civil Engineering Journal*. Vol 9. No.07. Recuperado de: <https://www.civilejournal.org/index.php/cej/article/view/4279>

Roppo, M. (2023). Considering embodied CO2 emissions and carbon compensation cost in life cycle cost optimization of carbon-neutral building energy systems. *ELSEVIER*. Vol 101. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0195925523000665>

CEPAL, Chenost, C., & Lenne, P. (2010). Metodologías de cálculo de la huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina. Recuperado de: <https://www.cepal.org/es/publicaciones/37288-metodologias-calculo-la-huella-carbono-sus-potenciales-implicaciones-america>.

Environmental Management. Life Cycle Assessment Requirements and Guidelines. ISO: 14044 Geneva, Switzerland, 2006.

UNEP/SETAC. Guidance on Organizational Life Cycle Assessment; UNEP/SETAC: Paris, France, 2015.

Pedreño, A. (2014). Desarrollo de una aplicación para el cálculo de la huella de carbono en proyectos de construcción. Máster en energías renovables.

Espíndola, C, Valderrama, J. (2017). *Huella de Carbono: Cambio Climático, Gestión Sustentable y Eficiencia Energética* - César Espíndola, José Valderrama - Google Libros. Recuperado de: [https://www.google.com.co/books/edition/Huella\\_de\\_Carbono/8JBxDwAAQBAJ?hl=es419&gbpv=1&printsec=frontcover](https://www.google.com.co/books/edition/Huella_de_Carbono/8JBxDwAAQBAJ?hl=es419&gbpv=1&printsec=frontcover).

Rivera, F. (2020). Carbono incorporado: estimación de emisiones asociadas a nuevas viviendas de interés social y prioritario en Bogotá, 2020-2030. Máster en Ingeniería Civil.

Chen, W., Yang, S., Zhang, X., Jordan, N. D., & Huang, J. (2022). Embodied energy and carbon emissions of building materials in China. *Building and Environment*, 207, 108434. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108434.

Evangelista, P. P. A., Kiperstok, A., Torres, E. A., & Gonçalves, J. P. (2018). Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). *Construction and Building Materials*, 169, 748–761. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.045.

Romero, M.C. (2020). Metodologías para la estimación de la huella de CO2 en instituciones de educación superior: explorando un modelo para implementar en la Escuela. *Escuela Colombiana de Ingeniería*. 118, pp 43-52. Recuperado de: [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1898/Metodologías%20para%20la%20estimación.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1898/Metodologías%20para%20la%20estimación.pdf?sequence=1&isAllowed=y)"

United Nations (2013). *Global Warming Potentials*. United Nation Framework Convention on Climate Change. Université Paris 1 Panthéon-Sorbonne (2009). *Rapport Bilan Carbone*. París.

Fernanda, R., Nelson, S., & Souza, M. De. (2021). Life cycle energy assessment and carbon dioxide emissions of wall systems for rural houses. *Ambiente Construido*, 21(1), 37– 50. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1590/s1678-86212021000100492>

Cabeza, L. F., et al (2021). Embodied energy and embodied carbon of structural building materials: Worldwide progress and barriers through literature map analysis. *Energy and Buildings*, 231, 110612. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110612>

Kumanayake, R. (2018). Assessment of material related embodied carbon of an office building in Sri Lanka. *Energy & Buildings*. 116, p 250-257. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778817329857?via%3Dihub>

Wanlin , C. et al (2022). Embodied energy and carbon emissions of building materials in China. *Energy & Buildings*. 207. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132321008313?via%3Dihub>

Pacheco-Torres, R. et al (2014). Analysis of CO2 emissions in the construction phase of single-family detached houses. *Sustainable Cities and Society*. 12, p 63-68. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670714000055>

Xiaocun, Z. et al (2015). Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China. *Building and Environment*. 86, p 89 - 97. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132315000049>

Luz Sachy, P. Ana Luisa, R. Camila José, R. (2022) Diseño de metodología para el cálculo de huella de carbono. Universidad del Norte, Barranquilla.

William, S. (2021) Evaluación ambiental de dos sistemas constructivos en viviendas de interés social: estudio de caso (Maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Cali.

Luo, Z, et al (2019). A Quantitative Process-Based Inventory Study on Material Embodied Carbon Emissions of Residential, Office, and Commercial Buildings in China. *Journal of Thermal Science*. 28, 1236 - 1251. Recuperado de: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11630-019-1165-x>

Grupo Argos, (2022). Reporte integrado 2022. Taller de edición. Recuperado de: <https://sostenibilidad.argos.co/Reportes-integrados>.

IPCC. (2021). Climate change synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Recuperado de: <https://archive.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

Grupo Bancolombia. (2023). Así está el sector de la construcción en el PIB de Colombia para el 2023. Actualidad económica y sectorial 2023. Recuperado de: <https://www.bancolombia.com/empresas/capital-inteligente/actualidad-economica-sectorial/pib-construccion-colombia#:~:text=A%20fin%20de%20cuentas%2C%20la,%2C6%20%25%20del%20PIB%20colombiano>

Vigilizzo, F. E. (2010). *Huella de carbono, ambiente y agricultura en el Cono Sur de Suramérica* - Google Libros. Recuperado de: [https://books.google.com.co/books?id=TIyUlyosD1sC&printsec=frontcover&dq=huella+de+carbono&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi83J\\_b5JPgAhXLneAKHcggAukQ6AEIKTAA#v=onepage&q=huella+de+carbono&f=false](https://books.google.com.co/books?id=TIyUlyosD1sC&printsec=frontcover&dq=huella+de+carbono&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi83J_b5JPgAhXLneAKHcggAukQ6AEIKTAA#v=onepage&q=huella+de+carbono&f=false)

ONU. (1992). Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Recuperado de: <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>

Ham, J. van. (2000). Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases: scientific understanding, control, and implementation: proceedings of the second international symposium, Noordwijkerhout, the Netherlands, 8-10 September 1999. Kluwer Academic Publishers. Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/publication/non-co2-greenhouse-gases-scientific-understanding-control-and-implementation/>

Durkee, J. (2006). US and global environmental regulations. Management of Industrial Cleaning Technology and Processes. Pg. 43-96. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080448886500168>

Romero, M. Salazar, J. Hoess, T. (2020). Metodologías para la estimación de la huella de CO<sub>2</sub> en instituciones de educación superior: explorando un modelo para implementar en la Escuela. Revista de la escuela colombiana de ingenieros. 118. Recuperado de: [http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones\\_revista](http://www.escuelaing.edu.co/es/publicaciones_revista).

Dias, A. Arroja, L. (2012). Comparison of methodologies for estimating the carbon footprint - case study of office paper. Journal of Cleaner Production. 24. Recuperado de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652611004409>.

World Resources Institute (2001). Green House Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard. Washington, D.C.: WRI. Recuperado de <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>.

Spannagle, M. (2003). Ecologia.org. Comparison of ISO 14064, Part 1, and the GHG Protocol Corporate Module. Recuperado de: <https://www.ecologia.org/ems/ghg/news/cop9/comparison.html>.

Foro económico mundial, A. (2022). La compensación de emisiones de carbono, y por qué no podemos seguir ignorándola. Natura and biodiversity. Recuperado de: <https://es.weforum.org/agenda/2022/11/explicado-la-compensacion-de-emisiones-de-carbono-y-por-que-no-podemos-seguir-ignorandola/>

Grau, M. (2022). Los créditos por compensaciones de emisiones de co2 a la hora de «descarbonizarse»: el complejo debate mundial sobre el régimen tributario aplicable a los carbon ofset credits. Universidad complutense de Madrid.

West, P, et al (2020). Overstated carbon emission reductions from voluntary REDD+ projects in the Brazilian Amazon. Stanford University. Recuperado de: <https://www.pnas.org/doi/pdf/10.1073/pnas.2004334117>.

Vidal, A, et al (2021). Quantification of CO 2 emission reductions from energy efficiency actions and solar photovoltaic generation at the Federal Institute of Education, Science, and Technology of Goiás . 19 th International Conference on Renewable Energies and Power Quality. Recuperado de: <https://www.icrepq.com/icrepq21/209-21-vidal.pdf>

Mattinzioli, T, et al (2022). A critical review of life cycle assessment benchmarking methodologies for construction materials . Sustainable Materials and Technologies. 33. Recuperado de: <https://iris.unipa.it/bitstream/10447/595113/2/Mattinzolit%20et%20al%202022.pdf>

ISO. (2013). ISO 14067:2013 Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication. International Organization for Standardization, 64.

Muñoz, C., & Quiroz, F. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. *Hábitat Sustentable*, 4(2), 16–25.

Jiménez, L., De la Cruz, J., Carballo, A., & Domench, J. (2010). Enfoques metodológicos para el cálculo de la Huella de Carbono. *Observatorio de La Sostenibilidad En España*, 60. [http://www.carbonfeel.org/Carbonfeel\\_2/Bitacora/Entradas/2011/9/15\\_Informe\\_Enfoques\\_metodologicos\\_para\\_el\\_calculo\\_de\\_la\\_Huella\\_de\\_Carbono\\_del\\_Isntituo\\_de\\_la\\_Sostenibilidad\\_en\\_Espana\\_files/Informe\\_OSE.pdf](http://www.carbonfeel.org/Carbonfeel_2/Bitacora/Entradas/2011/9/15_Informe_Enfoques_metodologicos_para_el_calculo_de_la_Huella_de_Carbono_del_Isntituo_de_la_Sostenibilidad_en_Espana_files/Informe_OSE.pdf)

Álvarez, S., Sánchez, A. R., Olalla, A. R., Avilés, C., & López, M. (2020). Conceptos básicos de la huella de carbono. PDF.

CEPAL. (2013). Panorama del cambio climático en Colombia. In *Serie Medio Ambiente y Desarrollo*. <https://doi.org/10.13043/dys.30.1>

Méndez, T. D. R., & Burgos, A. (2008). Análisis del impacto ambiental asociado a los materiales de construcción empleados en las viviendas de bajo coste del programa 10x10. *Informes de la construcción*, 60(509), 25–34.

Freire Guerrero, A., & Marrero, M. (2015). Evaluación a través del presupuesto de la energía incorporada al proyecto de edificación. *Hs*, 5(1), 54–63.

## 7 ANEXOS

### *Anexo 1 Presupuesto del estudio de caso*

<b>Capítulo</b>	<b>Presupuestado</b>	<b>Proyectado</b>	<b>Consumido</b>
1 localización y replanteo	34,074,237.58	12,485,731.11	12,485,731.10
2 movimiento de tierras	397,565,763.29	379,469,215.01	379,469,215.07
3 cimentación	1,485,047,800.37	1,892,611,879.80	1,892,611,879.85
4 estructura	9,223,076,883.68	10,268,140,806.04	10,258,957,762.00
5 Mamposteria	508,327,782.32	563,993,379.96	563,993,380.00
6 sistemas livianos	676,615,715.91	833,851,424.56	752,590,308.06
7 prefabricados/accesorios	277,315,841.71	164,900,779.58	161,647,141.31
8 repellos	165,910,618.18	172,283,356.89	161,524,691.32
9 Inst. Sanitarias	936,656,029.83	930,442,703.76	888,168,329.37
11 Inst. Hidraulicas a. fria	246,174,878.30	288,867,852.36	261,934,239.04
12 Inst. Hidraulicas a. caliente	105,330,039.23	62,746,032.42	54,320,961.79
13 Inst. Electricas internas	1,616,472,798.13	1,814,063,680.26	1,698,644,202.45
14 cubiertas	1,196,923,240.25	1,408,524,702.85	1,305,837,343.25
15 cielos falsos	421,584,899.64	273,216,941.73	256,222,988.29
16 pisos	1,586,987,116.61	1,951,179,723.05	1,771,292,758.49
17 enchapes	132,396,091.33	408,338,055.48	311,313,078.15
18 impermeabilizaciones	418,336,959.67	350,658,213.19	299,489,348.09

<b>Capítulo</b>	<b>Presupuestado</b>	<b>Proyectado</b>	<b>Consumido</b>
19 pinturas	2,080,214,143.88	2,781,604,749.54	2,651,187,263.50
20 Ventanería aluminio y pvc	1,324,925,061.82	1,342,985,367.82	1,260,464,152.50
21 carpintería metálica /aluminio	710,402,954.59	854,364,171.66	732,355,258.66
22 Carpinteria de madera	1,005,965,888.31	2,118,520,410.76	1,874,726,451.20
23 cerraduras y accesorios	68,988,360.00	86,979,904.48	72,630,739.18
24 varios obra negra /acabados	118,796,096.92	298,765,571.16	256,441,900.10
25 porcelana sanitaria	341,038,180.90	619,968,950.03	484,470,496.16
26 aparatos de cocina y oficios	281,610,198.10	507,615,421.70	418,510,056.63
27 equipos especiales / transportes	1,082,528,956.53	832,766,901.20	630,278,091.50
29 aseo y detallado	625,165,610.21	864,937,300.21	734,513,419.18
30 preliminares	471,461,467.80	733,181,163.82	672,307,667.00
31 zonas verdes (parques)	130,116,441.28	133,983,725.41	128,876,532.49
32 Vias, andenes y sardineles	1,092,377,975.80	1,235,291,409.06	1,191,645,899.44
34 parqueaderos VISITANTES	81,152,708.25	78,894,884.65	78,894,884.66
36 Inst. Electricas z. comun	2,725,803,603.21	2,675,233,890.78	2,360,094,319.52
37 red alcant. Sanitario interno	163,037,983.07	193,399,286.35	185,066,210.51
38 red alcant. Pluvial interno	268,908,906.09	269,163,573.00	241,569,178.16
40 red de acueducto interna	300,433,949.38	309,683,284.91	274,630,537.20
41 red contra incendio	294,540,000.65	427,828,785.16	324,846,036.68

<b>Capítulo</b>	<b>Presupuestado</b>	<b>Proyectado</b>	<b>Consumido</b>
43 red de gas	498,167,426.60	376,639,953.02	324,712,678.58
44 tanque de almacenamiento	552,906,943.46	503,718,979.96	503,718,979.81
46 Portería y uar	220,399,785.80	280,944,562.56	279,020,477.15
47 Salon social	296,419,534.14	411,999,684.06	411,551,631.23
48 piscinas	478,581,941.20	534,755,101.07	529,388,944.18
49 otras zonas comunes	216,826,384.85	224,463,591.77	201,986,564.28
50 cerramientos	346,695,296.80	431,806,066.14	393,374,646.41
51 varios urbanismos	61,477,157.79	51,789,675.76	48,232,682.20
53 Vías externas	2,876,428,245.78	2,926,240,193.01	3,076,239,800.03
60 gastos generales	1,377,586,633.49	2,485,684,280.45	2,225,735,121.97
62 vivienda modelo	254,158,631.00	243,921,384.00	243,921,384.00
63 alquiler y compra de equipo	1,719,083,448.13	2,266,174,655.84	1,861,216,470.74
70 administración	1,408,778,784.00	2,783,558,757.57	2,535,298,238.92
132 honorarios	0	625,800,697.76	544,874,348.90
135 honorarios diseño	222,666,000.00	4,601,084,036.00	45,739,661.75
<b>Totales</b>	<b>43,126,441,395.86</b>	<b>56,889,524,848.72</b>	<b>48,829,024,082.05</b>

Anexo 2 Emisión de GEI por trabajador indirecto.

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Kelly Dayan Echeverry Murillo	Motocicleta < 125 CC	24.7	0.000818805	0.24400
Sherly Daniela marin Barona	Motocicleta < 125 CC	22.9	0.000759135	0.22622
Cristian Fernando Ortiz Sánchez	Motocicleta > 125 CC	37.2	0.000197309	0.05880
José Luis Riascos	Motocicleta > 125 CC	26.9	0.000142678	0.04252
Patricia Ordoñez	Motocicleta < 125 CC	26.1	0.000865215	0.25783
Valentina Marín	Motocicleta < 125 CC	23.5	0.000779025	0.23215
Heiler Asprilla	Motocicleta < 125 CC	25.1	0.000832065	0.24796
Andrea Vivas	Transporte público	4	0.00015912	0.04742
Edilberto Bez	Transporte público	27.5	0.00109395	0.32600
Diego Figueroa	Motocicleta < 125 CC	8.3	0.000275145	0.08199
Ayendis Duran	Caminando	2.7	0	0.00000
Jose Villasmil	Transporte público	12.5	0.00049725	0.14818
Darwin David Ocoro	Caminando	4.1	0	0.00000
Juan David Montaña	Transporte público	26.1	0.001038258	0.30940
Adrián Paz	Motocicleta > 125 CC	25.4	0.000134722	0.04015
Janer Ocoro	Transporte informal	36	0.00023868	0.07113
Hugo Chaves	Motocicleta < 125 CC	19	0.00062985	0.18770
Guisel Tatiana Garcia	Transporte informal	21.3	0.000141219	0.04208
Gerardo Pineda	Transporte informal	4.1	0.000027183	0.00810
Edward Buritica	Motocicleta > 125 CC	26.7	0.000141617	0.04220
Paola Andrea Medina	Motocicleta < 125 CC	22.4	0.00074256	0.22128
Alcides González	Motocicleta < 125 CC	20.7	0.000686205	0.20449
Walter Montaña	Transporte informal	23.8	0.000157794	0.04702
Marcelo aquiñones	Transporte informal	22.8	0.000151164	0.04505

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Jhon Hiber Longa	Transporte informal	23.8	0.000157794	0.04702
Luis Fernando Rada	Transporte informal	4.1	0.000027183	0.00810
Leiva Camacho	Transporte informal	17	0.00011271	0.03359
Marlon Stiven Arboleda Castro	Motocicleta < 125 CC	19.6	0.00064974	0.19362
Adrián Prieto	Motocicleta < 125 CC	4.1	0.000135915	0.04050
Carlos quiñones	Transporte informal	25.6	0.000169728	0.05058
Victor Itriago	Bicicleta	5.1	0	0.00000
Julio Cesar Garcia	Transporte informal	17.5	0.000116025	0.03458
Aldemar lucumi	Motocicleta < 125 CC	4.4	0.00014586	0.04347
Jose Taju	Transporte informal	22.3	0.000147849	0.04406
Jose Nilson Caicedo	Bicicleta	23.8	0	0.00000
Juan Carlos Arroyo	Transporte público	4	0.00015912	0.04742
Freddy Portocarrero	Transporte informal	23.8	0.000157794	0.04702
Luis Espinoza	Transporte informal	26.4	0.000175032	0.05216
Ivan Uribe	Motocicleta > 125 CC	26.7	0.000141617	0.04220
Jose Rosario	Motocicleta < 125 CC	23.9	0.000792285	0.23610
Carlos Mario Guerrero	Motocicleta < 125 CC	64.2	0.00212823	0.63421
Dagoberto ortiz	Motocicleta < 125 CC	8.3	0.000275145	0.08199
Andrés Quiñones	Transporte público	23.8	0.000946764	0.28214
Henry delgado	Transporte público	24.1	0.000958698	0.28569
Hernando godoy	Transporte público	28.5	0.00113373	0.33785
Ricardo Fajardo	Transporte público	18.4	0.000731952	0.21812
Jeison Cornejo	Caminando	3.7	0	0.00000
Cesar Humberto cabezas	Motocicleta < 125 CC	21.6	0.00071604	0.21338
Willinton Carabali	Transporte informal	26.1	0.000173043	0.05157

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Tomas Galvan	Motocicleta < 125 CC	8.9	0.000295035	0.08792
Yair Garces	Transporte informal	26.3	0.000174369	0.05196
Elodies sandoval	Motocicleta > 125 CC	27.1	0.000143738	0.04283
Dani carabali	Motocicleta < 125 CC	25.6	0.00084864	0.25289
Gabriel martinez	Motocicleta < 125 CC	23.8	0.00078897	0.23511
Jorge Barrera	Caminando	3.7	0	0.00000
Jair Mondragon	Motocicleta > 125 CC	23.9	0.000126766	0.03778
Heriberto cabrera	Bicicleta	21.3	0	0.00000
Jose Sevillano	Caminando	4.1	0	0.00000
Diego Micolta	Transporte público	7.6	0.000302328	0.09009
Alex verdore	Caminando	4.1	0	0.00000
Jeferson Horta	Motocicleta < 125 CC	13.7	0.000454155	0.13534
Juan carlos micolta	Bicicleta	22.6	0	0.00000
Jose Alonso lopez	Bicicleta	4.1	0	0.00000
Juan carlos ortiz	Transporte informal	13	0.00008619	0.02568
Jose jonathan callon diaz	Transporte informal	38.3	0.000253929	0.07567
Osori huila	Transporte informal	3.1	0.000020553	0.00612
Fernando gonzales	Motocicleta < 125 CC	23.3	0.000772395	0.23017
Harlem enrique cortez	Transporte informal	19.9	0.000131937	0.03932
Jhony ferli moreno	Motocicleta < 125 CC	20.5	0.000679575	0.20251
Manuel pupiales	Motocicleta > 125 CC	17.1	9.06984E-05	0.02703
Robinson carabali	Transporte público	25.8	0.001026324	0.30584
Fredy tobon ossa	Transporte informal	16.8	0.000111384	0.03319
Óscar quintero	Motocicleta < 125 CC	474	0.0157131	4.68250
Fredy portocarrero	Transporte informal	17.1	0.000113373	0.03379
Gerardo jhoemil	Bicicleta	15	0	0.00000
Henry varona talanga	Transporte informal	29.8	0.000197574	0.05888
Orlando noel	Bicicleta	3.8	0	0.00000

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Fernando tibuiza	Transporte público	22.5	0.00089505	0.26672
Jesus david riascos	Transporte informal	25.7	0.000170391	0.05078
Edgar peñuela	Motocicleta < 125 CC	21.8	0.00072267	0.21536
Gustavo naranjo	Motocicleta < 125 CC	3.8	0.00012597	0.03754
Nelson celorio	Transporte informal	22.6	0.000149838	0.04465
Diego reginfo	Motocicleta < 125 CC	19.9	0.000659685	0.19659
Acosta evimael	Bicicleta	4.4	0	0.00000
Adrian carrasco	Motocicleta > 125 CC	3.6	1.90944E-05	0.00569
Guillermo torres	Motocicleta > 125 CC	12.7	6.73608E-05	0.02007
Pepito Pérez	Motocicleta > 125 CC	18.5	0.000098124	0.02924
Jose fernandez hernandez	Motocicleta < 125 CC	26.5	0.000878475	0.26179
Yoni hernan cortes	Transporte informal	29.2	0.000193596	0.05769
Luis gullermo cortes	Transporte informal	22.9	0.000151827	0.04524
Pedro tiberio	Motocicleta < 125 CC	22.9	0.000759135	0.22622
Dario sabogal	Motocicleta > 125 CC	55.4	0.000293842	0.08756
Eduar alejandro alvarado	Motocicleta > 125 CC	24.6	0.000130478	0.03888
Rider lopez	Bicicleta	19	0	0.00000
Rikelmer oliveros	Motocicleta < 125 CC	24.1	0.000798915	0.23808
Juan carlos villafañe	Bicicleta	13	0	0.00000
Caños barrios	Caminando	26.4	0	0.00000
Jose barrios	Caminando	26.4	0	0.00000
Gehova balanta	Transporte informal	3.8	0.000025194	0.00751
Carlos hernando	Motocicleta > 125 CC	8.5	0.000045084	0.01344
Angel antonio	Transporte informal	27.5	0.000182325	0.05433
Victor andrade	Motocicleta > 125 CC	7.3	3.87192E-05	0.01154
Katherine caicedo	Motocicleta > 125 CC	20.1	0.00010661	0.03177

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Kuan camilo ibarguen	Motocicleta > 125 CC	8.6	4.56144E-05	0.01359
Jesus pachajoa	Motocicleta < 125 CC	26.8	0.00088842	0.26475
Julio cesar largcha	Transporte informal	27	0.00017901	0.05334
Johan david mosquera	Motocicleta < 125 CC	4.2	0.00013923	0.04149
Victor julio ramirez	Motocicleta < 125 CC	55	0.00182325	0.54333
Segundo leonidas	Motocicleta < 125 CC	23.6	0.00078234	0.23314
Haime riascos	Motocicleta < 125 CC	22.8	0.00075582	0.22523
Fernando santana	Motocicleta < 125 CC	26.6	0.00088179	0.26277
Eulides renteria	Transporte informal	22.9	0.000151827	0.04524
Aldrin jair segura	Motocicleta < 125 CC	24.2	0.00080223	0.23906
Fernando santana	Motocicleta < 125 CC	23	0.00076245	0.22721
Pedro alomia	Motocicleta < 125 CC	23.1	0.000765765	0.22820
Luis correa	Motocicleta > 125 CC	26.1	0.000138434	0.04125
Andres zuñiga	Bicicleta	3.7	0	0.00000
Yeisob manuel tordecilla	Caminando	3.7	0	0.00000
Aldair gamarra	Caminando	3.7	0	0.00000
Gayder ivan salas	Caminando	3.7	0	0.00000
Edier steven marilanda	Motocicleta < 125 CC	4	0.0001326	0.03951
Diego marulanda	Motocicleta < 125 CC	4	0.0001326	0.03951
Jorge gutierrez	Motocicleta < 125 CC	26.8	0.00088842	0.26475
Diego quintero	Motocicleta < 125 CC	23.6	0.00078234	0.23314
Jhon sebastian lopez	Transporte informal	3.9	0.000025857	0.00771
Luis castillo	Transporte informal	24.5	0.000162435	0.04841
Ivines garcias	Transporte informal	22.7	0.000150501	0.04485
Luis carlos romero	Motocicleta < 125 CC	4.6	0.00015249	0.04544

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Harrinson arango	Motocicleta < 125 CC	22.1	0.000732615	0.21832
John hernande	Motocicleta < 125 CC	22.8	0.00075582	0.22523
Jise miller caicedo	Motocicleta < 125 CC	25.8	0.00085527	0.25487
Jhon ocampo	Motocicleta < 125 CC	20.3	0.000672945	0.20054
Ivab baquero	Automovil	10.6	5.62224E-05	0.01675
Decio valencia	Motocicleta < 125 CC	28.2	0.00093483	0.27858
Lluliab alesi landazuri	Transporte informal	26.4	0.000175032	0.05216
Ocuber banguera	Transporte informal	21.2	0.000140556	0.04189
Hubert ibarguen	Motocicleta < 125 CC	25.1	0.000832065	0.24796
Carlos quiñones	Motocicleta < 125 CC	24.2	0.00080223	0.23906
Pedro luis ceballos	Transporte informal	29.2	0.000193596	0.05769
Jaider felipe amu	Transporte público	4.1	0.000163098	0.04860
Alfredo potes	Motocicleta < 125 CC	24.2	0.00080223	0.23906
Carlos alverto rivas	Transporte público	24.4	0.000970632	0.28925
Ulfran molina	Transporte público	24.4	0.000970632	0.28925
Steven montoya bolaños	Motocicleta > 125 CC	21.2	0.000112445	0.03351
Jhon fredy benitez	Motocicleta < 125 CC	55.7	0.001846455	0.55024
Luis alejandro vallecilla	Motocicleta < 125 CC	55.7	0.001846455	0.55024
Yesmi gurrero	Transporte público	16.7	0.000664326	0.19797
Milton estiven besoya	Motocicleta < 125 CC	54.7	0.001813305	0.54036
Fernando reinoza river	Transporte público	25.2	0.001002456	0.29873
Jose domingo castro	Transporte público	27.3	0.001085994	0.32363
Carlos restrepo	Motocicleta < 125 CC	27.2	0.00090168	0.26870
Jairo caicedo	Motocicleta < 125 CC	24.1	0.000798915	0.23808

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Cristian sinisterra	Transporte informal	28	0.00018564	0.05532
Pedro toro	Bicicleta	30.6	0	0.00000
Carlos quiñones	Motocicleta > 125 CC	27.4	0.00014533	0.04331
Jose luis arboleda	Transporte informal	25.9	0.000171717	0.05117
Haminton burbano	Transporte informal	41.6	0.000275808	0.08219
Michael salazar	Motocicleta > 125 CC	20.1	0.00010661	0.03177
Eduar muñoz	Transporte informal	4	0.00002652	0.00790
John hernande	Motocicleta < 125 CC	22.5	0.000745875	0.22227
Jise miller caicedo	Motocicleta < 125 CC	23.8	0.00078897	0.23511
Jhon ocampo	Motocicleta > 125 CC	3.6	1.90944E-05	0.00569
Ivab baquero	Motocicleta > 125 CC	8.4	4.45536E-05	0.01328
Decio valencia	Transporte informal	4.4	0.000029172	0.00869
Lluliab alesí landazuri	Motocicleta > 125 CC	20.6	0.000109262	0.03256
Ocuber banguera	Bicicleta	27	0	0.00000
Hubert ibarguen	Caminando	3.5	0	0.00000
Carlos quiñones	Bicicleta	4.1	0	0.00000
Pedro luis ceballos	Bicicleta	4.2	0	0.00000
Jaider felipe amu	Motocicleta > 125 CC	54.2	0.000287477	0.08567
Alfredo potes	Transporte informal	18.1	0.000120003	0.03576
Carlos alverto rivas	Transporte informal	30.9	0.000204867	0.06105
Ulfran molina	Motocicleta > 125 CC	21.9	0.000116158	0.03461
Steven montoya bolaños	Motocicleta > 125 CC	12.1	6.41784E-05	0.01913
Jhon fredy benitez	Transporte informal	17.7	0.000117351	0.03497
Luis alejandro vallecilla	Motocicleta > 125 CC	27	0.000143208	0.04268
Yesmi gurrero	Transporte informal	20.6	0.000136578	0.04070
Milton estiven besoya	Transporte informal	23	0.00015249	0.04544

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Fernando reinoza river	Transporte informal	24.5	0.000162435	0.04841
Jose domingo castro	Transporte informal	26.2	0.000173706	0.05176
Carlos restrepo	Motocicleta < 125 CC	24.7	0.000818805	0.24400
Jairo caicedo	Motocicleta < 125 CC	22.9	0.000759135	0.22622
Cristian sinisterra	Motocicleta > 125 CC	37.2	0.000197309	0.05880
Pedro toro	Motocicleta > 125 CC	26.9	0.000142678	0.04252
Carlos quiñones	Motocicleta < 125 CC	26.1	0.000865215	0.25783
Jose luis arboleda	Motocicleta < 125 CC	23.5	0.000779025	0.23215
Haminton burbano	Motocicleta < 125 CC	25.1	0.000832065	0.24796
Michael salazar	Transporte público	4	0.00015912	0.04742
Eduar muñoz	Transporte público	27.5	0.00109395	0.32600
Harrinton camacho	Motocicleta < 125 CC	8.3	0.000275145	0.08199
Leiner arteaga	Caminando	2.7	0	0.00000
Victor hugo rivera	Transporte público	12.5	0.00049725	0.14818
Milyon varela	Caminando	4.1	0	0.00000
Luis alberto villa	Transporte público	26.1	0.001038258	0.30940
Wilinton velazque	Motocicleta > 125 CC	25.4	0.000134722	0.04015
Juan carlos zuares	Transporte informal	36	0.00023868	0.07113
Luis carvajal	Motocicleta < 125 CC	19	0.00062985	0.18770
Anibal Ortega	Transporte informal	21.3	0.000141219	0.04208
Jesus silva	Transporte informal	4.1	0.000027183	0.00810
Luis hernando naranjo	Motocicleta > 125 CC	26.7	0.000141617	0.04220
Pedro luis caballos	Motocicleta < 125 CC	22.4	0.00074256	0.22128
Kelly palomino	Motocicleta < 125 CC	20.7	0.000686205	0.20449
Jhon sanchez	Transporte informal	23.8	0.000157794	0.04702

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Eduar vivas	Transporte informal	22.8	0.000151164	0.04505
JHON CAICEDO MINA	Transporte informal	23.8	0.000157794	0.04702
Israel alvarado	Transporte informal	4.1	0.000027183	0.00810
Alexander silva	Transporte informal	17	0.00011271	0.03359
AQUILINO MIRANDA	Motocicleta < 125 CC	19.6	0.00064974	0.19362
Hilton cuero	Motocicleta < 125 CC	4.1	0.000135915	0.04050
Criastian ramirez	Transporte informal	25.6	0.000169728	0.05058
Michael salazar	Bicicleta	5.1	0	0.00000
Eduar muñoz	Transporte informal	17.5	0.000116025	0.03458
Harrinton camacho	Motocicleta < 125 CC	4.4	0.00014586	0.04347
Leiner arteaga	Transporte informal	22.3	0.000147849	0.04406
Victor hugo rivera	Bicicleta	23.8	0	0.00000
Milyon varela	Transporte público	4	0.00015912	0.04742
Luis alberto villa	Transporte informal	23.8	0.000157794	0.04702
Wilinton velazque	Transporte informal	26.4	0.000175032	0.05216
Juan carlos zuares	Motocicleta > 125 CC	26.7	0.000141617	0.04220
Luis carvajal	Motocicleta < 125 CC	23.9	0.000792285	0.23610
Anibal Ortega	Motocicleta < 125 CC	64.2	0.00212823	0.63421
Jesus silva	Motocicleta < 125 CC	8.3	0.000275145	0.08199
Luis hernando naranjo	Transporte público	23.8	0.000946764	0.28214
Pedro luis caballos	Transporte público	24.1	0.000958698	0.28569
Kelly palomino	Transporte público	28.5	0.00113373	0.33785
Jhon sanchez	Transporte público	18.4	0.000731952	0.21812
Eduar vivas	Caminando	3.7	0	0.00000
JHON CAICEDO MINA	Motocicleta < 125 CC	21.6	0.00071604	0.21338

<b>Trabajador</b>	<b>Tipo de vehiculo</b>	<b>Distancia (km)</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> trayecto</b>	<b>Ton CO<sub>2</sub> eq. total</b>
Israel alvarado	Transporte informal	26.1	0.000173043	0.05157
Alexander silva	Motocicleta < 125 CC	8.9	0.000295035	0.08792
AQUILINO MIRANDA	Transporte informal	26.3	0.000174369	0.05196
Hilton cuero	Motocicleta > 125 CC	27.1	0.000143738	0.04283
Criastian ramirez	Motocicleta < 125 CC	25.6	0.00084864	0.25289

*Anexo 3 Pesos de los materiales PVC y Acero galvanizado*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso (kg)</b>
12396	Grapa de fijación marca dehn ref. 204004	0.0082	5639	Codo pvc sanit. 2 x 90 cxc	0.15
4872	Niple galvanizado 1/2" x 4"	0.119	5637	Codo pvc sanit. 2 x 45 cxc	0.15
4837	Codo galvanizado 1/2 x 90	0.12	4714	Codo cpvc de 1/2" x 90	0.12
7007	Tapa registro 15x15	0.163	1262	Caja para llave lavadora	0.25
5000	Union galvanizada 1/2	0.12	5702	Tee pvc sanit. 4"	0.4
4992	Tuberia emt 1/2" x 3mts	1.29	5104	Tubo pvc conduit de 2" para placa	0.01
4767	Niple galvanizado 1/2" x 6	0.18	5492	Codo pvc presion 1/2x90	0.12
7102	Tuberia emt 1.1/2" x 3mts	1.37	5645	Codo pvc sanit. 3 x 90 cxc	0.18
7259	Caja fs 2x4 con 2 salidas de 1/2	3.9	5640	Codo pvc sanit. 2 x 90 cxc	0.15
7107	Grapa galvanizada doble ala 3/4"	0.015	5069	Curva pvc conduit 3/4x90 cxc	0.15
8497	Grapa universal de aluminio 100ka	0.055	5053	Adaptador conduit terminal 1/2	0.01
4981	Tubo galvanizado 1.1/2	0.012	5731	Tubo pvc sanit. 1-1/2"	3.86
9467	Tubo emt 2" x 3mts	1.52	5687	Sifon pvc sanit. 180°x2"	0.4
4978	Tubo galvanizado 1/2	0.019	5743	Yee pvc sanit. 4	0.72
14922	Grapa galvanizada doble ala 1/2"	0.018	5818	Tubo pvc biaxial 6" 200 psi	20.1
4991	Tuberia emt 1" x 3mts	1.24	5108	Tubo pvc conduit de 4"	7.4
7106	Grapa galvanizada doble ala 1.1/2"	0.025	5700	Tee pvc sanit. 2	0.4
14528	Caja galv. 8" x 8" tapa tipo intemperie	3.4	5748	Yee pvc san. Red. De 6x4	0.4
17489	Grapa bimetálica cobre - al dehn 460557	0.117	5054	Adaptador conduit terminal 3/4	0.01
16702	Grapa univ. De conexión dehn ref. 459139	0.117	5741	Yee pvc sanit. 2	0.4
4979	Tubo galvanizado 3/4	1.5	6459	Tubo novafort 6	1.99
5011	Union emt 1/2	0.036	3329	Tubo pvc biaxial 3" 200 psi	8.4
9469	Caja fs 2x4 con 4 salidas de 3/4"	3.9	12929	Tubo pvc conduit sch 40 3/4"	1.4
4861	Curva emt 1/2	0.1	5726	Tubo pvc ventilacion 2	3.18

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso (kg)</b>
7105	Union emt 1.1/2"	0.224	5696	Tapon de prueba 4" pvc sanitario	0.98
4854	Curva galvanizada 3/4"	0.194	5655	Codo pvc sanit. 6 x 90 cxc	1.15
11294	Caja fs 4x4 con 3 salidas de 3/4"	4.5	5643	Codo pvc sanit. 3 x 45 cxc	0.2
5010	Union emt 1	0.094	5728	Tubo pvc ventilacion 4	7.2
4860	Curva emt 1	0.34	5694	Tapon pvc de prueba 2" sanitario	0.1
4871	Niple galvanizado 1/2" x 3"	0.079	4709	Adaptador mac.cpvc 1/2	0.00899
8906	Curva emt 2"	1.37	5701	Tee pvc sanit. 3"	0.4
7697	Suplemento galvanizado 1/4	0.2	5549	Tee pvc presion red. 3/4x1/2	0.4
5009	Union emt 3/4	0.058	5058	Adaptador conduit terminal 2	0.1
8911	Union emt 2"	0.322	5113	Tubo pvc conduit 1.1/4"	1.2
1267	Caja galvanizada 4x4	0.175	5494	Codo pvc presion 3/4x90	0.4
5005	Union galvanizada 2"	0.485	5738	Union pvc sanit. 3	0.4
10780	Abrazadera tecna 2"	0.087	5437	Adaptador mac.pvc.pre. 1/2	0.4
5099	Tubo pvc conduit de 1/2"	0.45	4713	Codo cpvc de 1/2" x 45	0.04
6745	Tubo pvc sanitario novatec 4"	5.3	5463	Buje sold. Pvc pres. 3x2"	0.4
21095	Tubo pvc sanitario novatec 3"	4.54	5103	Tubo pvc conduit de 1.1/2" para placa	1.6
1261	Caja pvc 4x4	0.05	6413	Tubo pvc presion 4	16.998
5100	Tubo pvc conduit de 3/4"	0.19	5540	Tee pvc presion 1/2	0.028
4727	Tubo cpvc 1/2" rde. 11	0.264	5457	Buje sold. Pvc pres. 2x3/4"	0.06
5746	Yee pvc san. Red. De 4x2	0.4	5651	Codo pvc sanit. 4 x 90 cxc	0.2
5383	Tubo um de 4 " rde-21	1.71	5073	Curva pvc conduit 1.1/4x90 cxe	0.078
5727	Tubo pvc ventilacion 3	4.49	5653	Codo pvc sanit. 6x45 cxc	0.2
6744	Tubo pvc sanitario novatec 2"	4.2	5686	Sifon con tapon de limpieza de 2	0.3
6407	Tubo pvc presion 3/4"	1.14	5695	Tapon de prueba 3" pvc sanitario	0.5
1255	Caja pvc octagonal	0.047	6410	Tubo pvc presion 2"	4.866
20073	Tubo pvc conduit sch 40 2"	3.5	5079	Curva pvc conduit 3"x90 cxe	0.3

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Peso (kg)</b>
5705	Tee pvc sanit. Reduc. 3 x 2	0.4	5491	Codo pvc presion 1/2x45	0.24
5649	Codo pvc sanit. 4 x 45 cxc	0.2	7755	Tubo pvc biaxial 4" 200 psi	9.24
6406	Tubo pvc presion 1/2	1.15	4729	Union cpvc 1/2"	0.007
5067	Curva pvc conduit 1/2x90 cxe	0.12	5706	Tee pvc sanit. Reduc. 4 x 2	0.4
1260	Caja pvc 2x4	0.034	5493	Codo pvc presion 3/4x45	0.027
5105	Tubo pvc conduit de 3 " para placa	0.01	5693	Tapon de prueba 1.1/2" pvc sanit	0.017
11335	Suplemento pvc 1/4	0.001	5429	Adaptador hem.pvc.pre. 3/4	0.023
21096	Tubo pvc sanitario novatec 6"	5.7	5747	Yee pvc san. Red. De 4x3	0.4
5742	Yee pvc sanit. 3	0.4	5502	Codo pvc presion 2x90	
5446	Buje sold. Pvc pres. 3/4x1/2"	0.009	5101	Tubo pvc conduit de 1 " para placa	0.6
5579	Union pvc presion 3/4	0.1	5056	Adaptador conduit terminal 1.1/4	0.01
5441	Adaptador mac.pvc.pre.1.1/2	0.01	5578	Union pvc presion 1/2	0.2
5059	Adaptador conduit terminal 3	0.015	5691	Tapon pvc sanitario de 3 " prueba	0.5
5505	Codo pvc presion 3x45	0.2	5541	Tee pvc presion 3/4	0.3
5506	Codo pvc presion 3x90	0.2	5545	Tee pvc presion 2	0.4
5689	Sifon pvc sanit. 135°x3"	0.3			