	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Código F-AC- DBL-007	Fecha 08- 07-2021	Revisión B
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO		Pág. 1 (89)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Jhon Heder Gonzalez Romero		
FACULTAD	Facultad de ingeniería		
PLAN DE ESTUDIOS	Maestría En Construcción		
DIRECTOR	Magister. Javier Alfonso Cárdenas Gutiérrez Esp. Romel Jesús Gallardo Amaya		
TÍTULO DE LA TESIS	Metodología Para El Cálculo De La Huella De Carbono Generada En Proyectos De Edificaciones Verticales En La Ciudad De Cúcuta Norte De Santander		
TITULO EN INGLES	Methodology For The Calculation Of The Carbon Footprint Generated In Vertical Building Projects In The City Of Cúcuta, Norte De Santander.		
RESUMEN (70 palabras)			
El ciclo de vida de los edificios es más complejo que el de otros productos, ya que involucra los efectos agregados de una serie de ciclos de vida de sus materiales, componentes, ensamblajes y sistemas constituyentes. La energía del ciclo de vida y otros efectos ambientales incluyen todos aquellos incurridos en la producción, uso y desmantelamiento de un edificio.			
RESUMEN EN INGLES			
The life cycle of buildings is more complex than that of other products, as it involves the aggregate effects of a series of life cycles of their materials, components, assemblies and constituent systems. Life cycle energy and other environmental effects include all those incurred in the production, use and decommissioning of a building.			
PALABRAS CLAVES	Edificaciones, Huella De Carbono, Cálculo, Metodología.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Buildings, Carbon Footprint, Calculation, Methodology.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS:89	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:



**Metodología Para El Cálculo De La Huella De Carbono Generada En Proyectos De
Edificaciones Verticales En La Ciudad De Cúcuta Norte De Santander**

Jhon Heder Gonzalez Romero

Facultad De Ingeniería, Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña

Maestría En Construcción

Magister. Javier Alfonso Cárdenas Gutiérrez

Esp. Romel Jesús Gallardo Amaya

07 junio, 2023

Índice

Capítulo 1. Metodología para el cálculo de la huella de carbono generada en proyectos de edificaciones verticales en la ciudad de Cúcuta Norte de Santander.	9
1.1 Planteamiento del Problema	9
1.2 Formulación del Problema	12
1.3 Objetivos de Investigación.....	13
1.3.1 Objetivo General	13
1.3.2 Objetivo Especifico	13
1.4 Justificación	13
1.5 Delimitaciones	14
1.5.1. Delimitación Geográfica	15
1.5.2. Delimitación Temporal	15
1.5.3. Delimitación Conceptual.....	15
1.5.4. Delimitación Operativa	15
Capítulo 2. Marco Referencial	16
2.1 Marco Histórico	16
2.2 Marco Contextual.....	18
2.2.1 Consumo per cápita de CO2 en Colombia.....	18
2.3 Marco Conceptual.....	22

2.3.1	Cálculo de huella de Carbono	3 22
2.3.2	Reducción de la huella de Carbono.....	24
2.4	Marco Teórico.....	24
2.4.1	Huella de carbono de los procesos de construcción en obra y reducción	24
2.4.2	Huella de carbono de la generación de residuos de construcción y demolición y reducción de GEI	28
2.4.3	Huella de carbono durante la etapa operativa y reducción de GEI.....	31
2.4.4	Recursos hídricos alternativos para la reutilización del agua	32
2.4.5	Calefacción, ventilación y aire acondicionado	34
2.4.6	Otros sistemas y tecnologías de construcción.....	35
2.5	Marco Legal	36
Capítulo 3. Diseño Metodológico		38
3.1	Tipo de investigación	38
3.2	Seguimiento metodológico del proyecto	38
3.3	Población.....	39
3.4	Muestra	39
3.5	Técnicas de recolección y análisis de la información	39
Capítulo 4. Resultados		40
4.1	Identificar y clasificar las fuentes de emisión del GEI a través del análisis del ciclo de vida de proyectos de edificaciones verticales.....	40

4.1.1 Ciclo de vida del proyecto	4
4.1.2 Emisiones de carbono en el sector de la construcción	40
4.1.3 Relación de emisiones de carbono con el ciclo de vida.....	44
4.2 Recolectar los datos de huella de carbono producidos en las diferentes etapas de la construcción de edificaciones verticales y su puesta en servicio, para determinar los factores de emisión. 49	45
4.2.1 Factores considerados en el ciclo de vida	51
4.2.2 Factores en el proceso de construcción.....	53
4.3 Elaborar una metodología para calcular la huella de carbono en edificaciones verticales construidas en la ciudad de Cúcuta.....	58
4.3.1 Emisiones de CO ₂ en el ciclo de vida	59
4.3.2 Evaluación de los impactos ambientales.....	68
4.3.3 Determinación de la severidad de los impactos ambientales	76
Capítulo 5. Conclusiones	80
Referencias.....	82

Lista de Figuras

Figura 1 Emisiones per cápita de CO ₂ en Colombia 1921-2020.....	11
Figura 2 Emisiones anuales de CO ₂ en Colombia 1921-2020	19
Figura 3 Variación interanual de las emisiones de CO ₂ en Colombia 1921-2020.....	19
Figura 4 Emisiones acumuladas de CO ₂ en Colombia de 1921-2020.....	20
Figura 5 Emisiones de CO ₂ por tipo de combustible en Colombia 1921-2020	21
Figura 6 Emisiones de gases de efecto invernadero per cápita en Colombia 1990-2019.....	21
Figura 7 Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, Colombia 1990-2019	22
Figura 8 Emisiones de CO ₂ en edificios 2010-2021	50
Figura 9 Etapas del ciclo de vida en proyectos de construcción.....	59

Lista de Tablas

Tabla 1 Modelo Metodológico.....	38
Tabla 2 Ciclo de vida del proyecto	41
Tabla 3 Emisiones de CO ₂ en la fabricación de materiales de construcción	62
Tabla 4 Emisiones de CO ₂ en la etapa de construcción.....	63
Tabla 5 Emisiones de CO ₂ en la etapa de Operación.....	65
Tabla 6 Emisiones de CO ₂ en la etapa de demolición	67
Tabla 7 Identificación de aspectos ambientales.....	69
Tabla 8 Evaluación de criterios ambientales	71
Tabla 9 Valoración del impacto ambiental	73
Tabla 10 Evaluación del aspecto ambiental en el ciclo de vida del proyecto.....	75
Tabla 11 Calculo de la severidad del aspecto ambiental	77

Introducción

El ciclo de vida de los edificios es más complejo que el de otros productos, ya que involucra los efectos agregados de una serie de ciclos de vida de sus materiales, componentes, ensamblajes y sistemas constituyentes. La energía del ciclo de vida y otros efectos ambientales incluyen todos aquellos incurridos en la producción, uso y desmantelamiento de un edificio.

Las descripciones actuales del ciclo de vida de un edificio distinguen entre distintas etapas del ciclo de vida de un edificio, La evaluación detallada de los efectos de adquisición y producción de los materiales para producir materiales de construcción, componentes y ensamblajes, El uso de recursos y los efectos ambientales al construir el edificio, el uso recurrente de recursos incorporados y los efectos ambientales incurridos durante la vida útil del edificio, incluidos tanto los asociados con la renovación y el mantenimiento del edificio como los relacionados con la operación del edificio, es decir, la energía requerida para acondicionar e iluminar los espacios interiores y para alimentar equipos y otros servicios, El uso de recursos y efectos ambientales para demoler y disponer del edificio al final de su vida útil.

La actividad en el sector de la construcción es uno de los usuarios de energía y contribuyente de las emisiones de carbono del mundo que afectan en gran medida las condiciones ambientales y tiene un impacto en el calentamiento global. Se mantienen los esfuerzos para reducir las emisiones de carbono, que es muy importante para la sostenibilidad ambiental. Las medidas de reducción de emisiones de carbono en el ciclo de vida de la construcción comienzan desde la etapa de inicio donde el propietario del proyecto tiene gran

autoridad para determinar toda la serie de actividades de construcción. En este sentido, el proyecto presentado plantea una estrategia metodológica para el cálculo de la huella de carbono utilizando el enfoque de Evaluación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA), distinguiendo entre tres aspectos principales, la identificación y clasificación de las fuentes de emisión, la recolección de datos sobre la huella de carbono, y el cálculo específico de las emisiones de CO₂, la evaluación de los impactos ambientales y la determinación de la severidad de dichos impactos.

Capítulo 1. Metodología para el cálculo de la huella de carbono generada en proyectos de edificaciones verticales en la ciudad de Cúcuta Norte de Santander.

1.1 Planteamiento del Problema

Una de las amenazas más importantes a las que se enfrenta el mundo en la actualidad es el cambio climático y la degradación ambiental, causada principalmente por las actividades humanas (Labaran et al., 2022). Abordar esta problemática ha sido uno de los objetivos de política de cambio climático más críticos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para mantener la temperatura promedio mundial por debajo de 2 °C, que es el objetivo general del Acuerdo de París de 2015 (Dixit et al., 2016). La atención se ha centrado en la economía y las tecnologías bajas en carbono y la energía renovable para lograr estos objetivos, ya que las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) relacionadas con la energía son el factor que más contribuye al calentamiento climático (Croft et al., 2019)

En los últimos años, las huellas de carbono han captado el interés de los responsables políticos, las empresas y los consumidores debido a los problemas del calentamiento global y los cambios en la agenda ambiental (Dai et al., 2020; Janjua et al., 2019). La huella de carbono se considera como el área de tierra requerida para asimilar todo el *CO2* producido por los humanos durante su vida (D'Alessandro et al., 2017). La huella de carbono se considera un buen indicador de la contribución del público al calentamiento global, aunque existen confusiones sobre lo que significa exactamente (Lai et al., 2012; P. Wu et al., 2014). La definición más común se refiere a

una cierta cantidad de emisiones gaseosas que son aplicables al cambio climático y están asociadas con actividades de producción o consumo humano (Iddio et al., 2020). Aunque esta es una definición amplia y existe una confusión sobre el significado real y cómo medir y cuantificar una huella de carbono (Zhang et al., 2018). Dado que existe esta falta de comprensión común de la huella de carbono, vale la pena analizar las diferencias en las definiciones a través de la literatura para obtener una mejor visión general del término. Como se indicó anteriormente, la interpretación más común de la huella de carbono tanto en la literatura como en el debate público es que la huella de carbono son todas las emisiones de dióxido de carbono o gases de efecto invernadero expresadas en *CO2* equivalentes.

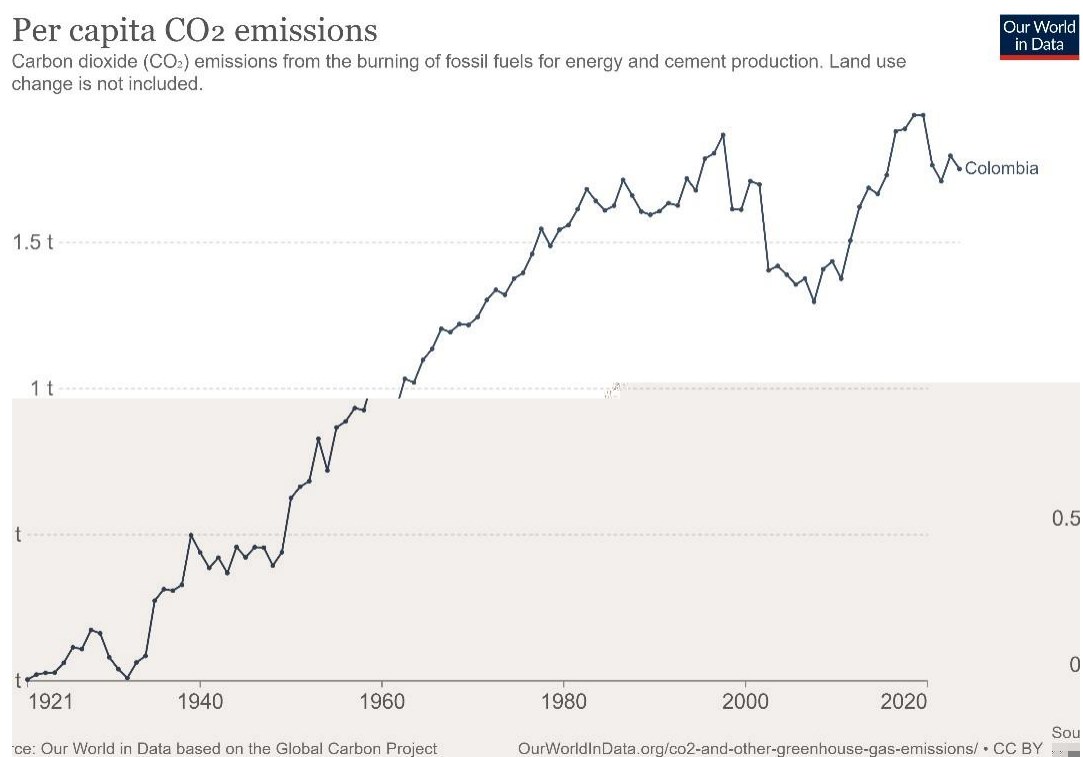
Como se aprecia en la figura 1, Colombia al año 2020 producía más de 1.5 toneladas de *CO2*, derivadas de actividades de producción de energía y cemento, esta cifra ha tenido un aumento progresivo, situación que también se ve reflejada en las principales ciudades del país, como es el caso de la ciudad de Cúcuta, que al ser la capital del departamento de norte de Santander y frontera con Venezuela, es receptora permanente de población del mismo departamento y extranjeros, esto ha ocasionado que la actividad constructiva aumente, adecuando nuevos espacios para albergar a toda la población, aumento en forma proporcional la demanda por recursos y materiales necesario para las edificaciones.

Debido al aumento desmedido de la huella de carbono, es natural pensar que existe la necesidad de reducirla, y desde el sector de la construcción esto consiste en que para la construcción de edificaciones se pueda determinar el impacto total de un edificio e identificar dónde y cuándo tienen lugar las principales fuentes de emisiones de GEI. Con el fin de facilitar

la comparación y la elaboración de informes completos al contabilizar el potencial de calentamiento global (GWP) total de un proceso determinado, todos los valores de GWP de gases de efecto invernadero se combinan y se convierten en un solo valor equivalente de carbono (Fenner et al., 2018).

Figura 1

Emisiones per cápita de CO₂ en Colombia 1921-2020



Nota: OurWorldinData.org (2021)

El análisis del ciclo de vida completo del edificio es un enfoque comúnmente utilizado para analizar los impactos del edificio, el análisis del ciclo de vida es un enfoque holístico para analizar todas las entradas y salidas de un producto, proceso o actividad determinado, que abarca

la extracción y el procesamiento de materias primas; fabricación, transporte y distribución; reutilizar; reciclaje de mantenimiento y disposición final (H. J. Wu et al., 2012). El análisis del ciclo de vida se puede utilizar para evaluar las cargas ambientales asociadas con el diseño y la operación de una cadena de suministro que, en última instancia, se relacionan con la huella de un edificio (Ma et al., 2019). Este tipo de análisis es un aspecto que no se ha considerado en ciudades como Cúcuta, en el cual los aumentos de temperatura y la misma calidad del aire ya se ven afectado por el desarrollo de las actividades productivas derivadas del proceso de expansión, por lo cual es necesario replantear los impactos que desde el sector de la construcción se general y pensar en estrategias para su mitigación.

1.2 Formulación del Problema

Pregunta base o indagatoria:

¿Se emplean metodologías para el cálculo de la huella de carbono en la ciudad de Cúcuta?

¿Los proyectos de edificaciones verticales en la ciudad consideran el impacto de la huella de carbono que generan estas estructuras a lo largo de su ciclo de vida?

¿Cuál es el impacto de no considerar la producción de la huella de carbono durante el ciclo de vida de una edificación?

Unidad de análisis: Huella de carbono en edificaciones verticales de la ciudad de Cúcuta

Variabes: Materiales, Procesos Constructivos, Diseño arquitectónico, Uso

Dimensión espacial: Cúcuta, Norte de Santander

Dimensión temporal: 8 Meses

1.3 Objetivos de Investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar una metodología para el cálculo de la huella de carbono utilizando el enfoque de Evaluación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) en diferentes etapas del proyecto, para el desarrollo de edificaciones sustentables en la ciudad de Cúcuta norte de Santander.

1.3.2 Objetivo Especifico

- Identificar y clasificar las fuentes de emisión de GEI a través del análisis del ciclo de vida de proyectos de edificaciones en la ciudad de Cúcuta.
- Recolectar los datos de huella de carbono producidos en las diferentes etapas de la construcción de edificaciones verticales y su puesta en servicio, para determinar los factores de emisión.
- Elaborar una metodología para calcular la huella de carbono en edificaciones verticales construidas en la ciudad de Cúcuta.

1.4 Justificación

En Colombia, las emisiones de gases de efecto invernadero provienen predominantemente de siete actividades o sectores, incluido el sector de la construcción, adicionalmente la deforestación es el principal impulsor de las emisiones (16,68% de las emisiones totales en Colombia). Como parte de las estrategias para la reducción del impacto ambiental que genera la actividad humana, el Gobierno colombiano anunció que reducirá sus

emisiones de gases de efecto invernadero en un 51% para 2030 en comparación con la línea de base proyectada, lo que pone en marcha la promesa de un desarrollo sostenible y resiliente acelerado (Dixit, 2017).

Este proyecto de investigación precisamente busca proponer una metodología para calcular la huella de carbono que genera el sector de la construcción a través de los proyectos de edificaciones verticales, aspecto que no es tomado con frecuencia en este tipo de proyectos. A nivel social esta propuesta permitirá poder gestionar estrategias que puedan disminuir el impacto generado, desde la selección de los materiales hasta el diseño arquitectónico que permita la optimización de la energía necesaria para el confort de la edificación. Y esto precisamente en ciudades con altas temperaturas como Cúcuta tiene una gran aplicabilidad dado que el consumo en energía eléctrica para la climatización de espacios es elevado. Además, en la ciudad las edificaciones no se diseñan considerando el impacto de la huella de carbono durante el ciclo de vida.

El producto esperado del trabajo desarrollado se espera pueda llenar un vacío del conocimiento sobre la necesidad identificada, brindando una metodología para el cálculo de la huella de carbono desde el análisis del ciclo de vida de las edificaciones y con esto a futuro se puedan proyectar edificaciones con un enfoque sustentable en la ciudad de Cúcuta y otras ciudades del departamento.

1.5 Delimitaciones

- 1.5.1 Delimitación Geográfica.** Este proyecto se desarrollará en la ciudad de Cúcuta Norte de Santander, tomando como muestra objetivo las edificaciones verticales que se desarrollan en la ciudad.
- 1.5.2 Delimitación Temporal.** El proyecto planteado tendrá una duración de 8 meses desde la aprobación de la propuesta por parte del comité curricular
- 1.5.3 Delimitación Conceptual.** A nivel conceptual este proyecto parte de conceptos relacionados a: Los gases de efecto invernadero, ciclo de carbono, cambio climático, Consumo energético, ciclo de vida, entre otros.
- 1.5.4 Delimitación Operativa.** El desarrollo del proyecto permitirá identificar y clasificar las diferentes fuentes de emisión en la ciudad de Cúcuta, además de aquellas que en forma específica se relacionan con el ciclo de vida en edificaciones verticales, para posteriormente poder recolectar datos de emisiones con las cuales se pueda calcular la huella de carbono generada. Esto se realizará apoyados en las normas ISO 50001 e ISO 14064-1.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1 Marco Histórico

El CO₂ total de la emisión del sector de la construcción fue de 5.700 millones de toneladas, lo que representó el 23% de las emisiones de la actividad económica mundial en 2009. A nivel mundial, se prevé que la población urbana supere los seis mil millones en 2045, y esto podría conducir a más construcción en el futuro (Vardoulakis et al., 2015). Según el 4° Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), las emisiones de GEI de los edificios contribuyeron con 8.600 millones de t-CO₂-e en 2004. Se prevé que podría alcanzar hasta 15.600 millones de t-CO₂-e para 2030, creando un aumento del 26% de CO₂ que representa el 30-40% de las emisiones totales de GEI. Es necesario tomar medidas para reducir los GEI resultantes de las actividades de construcción. Por lo tanto, es vital implementar políticas que se centren en la mitigación de las emisiones de GEI (Chau et al., 2017). Dichos sistemas se clasifican en general en dos enfoques:

- la fijación indirecta de precios, como los reglamentos, y
- la fijación directa de precios, como los impuestos sobre el carbono y los regímenes de comercio de derechos de emisión (RCDE).

Las regulaciones como los códigos de construcción pueden reducir efectivamente las emisiones de GEI si se aplican lo suficientemente bien, y pueden garantizar que los nuevos edificios incorporen diseños que sean rentables y energéticamente efectivos (Nelson et al., 2016).

Otro instrumento para la mitigación de las emisiones de GEI es el impuesto al carbono. Los impuestos al carbono son más fáciles de diseñar, tienen costos de administración relativamente bajos y son atractivos para las partes interesadas en el sector de la construcción debido a su familiaridad con el mecanismo tributario (Martínez-Rocamora et al., 2017). Los impuestos al carbono animan a la industria y al público en general a ayudar a reducir las emisiones de GEI mediante el uso eficiente de la energía y la opción de fuentes de energía más limpias y renovables, lo que a su vez conduce a innovaciones en tecnología y procesos. En términos de RCDE, la cantidad acumulada de emisiones de GEI mitigadas puede cuantificarse con el RCDE y los permisos de emisión pueden distribuirse de forma gratuita o subastarse. Dado que tanto la oferta como la demanda de energía tienen los mismos pesos, un RCDE puede ser especialmente útil en la industria de la construcción, fomentando así el uso de tecnologías que sean energéticamente eficientes (Lip et al., 2020).

Diversos estudios han demostrado que una variedad de factores ralentiza el movimiento hacia una industria de la construcción neutra en carbono. Un estudio realizado en Singapur y Hong Kong encontró que la falta de conciencia, educación, incentivos y altos costos iniciales son los obstáculos para tal movimiento (Affolderbach et al., 2018). En otro estudio que se centró en edificios comerciales en las ciudades chinas de Beijing y Shanghai, se identificaron las barreras como la falta de regulaciones e incentivos financieros, el monitoreo ineficaz y la falta de conciencia sobre el ahorro de energía. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo llamar la atención / conciencia sobre la huella de carbono resultante del diseño hasta las fases de operación / gestión, como la fabricación, el transporte, la construcción, la operación y el mantenimiento, y la deconstrucción al final de la vida útil en la industria de la construcción. Si

estas fuentes están bien identificadas, será útil reducir los GEI en la etapa de conceptualización, diseño, construcción y gestión mediante la selección de materiales, sistemas, operaciones y gestión que tengan menos huella de carbono, lo que promoverá la conciencia ambiental en operaciones de construcción completas (Ibrahim et al., 2021).

Hay muchos estudios centrados en la reducción del CO₂ en diferentes fases de la industria de la construcción. Sin embargo, no hay otro estudio que se centre en la reducción de carbono en todas las etapas, desde el diseño hasta las fases de operación y gestión, con énfasis en la fabricación, el transporte, la construcción, la operación y el mantenimiento, y la deconstrucción integral del final de la vida útil (Khan et al., 2021). Por lo tanto, este documento revisó una variedad de las últimas técnicas para reducir la huella de carbono de cada fase, como el uso de aditivos alternativos en los materiales de construcción, las mejoras en el diseño, el reciclaje de los residuos de construcción, la promoción del uso de recursos hídricos alternativos, el aumento de la eficiencia de las tecnologías del agua y la construcción de nuevos sistemas para mejorar la sostenibilidad de la industria de la construcción (Abhilash et al., 2022).

2.2 Marco Contextual

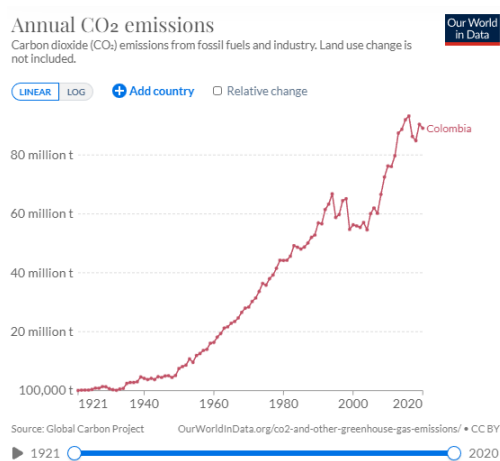
2.2.1 Consumo per cápita de CO₂ en Colombia

En la figura 2 se muestra cuánto dióxido de carbono (CO₂) se produce en un año determinado. Adicionalmente en la figura 3 se muestra el crecimiento interanual de la CO₂ anual Emisiones. Una cifra positiva indica que las emisiones en un año determinado fueron más altas

que el año anterior. Una cifra negativa indica que las emisiones fueron menores que el año anterior.

Figura 2

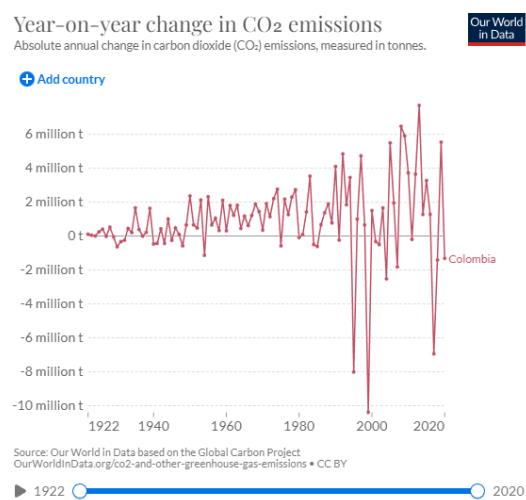
Emisiones anuales de CO₂ en Colombia 1921-2020



Nota: OurWorldinData.org (2021)

Figura 3

Variación interanual de las emisiones de CO₂ en Colombia 1921-2020

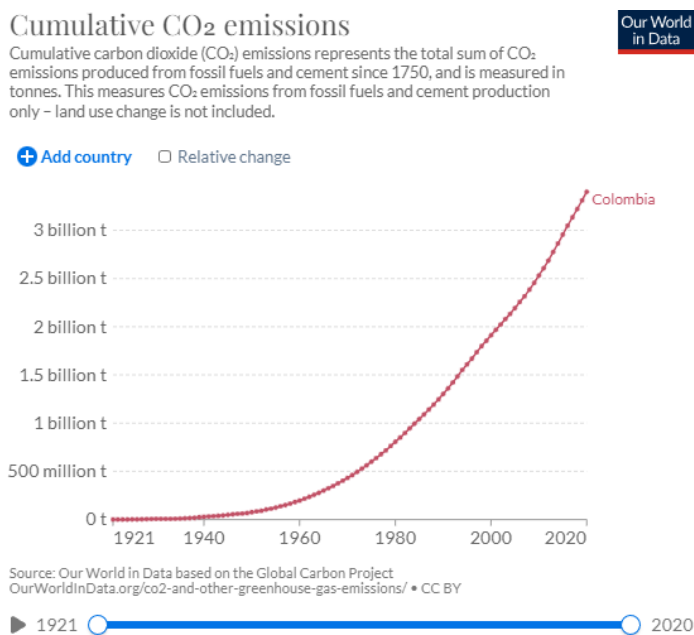


Nota: OurWorldinData.org (2021)

En la figura 4 se muestra el CO₂ acumulado de Emisiones, esto nos permite entender cuánto del CO₂ total. Las emisiones hasta la fecha han sido emitidas por un país determinado.

Figura 4

Emisiones acumuladas de CO₂ en Colombia de 1921-2020

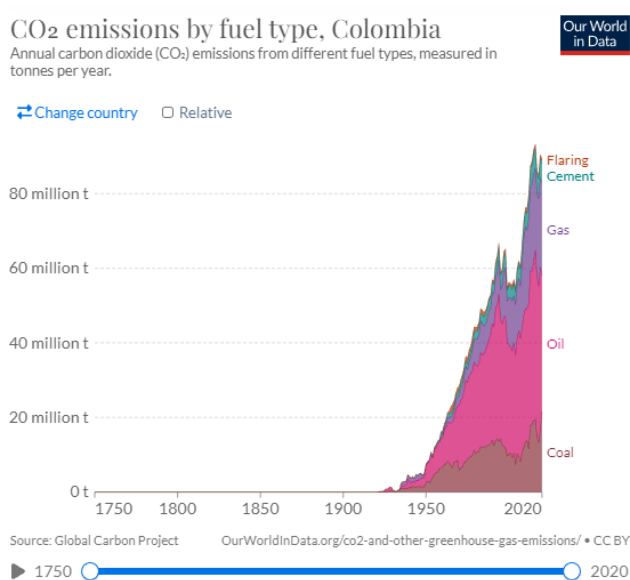


Nota: OurWorldinData.org (2021)

En la figura 5 muestra el desglose de la CO₂ anual de Emisiones por fuente y en la figura 6 se muestra las emisiones de gases de efecto invernadero per cápita y finalmente en la figura 7 se indica de donde vienen esas emisiones y la contribución de cada sector.

Figura 5

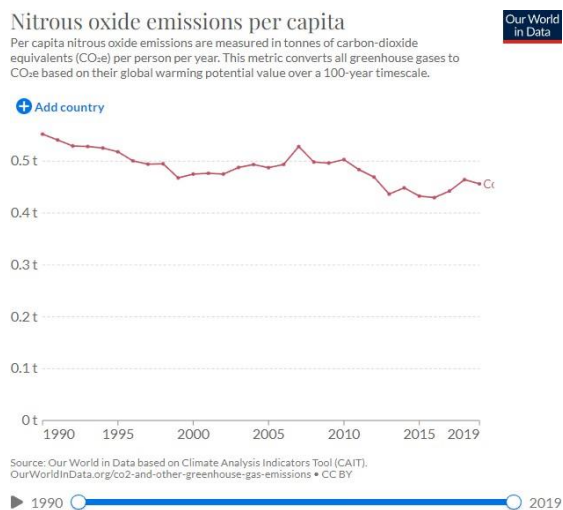
Emisiones de CO₂ por tipo de combustible en Colombia 1921-2020



Nota: *OurWorldinData.org* (2021)

Figura 6

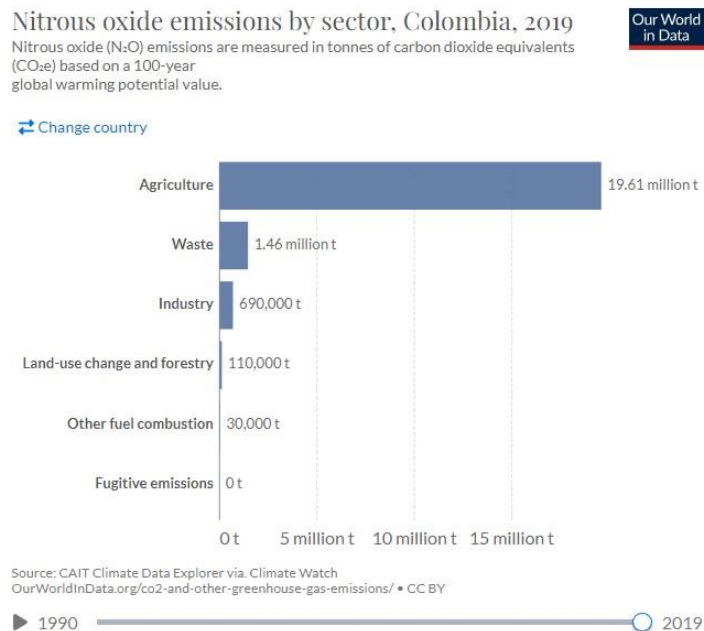
Emisiones de gases de efecto invernadero per cápita en Colombia 1990-2019



Nota: *OurWorldinData.org* (2021)

Figura 7

Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, Colombia 1990-2019



Nota: OurWorldinData.org (2021)

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 *Cálculo de huella de Carbono*

Las huellas de carbono se centran en las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el consumo. Incluyen las emisiones asociadas con los bienes que se importan a un país pero se producen en otro lugar y, por lo general, tienen en cuenta las emisiones asociadas con el transporte y el transporte marítimo internacionales, que no se contabilizan en los inventarios nacionales estándar. Como resultado, la huella de carbono de un país puede aumentar incluso cuando disminuyen las emisiones de carbono dentro de sus fronteras (Luhar et al., 2021).

Los promedios varían mucho en todo el mundo, con huellas más altas que generalmente se encuentran en residentes de países desarrollados. Por ejemplo, ese mismo año Francia tenía una huella de carbono per cápita de 6,0 toneladas métricas (6,6 toneladas cortas), mientras que Brasil y Tanzania tenían huellas de carbono de 1,8 toneladas métricas (aproximadamente 2 toneladas cortas) y 0,1 toneladas métricas (0,1 toneladas cortas) de CO₂ equivalente, respectivamente (Shree et al., 2021).

En los países desarrollados, el transporte y el uso de energía en el hogar constituyen el componente más grande de la huella de carbono de un individuo. Por ejemplo, aproximadamente el 40 por ciento de las emisiones totales en los Estados Unidos durante la primera década del siglo 21 fueron de esas fuentes. Tales emisiones se incluyen como parte de la huella de carbono "primaria" de un individuo, que representa las emisiones sobre las cuales un individuo tiene control directo. El resto de la huella de carbono de un individuo se denomina huella de carbono "secundaria", que representa las emisiones de carbono asociadas con el consumo de bienes y servicios. La huella secundaria incluye las emisiones de carbono emitidas por la producción de alimentos (Shree et al., 2021).

Se puede utilizar para dar cuenta de las dietas que contienen mayores proporciones de carne, que requiere una mayor cantidad de energía y nutrientes para producir que las verduras y los granos, y los alimentos que han sido transportados largas distancias. La fabricación y el transporte de bienes de consumo son contribuyentes adicionales a la huella de carbono secundaria. Por ejemplo, la huella de carbono de una botella de agua incluye el CO₂ o CO₂

equivalente emitido durante la fabricación de la botella en sí más la cantidad emitida durante el transporte de la botella al consumidor (Şoimoşan, 2021).

2.3.2 Reducción de la huella de Carbono

Las huellas de carbono se pueden reducir mejorando la eficiencia energética y cambiando los estilos de vida y los hábitos de compra. Cambiar el uso de energía y transporte puede tener un impacto en las huellas de carbono primarias (Ebi et al., 2020).. Por ejemplo, el uso del transporte público, como autobuses y trenes, reduce la huella de carbono de un individuo en comparación con la conducción. Los individuos y las corporaciones pueden reducir sus respectivas huellas de carbono instalando iluminación de bajo consumo, agregando aislamiento en edificios o utilizando fuentes de energía renovables para generar la electricidad que necesitan. Por ejemplo, la generación de electricidad a partir de la energía eólica no produce emisiones directas de carbono. Las opciones de estilo de vida adicionales que pueden reducir la huella de carbono secundaria de un individuo incluyen reducir el consumo de carne y cambiar los hábitos de compra a productos que requieren menos emisiones de carbono para producir y transportar (Haque, 2020).

2.4 Marco Teórico

2.4.1 Huella de carbono de los procesos de construcción en obra y reducción de GEI

Las huellas de carbono se producen durante los procesos de fabricación, transporte e instalación de cimientos del suelo, construcción con marco de madera / acero / concreto en las actividades de construcción en el sitio. La cantidad de CO₂ liberado de una torre residencial de concreto y acero en la ciudad metropolitana de Teherán fue de 13.076.390.236 kg de CO₂-e, y la cantidad de CO₂ emisiones en 1 m² de la superficie bruta construida (AMG) fueron 435.879,67 kg CO₂e/m², de los cuales el 83% estaba relacionado con las emisiones del transporte de materiales y el 14% estaba relacionado con los residuos de construcción y el 3% estaba relacionado con el proceso de construcción en el sitio (Srivastava et al., 2017).

Un edificio prefabricado de varios pisos con estructura de madera en la ciudad de Quebec produjo un total de emisiones de carbono incorporadas de 275 kg de CO₂-e, que era un 25% menos que los edificios tradicionales construidos con acero u concreto. La fase de fabricación del material de construcción contribuyó más (75%) a las emisiones de carbono, mientras que el transporte (13%), la construcción (1%) y la gestión de residuos (11%) contribuyeron con el 25% (Pacheco-Torgal, 2015).

Un estudio encontró que el carbono incorporado de una casa adosada de 3 dormitorios construida con un marco de madera panelado fuera del sitio era de aproximadamente 35 t-CO₂ (El 82% del carbono incorporado total está incorporado en los materiales incorporados en el edificio, el 2% del carbono incorporado total resultó del transporte de los materiales desde el punto de distribución hasta el sitio y el resto resultó de materiales de desecho exportados desde el sitio y la energía utilizada en el sitio), y una casa equivalente construida con construcción de mampostería tradicional fue de 52 t-CO₂ (Churkina, 2012).

El uso de métodos modernos en la construcción resultó en una reducción del 34% en el carbono incorporado. El CO₂ general las emisiones del proyecto de tubería de aguas residuales de 1008 m en China se calcularon en toneladas durante todo el período de construcción; Se encontró que los resultados fueron 452.81 toneladas, 61.32 toneladas y 6.59 toneladas desde la fase de transporte, la fase de fabricación de materiales y la fase de instalación, respectivamente.

El calentamiento global y el consumo de energía de 1 m² de la construcción de acaparamiento utilizando grandes cantidades de productos de acero y concreto en el sitio de construcción resultó en 3 toneladas de CO₂ eq GWP y 39 GJ de consumo de energía no renovable. Otro estudio mostró que la construcción de viviendas con concreto premezclado da como resultado un 40% menos de CO₂ Emisiones y menor consumo de combustible por lote al cambiar el tamaño de la losa de concreto de 3000 pies² hasta 1500 pies². Además, elegir la planta de concreto premezclado más cercana ahorra 46 galones de diesel y elimina 1020 lb de CO₂ emisiones por lote en el área metropolitana de Phoenix, Arizona (Churkina, 2012).

La mejora de la eficiencia energética y la optimización de las máquinas de construcción pueden reducir las emisiones directas de carbono en la industria de la construcción. El consumo de petróleo y electricidad durante la construcción en el sitio contribuye a la huella de carbono de la industria de la construcción. Según este estudio, las fuentes de CO₂ Las emisiones de la construcción en el sitio son las siguientes: el trabajo de concreto armado produjo 44.1 t-CO₂ (23,9% del total de CO₂ emisiones), los movimientos de tierras produjeron 39,1 t-CO₂ (21,2% del total de CO₂ emisiones), la construcción de calor del suelo (circuito cerrado) produjo 31,9 t-

CO₂ (16,7% del total de CO₂ emisiones), el trabajo de cimentación (PHC PILE) produjo 26,7 t-CO₂ (14,4% del total de CO₂ emisiones), y la construcción de calor del suelo (circuito abierto) produjo 16,6 t-CO₂ (8,5% del total de CO₂ emisiones) del 84,6% del CO total² en la fase de construcción in situ. Además, el consumo de electricidad de las obras de concreto en el sitio representa el 41,9% de la electricidad total utilizada durante la construcción, lo que resulta en el 14,1% (13.279 kWh) del uso total de electricidad durante las operaciones de construcción (Srivastava et al., 2017).

Un estudio de caso ha demostrado que, en promedio, el 99,8% del carbono presente en el combustible fósil consumido por una excavadora se libera a la atmósfera como CO₂. Además, los factores de emisión durante los tiempos de ralentí contribuyen a los factores de emisión promedio generales.

Un estudio mostró que el CO total² Se consideró el aumento de las emisiones durante el ralentí del motor de los equipos de construcción diésel no de carretera, aunque durante el ralentí el tiempo de uso de combustible y CO₂ Las emisiones están entre 1/3 y 1/5 del tiempo no inactivo. Durante el ralentí, 2,7 kg de CO₂/litro se produjo a una tasa de consumo de combustible diésel de 03.7 L / h.

Según la EPA (2005), los operadores deben tener en cuenta las necesidades del equipo, incluido el tiempo requerido para los calentamientos y enfriamientos. Un sistema de eficiencia operativa que es comúnmente aceptado y utilizado para estimar la productividad del equipo es de 50 min = h (83%), lo que indica 50 min de tiempo no inactivo y 10 min de tiempo de inactividad

por hora. Los equipos como retroexcavadoras y excavadoras tienen una productividad del equipo que oscila entre el 80% y el 85%. Sin embargo, los camiones todoterreno tienen una productividad de equipos del 41% considerando que una gran parte de su tiempo se dedica al ralentí, principalmente carga y descarga de carga. Si la eficiencia operativa promedio de los camiones todoterreno aumentara del 40% al 50% al reducir el tiempo de inactividad en solo 6 minutos / h, el uso de combustible por hora y el CO₂ Las emisiones pueden reducirse un 10%.

Un estudio de caso de un proyecto de construcción en EE.UU. involucró la construcción de una carretera de 18.8 millas que requería 184 piezas de maquinaria categorizadas en 35 tipos de equipos, con un tiempo de inactividad que se supone que es de 6 h por día durante 7 días por semana para esta maquinaria. Se demostró que la emisión neta total fue de 179.055 Mt-CO₂-e durante un período de 2,5 años (71.609 Mt-CO₂-e por año), de los cuales 40.023 Mt-CO₂-e/km fue aportado por la carretera construida [69]. Cantidad de CO₂ El tiempo de ralentí resultante puede reducirse utilizando diferentes tecnologías, como calentadores de fuego directo, unidades de potencia auxiliares (APU), sistemas de almacenamiento térmico, baterías a bordo y dispositivos de apagado automático del motor. Según un estudio, los calentadores de combustión directa pueden reducir el NO_x y CO₂ emisiones en un 99% y 94-96%, respectivamente, ya que el calor se transfiere directamente al intercambiador de calor desde la llama de combustión, lo que resulta en un menor uso de combustible que los motores diesel (Lip et al., 2020).

2.4.2 Huella de carbono de la generación de residuos de construcción y demolición y reducción de GEI

Los residuos de demolición de la construcción (RCD) provienen de lugares de trabajo de construcción, renovación y demolición que incluyen (i) materiales de excavación, (ii) materiales de construcción y mantenimiento de carreteras, (iii) materiales de demolición y (iv) otros materiales de desecho del lugar de trabajo (por ejemplo, chatarra de madera sin pintar, sin tratar, paletas de madera sin pintar, sin tratar, plástico, embalaje), limpieza de tierras y actividades de desarrollo (Lip et al., 2020).

Los residuos de construcción están aumentando en volumen y afectan negativamente al medio ambiente. Más del 80% de los RCD están compuestos por tierra excavada en obras de construcción. CDW mixto contiene el resto de materiales y embalajes. Una casa adosada modular de madera de 3 dormitorios con 83 m² Superficie interior producida 17 m³ de residuos (materiales inertes excavados, residuos y materiales de construcción no utilizados y otros residuos) por un total de 4,9 t-CO₂ equivalente a 109 kgCO₂ por m². La madera y los envases contribuyeron al 33% y al 31% del total de residuos, respectivamente (Giama, 2015).

Cuando un edificio llega al final de su vida útil, es demolido; el proceso es responsable de una emisión de 0.004 a 0.01 kg CO₂ por kg del material de concreto. Esta cifra depende del tipo de refuerzo y estructura utilizada, además de las condiciones generales de trabajo en el sitio durante la demolición. En Corea se está demoliendo un edificio de concreto situ; requirió un consumo total de energía de 51.5 MJ / m² de combustible diesel para demolerlo; por lo tanto, el nivel de CO₂ emitido durante la demolición fue de 10,3 kg-CO₂/10 m². En consideración del CO₂ que se emite durante el transporte de los escombros de demolición, 24,4 Kg-CO₂/10 m², 26,3 kg-CO₂, y 17,6 kg-CO₂ se obtuvieron para una vivienda unifamiliar, un piso y una vivienda

plurifamiliar, respectivamente. El transporte de residuos consume energía que conduce a CO₂ emisión. Según el estudio, durante el período de construcción, se generaron 530 toneladas de residuos y durante el transporte de estos residuos 527 L de gasóleo consumido totalizando 1,4 t-CO₂ emisión de la fase de transporte de residuos.

Los materiales de desecho generados por la industria de la construcción (concreto y escombros de concreto, cerámica de construcción, madera y madera, vidrio, plásticos, acero, hierro, aluminio, suelo excavado y espuma de poliestireno) o de la vida en general pueden reciclarse como materiales de construcción alternativos. Durante la demolición, el acabado interior de los edificios se puede reutilizar o reciclar. Para cuidar el medio ambiente y determinar los valores de reciclaje y reutilización de los RCD, la gestión de residuos debe planificarse mediante la determinación del volumen y la composición. Los bloques de concreto se pueden triturar para que puedan usarse para paisajismo o vertederos. La fibra generada a partir de los residuos de alfombras se puede utilizar en concreto reforzado con fibra (FCR) y suelo reforzado con fibra también. La fibra mejoró varias propiedades mecánicas del concreto, como la tenacidad, la resistencia a la tensión, la resistencia a la fatiga y la durabilidad, al tiempo que redujo las posibles grietas y defectos. Los materiales de desecho pueden actuar como sustitutos de los componentes de concreto; Se estima que el plástico y el vidrio pueden reemplazar los agregados finos en las mezclas de concreto hasta en un 20%, mientras que el concreto residual podría compensar el 20% de las mezclas de agregados gruesos en el concreto (Kunal et al., 2012).

Reciclar un kg de aluminio como residuos de demolición de edificios puede contribuir a la reducción de emisiones de 20,07 kg de CO₂-e. Los escombros de demolición que contienen acero se separan para que el acero pueda venderse a los comerciantes de chatarra. Los residuos económicamente no valiosos pueden enviarse a vertederos. Cuando el acero residual de la construcción de vallas publicitarias se recicla como chatarra de acero, 281 kg de CO₂-e/m La emisión de GEI puede reducirse. Se puede usar asfalto nuevo del asfalto retirado de la carretera que se reacondiciona. También se pueden utilizar los residuos de limpieza de jardinería. Una porción de vidrio residual se puede utilizar en lugar de agregado fino en mezclas de pavimentación asfáltica (glassphalt). La reutilización de residuos de madera en la producción de tableros de partículas redujo las emisiones de carbono incorporado hasta un 14,6% (-28,6 kg de CO₂-e/m²) (Lai et al., 2012; P. Wu et al., 2014).

2.4.3 Huella de carbono durante la etapa operativa y reducción de GEI

A lo largo de todo el ciclo, las operaciones de construcción contribuyen al CO₂ equilibrio cuando está en servicio. La emisión de carbono durante la etapa operativa de un edificio fue un contribuyente importante, representando el 85,4% de la emisión total, seguida de la etapa de construcción, que representó el 12,6% de las emisiones totales. Un bloque de viviendas residenciales de gran altura en Hong Kong demostró que la emisión de GEI se estimó en aproximadamente 213.03 t-CO₂-e/plano y 4980 kg CO₂-e/m², de los cuales el 85,82 % procedía de la energía de funcionamiento, el 12,69 % de los materiales, el 1,14 % de la rehabilitación, el 0,28 % del final de la vida útil del edificio y el 0,07 % de otros factores. El consumo de energía por área de los edificios a escala urbana, nacional y global es de 3.03 GJ / m², 4,27 GJ/m² y 0,44

GJ/m² que corresponden a 0,40 t-CO₂-e/m², 0,14 t-CO₂-e/m² y 0,04 t-CO₂-e/m² emisiones de gases de efecto invernadero, respectivamente, basadas en el análisis de sistemas híbridos que combinan el análisis input-output y el análisis de procesos en China (Lai et al., 2012).

(D'Alessandro et al., 2017).

2.4.4 Recursos hídricos alternativos para la reutilización del agua

Se estima que la reutilización del agua en un edificio de oficinas típico conserva alrededor del 75% del agua potable interior. Se estimó que el ahorro medio de agua de un edificio ecológico alcanzaría el 37,6% con la aplicación de tecnologías de eficiencia hídrica. El aumento del ahorro de agua reducirá el consumo de energía y CO₂ emisiones. El sistema de riego pasivo tiene dos etapas: recoger agua cuando llueve y suministrar agua en condiciones de sequía. El flujo de agua en el sistema es natural bajo gravedad o método de capilarización. Un hotel de 250 habitaciones en Birmingham, Reino Unido, con el sistema de reciclaje de agua de lluvia ahorrado hasta 780 m³ de agua potable por año. Según un modelo de simulación comparativa, el sistema de recolección de agua de lluvia alimentado por gravedad para un edificio de gran altura en México ahorró hasta un 8.5% de GEI. Las aguas grises son el agua producida por el baño, las máquinas de lavandería, los lavabos, las duchas y las bañeras. Las aguas grises tratadas se pueden reutilizar para el riego de jardines y baños.

La eficiencia del uso del agua puede mejorarse mediante sistemas de reciclaje de aguas grises para la descarga de inodoros mediante doble tubería, lo que contribuirá a reducir la demanda de agua urbana del 10% al 25%. El hotel NH Campo de Gibraltar sustituye el 20% del

agua potable por aguas grises filtradas y tratadas de las duchas, lo que se traduce en una reducción del 20% en la factura anual del agua. Blackwater proviene de baños y cocinas. La reutilización de Blackwater mostró una respuesta positiva de las personas que utilizaron sistemas automatizados o controlados remotamente por el instalador. Otro estudio informó que es costoso y tiene un diseño de proceso deficiente. La recuperación de condensado reutiliza el agua producida por los sistemas de aire acondicionado (AC). El condensado de CA se puede usar en inodoros, riego, torres de enfriamiento, limpieza de techos, techos verdes y enfriamiento por pulverización (Kahn & Walsh, 2015).

Ejemplos de reutilización de agua y suministros de agua alternativos incluyen inodoros que conservan agua, inodoros sin agua, urinarios sin agua, accesorios alternativos de ducha y grifo (controles alternativos, autoalimentación, bajo flujo), electrodomésticos eficientes en agua y paisajismo alternativo (riego de alta eficiencia, selección de plantas que conservan el agua). Algunos estudios estadísticos mostraron que las tecnologías del agua aumentan la eficiencia del agua. Por ejemplo, los urinarios y los lavavajillas comerciales mostraron las mayores reducciones en el uso de agua, mientras que las duchas y los inodoros comerciales mostraron los menores ahorros. De la misma manera, el sistema de reutilización centralizada de aguas residuales (WWCRS) requiere más energía para el tratamiento, lo que conduce a un mayor CO₂ emisiones, mientras que el sistema de reutilización descentralizada de aguas grises (GWDRS) requiere menos energía (11.8-37.5%) que WWCRS consumida. Un sistema de humedales construido trata las aguas residuales de un edificio para que puedan usarse en inodoros y urinarios de bajo flujo, lo que reduce el uso de agua en total en un porcentaje superior al 60% (Kahn & Walsh, 2015).

2.4.5 Calefacción, ventilación y aire acondicionado

Los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC) de los edificios consumen alrededor del 40-60% de la energía total teniendo en cuenta la energía incorporada que se deriva de la producción del edificio. Debido a su gran masa térmica, el concreto y otros materiales pesados tienen un impacto positivo en el consumo de energía de los edificios; para un edificio de peso pesado (basado en un marco de concreto), la energía necesaria para la calefacción / refrigeración / ventilación es de 10 MJ / m² resultando en 1.3 CO₂/m²; y para la construcción ligera, (basado en paredes de montantes de placas de yeso), es de 20 MJ / m² resultando en 2.6 CO₂/m² en el norte de Europa (Iddio et al., 2020).

El dimensionamiento y la selección de equipos, el dimensionamiento de tuberías/conductos, el análisis de rendimiento energético, la optimización del sistema, la optimización del rendimiento en tiempo real, el análisis de control, la optimización del control y la simulación y programación de sistemas HVAC pueden reducir el consumo de energía y aumentar la comodidad de los residentes. Según un estudio, el uso de un aire acondicionado de alto rendimiento energético resultó en 7664.4 t-CO₂-e reducción de un edificio de oficinas en Nanhaiyiki 3, China; 451,5 t-CO₂-e reducción en un edificio Pixel en Australia durante el ciclo de vida de los edificios. De la misma manera, el uso de ventilación e iluminación natural dio como resultado un 5687.6 t-CO₂-e reducción en Nanhaiyiki 3, China; 4649,8 t-CO₂-e reducción del edificio Pixel en Australia durante el ciclo de vida de los edificios (Iddio et al., 2020).

2.4.6 Otros sistemas y tecnologías de construcción

Existen varias tecnologías y sistemas que se pueden aplicar para mejorar la eficiencia de los edificios y disminuir el CO₂ Emisiones. Tales innovaciones incluyen: ventanas y superficies de construcción con propiedades ópticas ajustables; bombas de calor de alta eficiencia; dispositivos de iluminación altamente eficientes; materiales aislantes delgados; software mejorado para analizar el diseño y las operaciones de los edificios; sensores y controles económicos de recolección de energía; estrategias de control optimizadas; y sistemas de comunicación de edificios interoperables. Se realizó un estudio para comparar diferentes sistemas en un edificio, y encontró que los sistemas como luces interiores (-150%), ventilación mecánica (-25%) y bombas (-11%) tenían el menor ahorro de energía, mientras que los sistemas como ventiladores interiores (100%), unidades de rechazo de calor (56%) y equipos de receptáculo (33%) tenían el mayor ahorro de energía (Fenner et al., 2018).

Los valores negativos muestran que los sistemas son menos eficientes en comparación con la línea de base [82]. En otro estudio, se encontró que el uso de energías renovables como un sistema solar fotovoltaico, turbina eólica y digestor anaeróbico resultó en 1204.1 t-CO₂-e reducción en un edificio de oficinas en Australia, y el uso de energía renovable como un sistema solar fotovoltaico, un sistema solar térmico de agua y una bomba de calor geotérmica dieron como resultado 2871.6 t-CO₂-e reducción de un edificio de oficinas en China durante el ciclo de vida de los edificios. El poliestireno expandido (EPS), la celulosa y el elastómero como materiales de aislamiento y sellado dieron como resultado un promedio de 3,5 kg de CO₂-e/kg

de emisión, algunos materiales de aislamiento como la lana de oveja podrían reducir su impacto hasta en un 98%.

2.5 Marco Legal

Las normas ISO permiten determinar y reportar una métrica de carbono de un edificio existente, asociada con la operación del edificio, será más fácil y ayudará a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

ISO 16745, Sostenibilidad en edificios y obras de ingeniería civil – Métrica de carbono de un edificio existente durante la etapa de uso, Partes 1 y 2, proporcionará, de manera sencilla, un conjunto de métodos para el cálculo, informe, comunicación y verificación de una colección de métricas de carbono para las emisiones de GEI.

Jacques Lair, presidente del subcomité ISO que desarrolló la norma, dijo: "En un momento en que el calentamiento global es cada vez más evidente, con sus efectos devastadores en todo el planeta, tener una herramienta para medir la huella de carbono dejada por los edificios es de suma importancia. ISO 16745 traerá una respuesta a las expectativas de todos".

Existe la necesidad de una métrica y la ISO 16745 será muy útil, no solo en países con un número suficiente de expertos y una base de datos precisa, sino también en aquellos países donde los servicios de expertos son limitados y las bases de datos tienen lagunas considerables.

La norma podría utilizarse como una herramienta universal para medir y notificar las emisiones de GEI, proporcionando la base para que se dibujen líneas de base de rendimiento precisas de los edificios, se establezcan objetivos nacionales y se produzca el comercio de carbono en igualdad de condiciones.

ISO 16745 pretende ser práctico no solo para la profesión de la construcción, sino también para muchas partes interesadas que se espera que utilicen la métrica de carbono de un edificio como referencia para la toma de decisiones en sus actividades comerciales, políticas gubernamentales y como línea de base para la evaluación comparativa. La simplicidad de su enfoque significa que es aplicable a todas las escalas, desde ciudades y carteras de edificios hasta edificios individuales.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación planteada es de carácter cuantitativo con un alcance correlacional, dado que se fundamenta en el enfoque de Evaluación de Sostenibilidad del Ciclo de Vida (LCSA) en diferentes etapas del proyecto, para el desarrollo de edificaciones sustentables en la ciudad de Cúcuta norte de Santander.

3.2 Seguimiento metodológico del proyecto

En la tabla 1 se indica el conjunto de indicadores y actividades por objetivos que permiten realizar un seguimiento metodológico al proyecto.

Tabla 1

Modelo Metodológico

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	ACTIVIDADES POR OBJETIVO	INDICADOR POR ACTIVIDAD
Obj 1. Identificar y clasificar las fuentes de emisión de GEI a través del análisis del ciclo de vida de proyectos de edificaciones en la ciudad de Cúcuta.	Act 1. Definir los proyectos que servirán de insumo para el desarrollo del proyecto	Ind 1. Base de datos (Identificación de proyectos)
	Act 2. Definir los procesos, materiales y fuentes de emisión de GEI	Ind 2. Matriz de identificación de fuentes y emisiones de GEI
	Act 3. Clasificar las fuentes de emisión a partir del ciclo de vida de los elementos identificados	Ind 3. Matriz de identificación de fuentes y emisiones de GEI
Obj 2. Recolectar los datos de huella de carbono producidos en la diferentes etapas de la	Act 1. Identificar y documentar los fuentes de GEI	Ind 4. Base de datos, Matriz de valoración

construcción de edificaciones verticales y su puesta en servicio, para determinar los factores de emisión.	Act 2. Seleccionar y recopilar los datos de la actividad	Ind 2. Base de Datos
	Act 3. Cálculo de las emisiones y remociones	Ind 3. Diagrama de emisiones
Obj 3. Elaborar una metodología para calcular la huella de carbono en edificaciones verticales construidas en la ciudad de Cúcuta.	Act 1. Organización de la información	Ind 5. Informe, base de datos
	Act 2. Establecer las etapas para la metodología	Ind 6. Modelo metodológico

3.3 Población

La población corresponde a las edificaciones de uso residencial en la ciudad de Cúcuta Norte de Santander.

3.4 Muestra

La muestra seleccionada es de tipo intensional, es decir el tamaño de la muestra se plantea en forma arbitraria por el investigador considerando las limitaciones de la disponibilidad en el acceso a la información, por lo cual para esta investigación la muestra la integran tres proyectos seleccionados según la disponibilidad de información y que correspondan a proyectos de edificación de obra nueva de uno o dos niveles de uso residencial en la ciudad de Cúcuta.

3.5 Técnicas de recolección y análisis de la información

La técnicas de observación para el desarrollo del proyecto incluyen lo siguiente:

- Recopilación y análisis documental
- Matrices para la identificación, calculo y evaluación de la huella de carbono

Capítulo 4. Resultados

4.1 Identificar y clasificar las fuentes de emisión del GEI a través del análisis del ciclo de vida de proyectos de edificaciones verticales

4.1.1 Ciclo de vida del proyecto

El ciclo de vida del proyecto sirve para determinar el inicio y el final de la actividad del proyecto, para identificar la oportunidad que se logrará y para formular si se debe implementar un proyecto. El ciclo de vida del proyecto generalmente involucra alguna forma de transferencia de tecnología o diseño de material requerido, diseño de implementación y mantenimiento. Hay cuatro etapas en el ciclo de vida del proyecto de construcción, que incluyen el inicio o la conceptualización del proyecto, la planificación o el diseño del proyecto, la fase de construcción y finalización, que cubre la operación y el mantenimiento (Labaran et al., 2022).

La Tabla 2 muestra un diagrama conceptual que ilustra las diversas etapas del ciclo de vida de un proyecto de construcción. En el concepto de construcción verde, cada etapa del ciclo de vida del proyecto debe crear valor verde que luego se transfiera a la siguiente etapa. Al final, el último valor verde en el ciclo de vida del proyecto es una acumulación de los valores verdes de las etapas anteriores. Este concepto influye en la gestión de un proyecto verde desde la planificación hasta la fase operativa del edificio utilizando un sistema integrado de entrega de proyectos para obtener el máximo beneficio (Croft et al., 2019).

Tabla 2*Ciclo de vida del proyecto*

Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV
Inicio	Planeación	Ejecución	Terminación
<ul style="list-style-type: none"> • Misión del proyecto • Consulta del cliente 	<ul style="list-style-type: none"> • Misión del proyecto • Alta dirección • Consulta del cliente • Aceptación del cliente 	<ul style="list-style-type: none"> • Horarios / Planes • Tareas Técnicas de Personal • Solución de problemas • Consulta del cliente • Monitoreo y retroalimentación • Comunicación 	<ul style="list-style-type: none"> • Aceptación del cliente • Consulta del cliente

Fase de iniciación / inicio del proyecto: La fase inicial o concepto del proyecto es la etapa en que el propietario debe elegir el proceso de diseño y construcción. Hay muchas opciones de proceso, cada una con ventajas y desventajas. Si bien el proceso elegido es importante, la elección de personas calificadas es más importante aún. Un proyecto exitoso se logra con personas que trabajan juntas con responsabilidades claras.

Fase de diseño/planificación del proyecto: La etapa de planificación es la etapa más importante que requiere mucho tiempo y personal involucrado según el tamaño del proyecto. El consultor planificador traduce el concepto deseado por el propietario y propone las especificaciones de los componentes y materiales de construcción. La habilidad del planificador depende en gran medida de la destreza y habilidad para definir el alcance del proyecto del propietario. Las habilidades de traducción deficientes tendrán un efecto en el inicio / origen de los cambios del proyecto, el trabajo repetitivo, los retrasos en el cronograma y el aumento de los costos (Lai et al., 2012).

El diseño verde consta de dos elementos principales: evaluación del ciclo de vida y diseño con conciencia ecológica. Estos dos elementos juegan un papel importante en la minimización de la huella ambiental negativa general causada por la construcción y manteniendo firmemente las consideraciones ambientales para la ejecución. Los resultados de esta etapa incluyen la estructura y el equipo del proyecto, los planos de diseño detallados, los alcances del trabajo, los datos técnicos, los cronogramas del proyecto, los cronogramas de trabajo, los cronogramas de materiales/compras, los procedimientos y otros detalles. Esta etapa de planificación es clave para el éxito de la siguiente etapa del proyecto.

Fase de construcción / ejecución del proyecto: La etapa de construcción o ejecución suele realizarse simultáneamente con la etapa de control. Esta etapa es la etapa de implementación del proyecto, que va desde el gasto de materiales, herramientas y mano de obra hasta el proceso de construcción que se refiere al resultado de la etapa de planificación. El contratista realiza el trabajo según la planificación aprobada por el propietario y brinda asesoramiento al propietario y al consultor si hay un aspecto del plan y un tipo de material/componente que no es adecuado o no está disponible en el campo. La fase de construcción es importante porque la calidad de los proyectos terminados depende en gran medida del trabajo y la gestión de la construcción (Fenner et al., 2018).

La calidad de la construcción depende de la integridad y calidad de los documentos del contrato preparados por el diseñador y de otros tres factores: trabajadores con las habilidades necesarias para producir trabajos, supervisores de campo que tengan la capacidad de coordinar

las diversas actividades requeridas para construir proyectos en el campo, y la calidad de los materiales utilizados para el desarrollo del proyecto. Se requieren trabajadores calificados y una gestión eficaz de los trabajadores calificados para lograr proyectos de calidad.

Los resultados de esta etapa incluyen productos (trabajo del proyecto), documentos de control que van desde el control administrativo, control de calidad, control laboral, control de materiales, control de cronograma, hasta controles financieros del proyecto, informes, resultados de reuniones, resultados de pruebas e inspecciones y otros que describen la implementación del proyecto. Todo en esta fase debe estar bien documentado para los propósitos de la siguiente etapa.

Fase de operación / mantenimiento / cierre de proyecto / traspaso: La etapa de cierre o finalización del proyecto es la etapa final de un proyecto, esta etapa consiste en el período de entrega y mantenimiento, la entrega generalmente se divide en dos etapas, la primera etapa después de que el trabajo de construcción se completa y está listo para usar y luego después del final de tratamiento.

El inicio del cierre del proyecto comienza cuando se acerca el final del proyecto. Esta actividad se inicia cuando el contratista solicita un examen final de la obra. Antes de la solicitud, se prepara una lista de verificación que contiene todos los elementos del trabajo, incluidos los que aún deben completarse o corregirse. Para verificar esta lista de trabajos, el personal de inspección de campo debe revisar cuidadosamente la sección de actividades, incluidos todos los

registros de inspección diaria para todos los elementos de trabajo, cualquiera que haya sido completado y que requiera una acción correctiva (Ma et al., 2019).

A veces es necesario revisar todas las actividades de construcción repetidamente antes de que el trabajo se declare completo y se entregue al propietario. En el último campo, la inspección debe involucrar a representantes de los propietarios, contratistas y grandes profesionales del diseño (arquitectos, así como ingenieros civiles, eléctricos, mecánicos, etc.) involucrados en el proyecto. El director del proyecto debe programar y realizar la inspección de campo final. El resultado de esta etapa es el documento final que contiene todos los documentos de control en la fase de construcción, el plano final (como plano construido), el manual de operación y el informe de entrega.

4.1.2 Emisiones de carbono en el sector de la construcción

Los edificios son grandes usuarios de materiales con un alto contenido de energía contenida. Esto incluye materiales y equipos de minería y fabricación, la energía realizada es proporcional al nivel de procesamiento requerido por el material. Cuanto más complejo sea el material y mayor sea la cantidad de proceso requerido, mayor será la cantidad de energía consumida.

Altos niveles de energía contenida implican un mayor nivel de contaminación al final de la producción ya que el consumo de energía suele producir emisiones. El concreto, el aluminio y el acero se encuentran entre los materiales con mayor contenido de energía contenida y también

son responsables de grandes cantidades de emisiones de CO₂. El gas de emisión de CO₂ proviene de la energía liberada durante el ciclo de vida del edificio a partir de la etapa de producción, la fase de construcción, la fase operativa y la fase de demolición / finalización del edificio (Dey et al., 2011).

Los problemas generados en el proceso de construcción incluyen la capacidad de satisfacer las necesidades de recursos (materiales, trabajadores, equipos, métodos) como componente de entrada del proceso de construcción, que está directamente relacionado con la calidad de salida de los edificios y los desechos, que está influenciada por la actividad de la construcción. La energía de carbono es la energía gastada durante el proceso de construcción teniendo en cuenta la energía derivada de la fabricación, distribución/suministro, transporte y equipos utilizados durante los trabajos de desarrollo. Generalmente, esta energía proviene de la combustión (fósil), como en fábricas y vehículos. El carbono incorporado se calcula por unidad de material KgCO₂ / Kg o en función de su unidad funcional utilizando material kgCO₂ / m³ o material kgCO₂ / m², donde cada material tiene diferentes valores de energía.

4.1.3 Relación de emisiones de carbono con el ciclo de vida

La planificación de bajas emisiones de carbono en el ciclo de vida del proyecto generalmente se integra con los pasos de reducción de energía contenida. El carbono incorporado se refiere a la energía consumida por el CO₂ consumido durante la duración del ciclo de vida del producto, mientras que la energía incorporada es la energía consumida durante la duración del ciclo de vida del producto (Giama, 2015).

Fase de iniciación

- En esta fase, la relación de reducción de emisiones de carbono parte del concepto de construcción deseado por el propietario, como la forma, el tipo y la función del edificio. El propietario tiene un papel muy decisivo en las actividades de desarrollo donde el papel del propietario como propietario de la tierra puede orientar y afirmar que el concepto de construcción debe basarse en una planificación baja en carbono. Esta condición será implementada y traducida por el diseño e implementación en etapas tanto en el concepto de diseño como en la etapa de implementación de la construcción. Los esfuerzos para reducir el carbono en esta fase no tienen un impacto directo, pero tendrán un impacto en el concepto de diseño y en toda la serie de actividades de construcción hasta el final del edificio.
- Cada gobierno tiene especificaciones y regulaciones sobre el concepto de desarrollo ambiental y sostenible en el que se pone énfasis en los esfuerzos para optimizar las actividades que producen emisiones de carbono. A través de esta regla, todo diseño e implementación del proyecto se referirá al concepto de baja emisión de carbono.

Fase de diseño

- La fase de diseño o diseño es una implementación en forma de planos y especificaciones de construcción, donde se puede realizar un diseño bajo en carbono. En esta fase, el diseño de reducción de carbono comienza con el concepto de construcción que

implementa la construcción ecológica donde hay actividad de diseño del espacio de la banda de rodadura y la forma de construcción, selección de materiales bajos en carbono y utilización del potencial alrededor del área del proyecto.

Fase de construcción y entrega

- En la fase de construcción es una fase de contacto directo en la generación de emisiones de carbono. Las actividades de la fase de construcción incluyen el suministro de materiales, los métodos de construcción, el uso de herramientas y mano de obra, la gestión de residuos y la limpieza de los edificios restantes y el mantenimiento del edificio antes de que se entregue al propietario.
- El suministro de materiales para las emisiones de carbono se calcula de la cuna a la puerta, de la cuna al sitio y de la cuna a los procesos de entrega, donde hay actividades productoras de carbono tanto dentro del material como del uso del transporte durante el proceso.
- El método de implementación de la construcción también afecta la cantidad de carbono en el que el método de construcción determinará la actividad de construcción, el uso de herramientas, así como la optimización de materiales y residuos de construcción. Uno de los métodos de construcción más utilizados de Lean Construction (LC) es un enfoque basado en la producción para abordar los problemas del proyecto, una nueva forma de diseñar y construir instalaciones de capital. Lean Construction Management ha supuesto una revolución en el diseño en las industrias de fabricación, suministro y montaje. LC tiene como objetivo producir sistemas esbeltos maximizando el valor y minimizando el

desperdicio mediante ciertas técnicas y aplicándolas en el proceso de finalización de un proyecto de construcción. De acuerdo con la teoría de Lean Construction, los desperdicios se definen como un uso ineficaz de herramientas, materiales, mano de obra o capital de trabajo, que son muy superiores a los que se requerirían para realizar la producción de un proyecto de construcción.

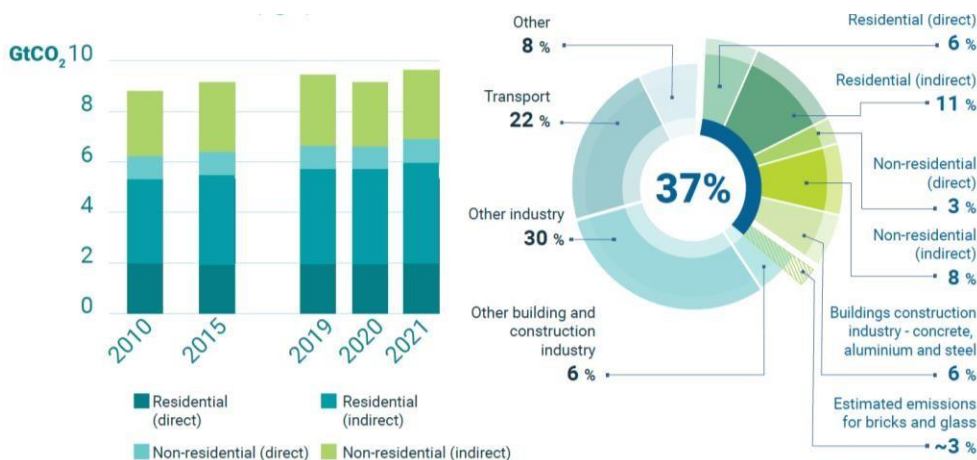
- El uso de herramientas y mano de obra es el mayor emisor de emisiones de carbono, donde la mayoría de los equipos, especialmente los vehículos de equipo pesado consumen petróleo derivado de fósiles. El papel de optimizar el uso de equipos pesados será crucial para reducir la cantidad de emisiones de carbono durante el proceso de construcción, incluida la capacidad y experiencia de la mano de obra para operar el equipo. La eficiencia laboral durante las actividades de construcción también afecta la reducción de carbono, donde el carbono se calcula sobre las actividades de los trabajadores durante el proyecto.
- La gestión de residuos y limpieza residual de edificios y mantenimiento de edificios es la actividad final del ciclo de vida del proyecto. En esta fase, la cantidad de carbono se ve afectada por la cantidad de desechos producidos, ya sea directa o indirectamente. Los desechos directos a base de carbono generalmente se originan en el proceso de combustión de materiales de desecho en el sitio del proyecto, mientras que los indirectos provienen del proceso de transporte de descargas de desechos sólidos a los vertederos. Las investigaciones muestran que la industria de la construcción genera grandes cantidades de residuos y más del 50% del material de desecho se deposita en el vertedero final. Casi el 26 % de los vertederos están ocupados por residuos de la construcción (Giama, 2015).

4.2 Recolectar los datos de huella de carbono producidos en las diferentes etapas de la construcción de edificaciones verticales y su puesta en servicio, para determinar los factores de emisión.

Las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía operativa de los edificios aumentaron alrededor de un 5 % en 2021 en comparación con 2020 a alrededor de 10 GtCO₂, superando el pico anterior de 2019 de 9,6 GtCO₂ en un 2 % (ver Figura 8). Este aumento sigue a la reducción sin precedentes en las emisiones de CO₂ en 2020 de alrededor del 10 por ciento desde los niveles de 2019 debido a la pandemia de COVID-19. El aumento de las emisiones de CO₂ del sector de los edificios muestra que ha habido pocos cambios estructurales en la eficiencia energética general de los edificios existentes (ver Figura 8). Los edificios representan alrededor del 27 % de las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía operativa, lo que excluye los materiales (IEA 2022f).

Figura 8

Emisiones de CO₂ en edificios 2010-2021 (izquierda) y participación de los edificios en las emisiones globales de energía y procesos en 2021 (derecha)



Notas: La industria de la construcción de edificios y otra industria de la construcción se refiere al concreto, acero y aluminio para la construcción de edificios e infraestructura, respectivamente. Los límites de la cuenta de emisiones (energía y proceso) para los materiales de construcción incluyen desde la preparación y el procesamiento de las materias primas y los diferentes pasos para producir los materiales. Por ejemplo, en el caso del cemento, esto incluye todos los procesos de fabricación, desde la obtención de materias primas y la preparación del combustible hasta la trituración y la molienda. Los números del gráfico circular son valores redondeados y, por lo tanto, no necesariamente suman el valor total de un sector determinado.

Fuente: IEA 2022. All rights reserved. Adapted from "Tracking Clean Energy Progress" (IEA 2022f).

La AIE estima que, en 2021, alrededor del 8 % de la energía operativa y las emisiones de CO₂ relacionadas con los procesos se debieron al uso directo de combustibles fósiles en los

edificios (es decir, emisiones directas) y otro 19 % se debió al uso de electricidad (es decir, emisiones indirectas). emisiones). La AIE atribuye el aumento de las emisiones directas de CO₂ al mayor uso de combustibles fósiles en las economías avanzadas y emergentes, en particular, el gas combustible fósil en las economías emergentes.

Se estima que las emisiones de la fabricación de concreto, acero y aluminio utilizados en la construcción de edificios representan un 6 % más (alrededor de 2,3 GtCO₂) de las emisiones globales (IEA 2022f). Se estima que otros materiales utilizados en la construcción de edificios, como ladrillos y vidrio, representan alrededor del 2% al 4% (~1,2 GtCO₂) de las emisiones globales. Sumados, estos representarían alrededor del 9 por ciento de la energía operativa global y las emisiones relacionadas con los procesos, lo que significa que la industria de la construcción y los edificios representan alrededor del 37 por ciento de la energía operativa global y las emisiones de CO₂ relacionadas con los procesos (IEA 2022f).

4.2.1 Factores considerados en el ciclo de vida

El ciclo de vida de los edificios es más complejo que el de otros productos, ya que involucra los efectos agregados de una gran cantidad de ciclos de vida de sus componentes, componentes, ensamblajes y sistemas de un edificio (Haque, 2020).. Las descripciones actuales del ciclo de vida de un edificio distinguen entre distintas etapas del ciclo de vida de un edificio, como se indica a continuación:

- La evaluación detallada de los efectos de adquisición y producción de los materiales para producir componentes y conjuntos de materiales de construcción,
- El uso de recursos y efectos ambientales para producir inicialmente el edificio.
- El uso recurrente de recursos incorporados y el medio ambiente, incurridos durante la vida útil del edificio, incluidos tanto los asociados con la renovación y el mantenimiento del edificio como los relacionados con el funcionamiento del edificio, es decir, la energía necesaria para acondicionar "calentar, enfriar, ventilar e iluminar los espacios interiores y para alimentar equipos y otros servicios
- El uso de recursos y efectos ambientales para demoler y disponer del edificio al final de su vida útil

Mientras que la primera etapa es específica para el material o componente solo, las otras son específicas para el material o componente y su aplicación dentro del contexto de un diseño específico. Además, los análisis detallados del ciclo de vida a menudo solo abarcan los problemas ambientales y energéticos iniciales. y hacen una referencia relativamente escasa a las últimas fases. Se ha vuelto habitual definir la energía requerida para producir inicialmente un edificio como su energía incorporada, una noción que se ha ampliado para incluir las emisiones de CO₂ incorporadas al aire, etc. La energía incorporada inicial es directa e indirecta para fabricar, transportar e instalar productos de construcción:

- Energía directa es la energía realmente consumida en la construcción de edificios. Representa el transporte final y la instalación de un componente o ensamblaje.

- La energía indirecta representa la energía consumida en la producción de materiales de construcción y su transporte asociado. La energía indirecta es la mayor parte de la energía incorporada. Representa la producción de un componente excluyendo su transporte e instalación en sitio.

La energía incorporada y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la construcción generalmente se entienden como una porción relativamente pequeña de lo que se requiere para producir edificios inicialmente, pero también se discuten poco en la literatura técnica. Las cifras europeas y estadounidenses estiman que la parte de la construcción es de aproximadamente el 7-10% de la energía incorporada total según los análisis realizados hace 15-20% años.

4.2.2 Factores en el proceso de construcción

El proceso de construcción estructural cubre todas las actividades y procesos asociados con la construcción de la estructura de un edificio, aquellos elementos de un edificio esenciales para resistir y soportar todas las cargas previstas. A continuación, se describen algunos factores y aspectos considerados en el proceso de construcción (Shree et al., 2021).

Factores ambientales: El proceso de construcción crea una amplia gama de efectos ambientales cuantificables que incluyen el uso de energía, las emisiones al aire, el uso del agua y los desechos sólidos y líquidos. También hay una serie de efectos ambientales localizados menos cuantificables incurridos tanto a través del proceso de construcción como como resultado de la

presencia del edificio en el sitio, incluyendo la perturbación de la tierra, la alteración del ecosistema, la destrucción de la vegetación, la ocupación de un sitio de recursos potenciales o la construcción en la tierra cultivable y la interferencia de aguas subterráneas. Estos efectos menos cuantificables son complejos y están mal documentados. Sin embargo, muchos de ellos son comunes a las tres opciones de materiales estructurales y, como tal, el siguiente análisis se centra en la energía utilizada para construir varios ensamblajes estructurales y las emisiones de gases de efecto invernadero correspondientes.

Energía usada: Esto incluye el uso de combustible asociado con el transporte de materiales, equipo de construcción y personal hacia y desde el sitio de construcción; el equipo en el sitio; la producción de electricidad utilizada en el sitio; y, la producción, refinación y transporte de combustibles utilizados en el sitio. Se traza una distinción importante en el análisis entre los procesos que involucran equipos móviles y aquellos que incluyen equipos estacionarios. Esta distinción es importante para asignar factores de emisión al aire apropiados para el uso de combustible. Los supuestos específicos son el uso de gasolina en el transporte de trabajadores, el uso de Diesel en el transporte de materiales y equipos y en el equipo en el sitio, y el uso de electricidad para herramientas y equipos.

Emisiones de gases de efecto invernadero: Las siguientes emisiones de gases de efecto invernadero se han derivado del proceso de construcción: Dióxido de Carbono (CO₂), Monóxido de Carbono (CO), Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y Metano, CH₄). Las cifras de energía se derivan del consumo de combustible por parte del trabajador y los vehículos de entrega de materiales y el consumo en el sitio.

El dióxido de carbono es el estándar de referencia habitual para los efectos de los gases de efecto invernadero. Se dice que todos los demás gases tienen un "efecto de equivalencia de CO₂", que es simplemente un múltiplo de la capacidad de efecto invernadero del dióxido de carbono. Este efecto también tiene un horizonte temporal debido al destino atmosférico del gas (es decir, su reactividad o estabilidad) a lo largo del tiempo.

Variaciones climáticas: El clima de la ubicación del edificio es crítico en el proceso de construcción. En muchas regiones, las condiciones climáticas adversas durante los meses de invierno dificultan o imposibilitan, que muchos oficios se realicen. El proceso de construcción se ralentiza debido a la baja productividad y/o las medidas adicionales necesarias para permitir que continúe el trabajo.

Se puede incurrir en un aumento general en el uso de energía y las emisiones de aire asociadas debido a condiciones climáticas adversas debido al aumento en el número de viajes de personas al sitio como resultado de la mayor dificultad y tiempo y menor productividad cuando se trabaja en condiciones húmedas o frías.

Distancias de transporte: El transporte de diversos materiales desde los centros de distribución hasta sitios de construcción específicos, así como las distancias de viaje de los trabajadores, variarán claramente de un proyecto a otro. Los factores clave aquí son el tamaño del área urbana y el número y distribución de los proveedores de materiales. Estos dependen de la ciudad y no de la región. Para la construcción de la mayoría de los conjuntos estructurales, el

transporte de trabajadores representa el componente más significativo y las distancias de transporte asociadas se tratan como una variable en este análisis.

Prácticas regionales: Otros factores dependientes de la ubicación, como las prácticas de construcción dependientes del clima para la ubicación, las características específicas de los materiales para el aislamiento, los revestimientos y los acabados.

Factores de construcción: La energía de la construcción y las emisiones de gases de efecto invernadero se examinan en cinco categorías generales:

- El transporte del equipo de construcción hacia y desde el sitio de construcción durante la duración de su tarea de construcción;
- El transporte de materiales desde un centro de distribución hasta el sitio de construcción;
- El transporte de equipos específicos para la tarea de construcción hacia y desde un depósito central al sitio de construcción;
- El uso de equipo en el sitio específico para la tarea de construcción;
- Procesos de apoyo como encofrado y calentamiento temporal.

Transporte de trabajadores: La construcción de edificios es una práctica intensiva en mano de obra y, como tal, se tiene en cuenta el transporte de los trabajadores hacia y desde el sitio de construcción. Aunque algunos de los trabajadores pueden viajar en vehículos

compartidos o camiones y camionetas de la empresa, se ha asumido que todos los trabajadores viajan individualmente hacia y desde el sitio en vehículos que funcionan con gasolina.

Actores del proyecto: Es necesario que las partes interesadas comprendan para priorizar las consideraciones ambientales en términos de degradación del carbono mediante la aplicación de las reglamentaciones aplicables a cada tipo de actividad de construcción. Adicionalmente el papel del gobierno en proporcionar a las partes interesadas la comprensión de la importancia de los edificios de bajas emisiones y establecer un punto de referencia o referencia de modelos de construcción de bajas emisiones de carbono que estén en línea con los estándares para que las comunidades puedan ver y comparar los beneficios de la planificación de bajas emisiones de carbono.

Diseño del proyecto: Se debe priorizar en el diseño el concepto de diseño bajo en carbono con atención a la optimización de la estructura/elemento de construcción. Prioriza además la elección de materiales de construcción bajos en carbono, considerar el concepto de uso de energía renovable y una comprensión más profunda de ciclo de vida ayudará a lograr un diseño bajo en carbono.

Fase de construcción y entrega: Se debe optimizar la cadena de suministro para acortar el flujo de distribución de materiales y equipos. La optimización de la máquina y la mayor experiencia del operador influirán en la reducción de emisiones. La elección del método de construcción afectará la eficiencia del tiempo y el costo también como material para que los residuos generados también sean menores.

El uso de materiales con etiqueta ecológica en cada componente del edificio también tiene un impacto en la reducción de carbono, así como la optimización de la energía, electricidad, gas y agua y la utilización de materiales en cada actividad operativa de construcción. Además, implementar la gestión planificada de residuos a través del concepto de reducción, reutilización y reciclaje. La utilización de nuevas tecnologías y energías renovables ayudará a reducir la cantidad de emisiones de carbono. La ingeniería de estructuras de edificios utilizando cemento verde y la utilización de materiales de madera reducirán aún más las emisiones de carbono.

4.3 Elaborar una metodología para calcular la huella de carbono en edificaciones verticales construidas en la ciudad de Cúcuta.

Se utilizó el método de evaluación del ciclo de vida para estimar el propósito anterior. En general, la evaluación del ciclo de vida consta de las siguientes cuatro partes principales: definición y alcance de la meta, análisis de inventario, evaluación del impacto y evaluación de la mejora. De estas etapas, la evaluación de impacto evalúa el impacto de varias cargas ambientales en la misma condición y la evaluación de mejora sugiere la posible solución para la reducción del impacto estimado de las cargas ambientales.

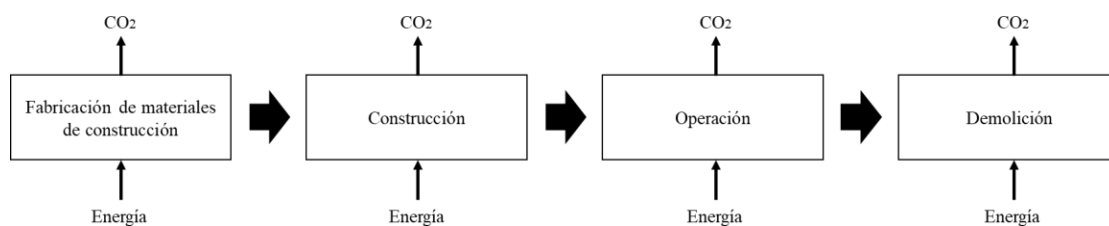
Sin embargo, las metodologías para llevar a cabo la evaluación de impacto y mejora todavía están en desarrollo. Así, el alcance de este proyecto está definido por el análisis de inventario que cuantifica las emisiones de CO₂ generadas desde la fabricación de materiales de construcción hasta la demolición de edificios. En general, la causa de las emisiones de CO₂ se puede clasificar en cuatro categorías: (1) de la combustión de combustibles fósiles; (2) de la

producción de cemento; (3) del consumo de combustible a base de biomasa; y (4) de la combustión de residuos. Sin embargo, en esta investigación solo incluye las emisiones del consumo de combustibles fósiles y la producción de cemento. Debido a que las emisiones del consumo de combustible basado en biomasa y la quema de desechos son en su mayoría emisiones del consumo de biomasa, la cantidad de emisiones de CO₂ es menor que las emisiones de la quema de combustibles fósiles y la producción de cemento.

Como se muestra en la figura 9, para un análisis de inventario más efectivo, el ciclo de vida de los edificios residenciales se dividió en cuatro etapas: fabricación de materiales de construcción, construcción, operación y demolición. Los procesos de cálculo en cada etapa son los siguientes.

Figura 9

Etapas del ciclo de vida en proyectos de construcción



4.3.1 Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida

4.3.1.1 Emisiones de CO₂ en la fabricación de materiales de construcción

En esta etapa, se utiliza el análisis de entrada-salida de energía para calcular las emisiones de CO₂ de los materiales de construcción. De acuerdo con la metodología estándar de análisis de insumo-producto (Miller y Peter 1985), la intensidad energética incorporada, que es el requerimiento total de energía de la economía directa e indirectamente para respaldar una unidad de demanda final de valor monetario, se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$E_m = E_{in}(I - A)^{-1} \quad (1)$$

donde E_m = vector de intensidad de energía incorporada (= $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots, E_{mn}$; es decir, E_{mi} denota la energía total requerida por valor de dólar de la demanda final presentada al sector i); E_{in} = vector de entrada de energía ($E_{in1}, E_{in2}, E_{in3}, \dots, E_{inn}$; i.e., siendo E_{ini} la entrada externa del sector energético i); I = matriz unitaria; y A = tabla de insumo-producto (=matriz de transacciones entre sectores industriales). Reescribiendo la ecuación anterior:

$$E_m = E_{in}(I + A + A^2 + A^3 + \Lambda) = E_{in} + E_m A \quad (2)$$

El primer y segundo término denotan los requerimientos de energía directos e indirectos, respectivamente. Sin embargo, la carga ambiental estimada de este estudio no es el consumo de energía sino las emisiones de CO₂. Por lo tanto, es necesario un proceso de conversión del consumo de energía a las emisiones de CO₂. Aquí, para calcular las emisiones de CO₂, se multiplicó el coeficiente de conversión de CO₂ por W determinado a partir del coeficiente de emisión (tonelada-C/tonelada de petróleo equivalente) con cada combustible fósil. En general,

debido a que las emisiones de CO₂ de los combustibles fósiles no están tan influenciadas por sus condiciones de combustión, sino que son proporcionales a su contenido de carbono. En consecuencia, el coeficiente de conversión de CO₂ se puede expresar en cómo se indica en la ecuación 3 y las emisiones totales de CO₂ de cada sector industrial se calculan mediante la ecuación 4. Asimismo, utilizando el modelo anterior, se puede calcular la cantidad de emisiones de CO₂ de la etapa de fabricación de cada material de construcción.

$$W = \sum_{ts} E_{ts} * \theta_{ts} \quad (3)$$

$$C = W * E_m = [W * E_{in}(I - A)^{-1}] \quad (4)$$

donde E_{ts} = energía tipo t consumida en el sector s; θ_{ts} = coeficiente de conversión correspondiente; y C = emisión de CO₂ de cada sector industrial (ton-C/dólares).

Adicionalmente, para simplificar el proceso es posible emplear una tabla de análisis como la que se indica en la tabla 3 en la cual para calcular las emisiones de CO₂ en la fabricación de materiales de construcción, es necesario considerar los diferentes procesos de producción que intervienen en la cadena de suministro de cada material (Nelson et al., 2016).

Tabla 3*Emisiones de CO₂ en la fabricación de materiales de construcción*

Material de construcción	Proceso de producción	Ecuación de cálculo de emisiones de CO₂
Concreto	Producción de cemento	Emisiones de CO ₂ = cantidad de cemento producido (ton) x factor de emisión de CO ₂ del cemento (ton CO ₂ /ton de cemento producido)
Acero	Fabricación de acero a partir de mineral de hierro	Emisiones de CO ₂ = cantidad de acero producido (ton) x factor de emisión de CO ₂ del proceso de fabricación (ton CO ₂ /ton de acero producido)
Vidrio	Fabricación de vidrio plano	Emisiones de CO ₂ = cantidad de vidrio producido (m ²) x factor de emisión de CO ₂ del proceso de fabricación (kg CO ₂ /m ² de vidrio producido)
Ladrillos cerámicos	Fabricación de ladrillos cerámicos cocidos	Emisiones de CO ₂ = cantidad de ladrillos producidos (m ²) x factor de emisión de CO ₂ del proceso de fabricación (kg CO ₂ /m ² de ladrillos producidos)
Tejas de cerámica	Fabricación de tejas de cerámica cocidas	Emisiones de CO ₂ = cantidad de tejas producidas (m ²) x factor de emisión de CO ₂ del proceso de fabricación (kg CO ₂ /m ² de tejas producidas)

Nota. La tabla plantea algunos de los principales materiales empleados en la construcción. Dependiendo de las características específicas del proyecto, se pueden incluir otros materiales.

4.3.1.2 Emisiones de CO₂ en la etapa de construcción

Las emisiones de CO₂ generadas en la etapa de construcción se calculan sumando el peso de cada material de construcción multiplicado por la intensidad de las emisiones de CO₂ calculadas previamente. Luego, también se agregan las emisiones de CO₂ debido al consumo de energía en el sitio de construcción.

Para calcular las emisiones de CO₂ en la etapa de construcción de un edificio, es necesario considerar diferentes procesos y materiales utilizados en la construcción. A continuación, se presenta una tabla con algunos ejemplos de actividades y materiales comunes en la construcción de edificios y las posibles ecuaciones de cálculo de emisiones de CO₂:

Tabla 4

Emisiones de CO₂ en la etapa de construcción

Actividad o Material	Emisiones de CO₂	Ecuación de cálculo de emisiones de CO₂
Excavación y movimiento de tierras	Variable según la cantidad y tipo de equipo utilizado	Emisiones de CO ₂ = cantidad de combustible utilizado (litros) x factor de emisión de CO ₂ del combustible (kg CO ₂ /litro)
Cimentación y estructura	Concreto y acero	Emisiones de CO ₂ = cantidad de material utilizado (ton) x factor de emisión de CO ₂ del material (ton CO ₂ /ton de material utilizado)
Muros y paredes	Ladrillos, bloques de concreto y yeso	Emisiones de CO ₂ = cantidad de material utilizado (m ²) x factor de emisión de CO ₂ del material (kg CO ₂ /m ² de material utilizado)

Actividad o Material	Emisiones de CO ₂	Ecuación de cálculo de emisiones de CO ₂
Cubierta y techo	Estructura metálica y paneles aislantes	Emisiones de CO ₂ = cantidad de material utilizado (m ²) x factor de emisión de CO ₂ del material (kg CO ₂ /m ² de material utilizado)
Carpintería y acabados	Ventanas, puertas, pinturas, revestimientos y suelos	Emisiones de CO ₂ = cantidad de material utilizado (m ² o unidad) x factor de emisión de CO ₂ del material (kg CO ₂ /m ² o kg CO ₂ /unidad de material utilizado)

Es importante tener en cuenta que estas ecuaciones son solo posibles aproximaciones y que pueden variar dependiendo del tipo de material y de los factores de emisión específicos utilizados en el análisis. Además, estas ecuaciones no consideran las emisiones indirectas asociadas con la fabricación y transporte de los materiales, lo que podría agregar emisiones adicionales al ciclo de vida del edificio.

4.3.1.3 Emisiones de CO₂ en la etapa de operación

Debido a que el patrón de consumo de energía de los edificios residenciales en la etapa de operación depende en gran medida de las preferencias individuales de cada acción, las emisiones de CO₂ de la etapa de operación del edificio tienen grandes variaciones en sus cantidades.

Para calcular las emisiones de CO₂ en la etapa de operación considerando el clima cálido de la ciudad de Cúcuta, es necesario considerar los mismos sistemas y equipos que en cualquier otra región, pero es posible que el consumo energético asociado sea diferente debido a las necesidades de refrigeración y aire acondicionado en climas cálidos. A continuación, se presenta

una tabla con algunos ejemplos de sistemas y equipos comunes en la operación de edificios en climas cálidos y las posibles ecuaciones de cálculo de emisiones de CO₂:

Tabla 5

Emisiones de CO₂ en la etapa de Operación

Sistema o Equipo	Emisiones de CO₂	Ecuación de cálculo de emisiones de CO₂
Sistema de aire acondicionado	Variable según el tipo de equipo y su eficiencia energética	Emisiones de CO ₂ = consumo energético del sistema (kWh) x factor de emisión de CO ₂ de la red eléctrica (kg CO ₂ /kWh)
Sistema de iluminación	Variable según el tipo de lámparas y su eficiencia energética	Emisiones de CO ₂ = consumo energético del sistema (kWh) x factor de emisión de CO ₂ de la red eléctrica (kg CO ₂ /kWh)
Sistema de ventilación	Variable según el tipo de equipo y su eficiencia energética	Emisiones de CO ₂ = consumo energético del sistema (kWh) x factor de emisión de CO ₂ de la red eléctrica (kg CO ₂ /kWh)
Equipos electrónicos y electrodomésticos	Variable según el tipo de equipo y su eficiencia energética	Emisiones de CO ₂ = consumo energético del equipo (kWh) x factor de emisión de CO ₂ de la red eléctrica (kg CO ₂ /kWh)
Sistema de agua caliente	Variable según el tipo de equipo y su eficiencia energética	Emisiones de CO ₂ = consumo energético del sistema (kWh) x factor de emisión de CO ₂ de la red eléctrica (kg CO ₂ /kWh) o consumo de combustible (litros) x factor de emisión de CO ₂ del combustible (kg CO ₂ /litro)
Generación de energía renovable en sitio	Variable según el tipo y la capacidad de los	Emisiones de CO ₂ = producción de energía renovable (kWh) x factor de emisión de CO ₂ de la

Sistema o Equipo	Emisiones de CO ₂	Ecuación de cálculo de emisiones de CO ₂
	sistemas de generación de energía renovable	red eléctrica (kg CO ₂ /kWh) o 0 (si no hay emisiones asociadas)

Es importante tener en cuenta que estas ecuaciones son solo posibles aproximaciones y que pueden variar dependiendo del tipo de equipo y de los factores de emisión específicos utilizados en el análisis. Además, estas ecuaciones no consideran las emisiones indirectas asociadas con la fabricación y transporte de los equipos y sistemas, lo que podría agregar emisiones adicionales al ciclo de vida del edificio.

4.3.1.1 Emisiones de CO₂ en la etapa de demolición

Las emisiones de CO₂ de la etapa de demolición se deben principalmente al consumo de energía de la maquinaria de demolición en el sitio de demolición.

Para calcular las emisiones de CO₂ en la etapa de demolición de un edificio, es necesario considerar las emisiones asociadas con el transporte y disposición de los residuos de construcción y demolición (RCD) y las emisiones asociadas con la maquinaria utilizada en el proceso de demolición. A continuación, se presenta una tabla con algunos ejemplos de factores de emisión para el cálculo de emisiones de CO₂ en la etapa de demolición:

Tabla 6*Emisiones de CO₂ en la etapa de demolición*

Actividad	Emisiones de CO₂	Factor de emisión de CO₂
Transporte de RCD	Variable según la distancia y el medio de transporte utilizado	Emisiones de CO ₂ = distancia recorrida (km) x factor de emisión de CO ₂ del medio de transporte (kg CO ₂ /km)
Disposición de RCD	Variable según el tipo de residuo y el método de disposición utilizado	Emisiones de CO ₂ = cantidad de residuo (toneladas) x factor de emisión de CO ₂ del método de disposición (kg CO ₂ /tonelada)
Maquinaria de demolición	Variable según el tipo de maquinaria y el consumo de combustible	Emisiones de CO ₂ = consumo de combustible (litros) x factor de emisión de CO ₂ del combustible (kg CO ₂ /litro)

Es importante tener en cuenta que estos factores de emisión son solo posibles aproximaciones y que pueden variar dependiendo del tipo de actividad y de los factores de emisión específicos utilizados en el análisis. Además, estas ecuaciones no consideran las emisiones indirectas asociadas con la fabricación y transporte de la maquinaria y los materiales utilizados en la demolición, lo que podría agregar emisiones adicionales al ciclo de vida del edificio.

4.3.2 Evaluación de los impactos ambientales

4.3.2.1 Aspectos ambientales considerados

A continuación, se proporciona una lista completa de aspectos ambientales como guía para identificar inicialmente aspectos ambientales generales (Gangoellis et al., 2009). Que posteriormente son analizados en la tabla 7.

- a) emisiones a la atmósfera;
- b) Descargas de agua;
- c) Generación, reciclado, reutilización, transporte y eliminación de desechos sólidos y de otro tipo, en particular desechos peligrosos;
- d) uso y contaminación de la tierra;
- e) uso de recursos naturales y materias primas (incluida la energía);
- f) problemas locales (ruido, vibración, olor, polvo, apariencia visual, etc.);
- g) Aspectos relacionados al transporte;
- h) los riesgos de accidentes e impactos ambientales que surjan, o puedan surgir, como consecuencia de incidentes, accidentes y posibles situaciones de emergencia;
- i) efectos sobre la biodiversidad.

Tabla 7*Identificación de aspectos ambientales*

Aspectos ambientales	Criterios de evaluación	Escala de valoración	Límites numéricos
Emisiones a la atmósfera	Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), COV y CFC	I	GEI: <10 kg CO ₂ eq, 10-50 kg CO ₂ eq, 50-100 kg CO ₂ eq, >100 kg CO ₂ eq; COV y CFC: <1 kg, 1-5 kg, 5-10 kg, >10 kg
		NS	
		MS	
		ES	
		I	
Descargas de agua	Descarga de agua residual y pluvial	NS	<1 m ³ , 1-5 m ³ , 5-10 m ³ , >10 m ³
		MS	
		ES	
		I	
Generación, reciclado, reutilización, transporte y eliminación de desechos sólidos y de otro tipo	Generación y manejo de desechos, incluyendo peligrosos	I	<1 kg, 1-10 kg, 10-50 kg, >50 kg
		NS	
		MS	
		ES	
Uso y contaminación de la tierra	Contaminación de suelos y uso de la tierra	I	<10 m ² , 10-50 m ² , 50-100 m ² , >100 m ²
		NS	
		MS	
		ES	
Uso de recursos naturales y materias primas	Uso de energía y materiales en la construcción y operación	I	<100 kWh, 100-500 kWh, 500-1000 kWh, >1000 kWh
		NS	
		MS	
		ES	
Problemas locales	Ruido, vibración, olor, polvo, apariencia visual	I	<50 dB, 50-70 dB, 70-90 dB, >90 dB
		NS	
		MS	
		ES	
Aspectos relacionados al transporte	Transporte de materiales, personal y usuarios	I	<10 km, 10-50 km, 50-100 km, >100 km
		NS	
		MS	
		ES	
Riesgos de accidentes e impactos ambientales	Accidentes y situaciones de emergencia	I	<1 evento, 1-5 eventos, 5-10 eventos, >10 eventos
		NS	
		MS	
		ES	
Efectos sobre la biodiversidad	Impacto en la flora y fauna	I	<10 especies afectadas, 10-50 especies afectadas,
		NS	
		MS	

Aspectos ambientales	Criterios de evaluación	Escala de valoración	Límites numéricos
		ES	50-100 especies afectadas, >100 especies afectadas

Nota: Inexistentes (I), no significativos (NS), marginalmente significativos (MS), extremadamente significativos (ES).

4.3.2.2 Identificación de aspectos ambientales

También se incluyen en la metodología aspectos locales específicos como la emisión de partículas en suspensión, la suciedad, el ruido, las vibraciones y los impactos visuales. Dado que los trabajos de construcción también pueden causar impactos en el tráfico y el transporte local, la metodología incluye una categoría denominada 'problemas de transporte'. La categoría 'efectos sobre la biodiversidad' incluye todos los aspectos relacionados con la pérdida de vegetación, la pérdida de fertilidad del suelo y los posibles impactos adversos debido a la intercepción de los lechos de los ríos. También se consideran los riesgos de accidentes ambientales y los impactos que surjan, o puedan surgir, como consecuencia de incidentes, accidentes y posibles situaciones de emergencia. Los aspectos ambientales específicos se enumeran en la Tabla 8.

Tabla 8*Evaluación de criterios ambientales*

Criterios de Evaluación	Escala Espacial	Gravedad	Probabilidad	Duración	Severidad
Emisiones a la atmósfera	Área de influencia	Cantidad y toxicidad de gases emitidos	Probabilidad de emisión	Duración de emisión	Impacto en la calidad del aire, efecto invernadero, impactos locales (ruido, vibración, olor, polvo, apariencia visual, etc.)
Descargas de agua	Área de influencia	Cantidad y calidad de descargas	Probabilidad de descarga	Duración de descarga	Impacto en la calidad del agua, impactos en la fauna y flora acuática
Generación, reciclado, reutilización, transporte y eliminación de desechos sólidos y de otro tipo, en particular desechos peligrosos	Área de influencia	Cantidad y toxicidad de los desechos generados	Probabilidad de generación	Duración de generación	Impacto en la calidad del suelo, del agua y del aire, impacto en la fauna y flora, riesgos de contaminación del suelo y del agua, problemas de salud pública
Uso y contaminación de la tierra	Área de influencia	Cantidad y toxicidad de los contaminantes	Probabilidad de contaminación	Duración de la contaminación	Impacto en la calidad del suelo, impacto en la fauna y flora terrestre, riesgos de contaminación del agua subterránea

Criterios de Evaluación	Escala Espacial	Gravedad	Probabilidad	Duración	Severidad
Uso de recursos naturales y materias primas (incluida la energía)	Global	Cantidad y tipo de recursos utilizados	Probabilidad de uso	Duración de uso	Impacto en la disponibilidad y calidad de los recursos naturales, emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes
Problemas locales	Área de influencia	Nivel de molestia	Probabilidad de ocurrencia	Duración de la molestia	Impacto en la calidad de vida de las personas que viven o trabajan cerca de la obra
Aspectos relacionados al transporte	Área de influencia	Cantidad y tipo de vehículos utilizados, emisiones generadas	Probabilidad de emisión	Duración de emisión	Impacto en la calidad del aire, congestión del tráfico, impacto en la calidad de vida de las personas que viven o trabajan cerca de la obra
Riesgos de accidentes e impactos ambientales	Global	Severidad de los posibles impactos	Probabilidad de ocurrencia	Duración del impacto	Impacto en la salud pública, seguridad de los trabajadores, riesgos de contaminación del suelo y del agua
Efectos sobre la biodiversidad	Área de influencia	Grado de afectación de la fauna y flora	Probabilidad de afectación	Duración de la afectación	Impacto en la biodiversidad local

En la tabla 9 se hace un análisis similar pero esta vez indicando el aspecto ambiental abordado la escala numérica de valoración la gravedad del impacto y la duración del impacto.

Tabla 9

Valoración del impacto ambiental

Aspecto Ambiental	Criterios de evaluación	Escala de valoración	Gravedad del impacto	Duración del impacto
Emisiones a la atmósfera	Emisiones de gases de efecto invernadero	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) y clorofluorocarbonos (CFC)	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Descargas de agua	Descargas de aguas residuales	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Generación, reciclado, reutilización, transporte y eliminación de desechos sólidos y de otro tipo, en particular desechos peligrosos	Generación de residuos sólidos y peligrosos	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Transporte y eliminación de residuos	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Uso y contaminación de la tierra	Contaminación del suelo	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Uso de recursos naturales y materias primas (incluida la energía)	Consumo de energía eléctrica y combustibles fósiles	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Consumo de agua	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Problemas locales	Ruido	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Vibración	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Olor	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Polvo	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Apariencia visual	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Aspectos relacionados al transporte	Emisiones de gases de efecto invernadero	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente

Aspecto Ambiental	Criterios de evaluación	Escala de valoración	Gravedad del impacto	Duración del impacto
	generadas por el transporte			
	Consumo de combustibles fósiles en el transporte	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Riesgos de accidentes e impactos ambientales	Riesgo de derrames de sustancias peligrosas	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Riesgo de colapso o daño estructural	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
	Riesgo de incendios	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente
Efectos sobre la biodiversidad	Afectaciones a la fauna y flora	1-10	Alta/Media/Baja	Temporal/Permanente

4.3.2.3 Evaluación de los aspectos ambientales

En esta etapa se consideró cualquier componente restante de importancia que coincidiera con los que dependían de cada sitio de construcción específico: severidad y posible exposición regulatoria y legal.

Para evaluar la severidad del impacto, se desarrolló un modelo matricial con varios criterios de evaluación para cada aspecto ambiental. Para incluir criterios detallados que ayuden a los tomadores de decisiones a determinar si un aspecto ambiental es significativo, se desarrolló una escala de cuatro intervalos: impactos inexistentes, impactos no significativos, impactos marginalmente significativos e impactos extremadamente significativos.

Tabla 10*Evaluación del aspecto ambiental en el ciclo de vida del proyecto*

Criterio de Evaluación	Categorías de Impacto	Límites Numéricos
Emisiones de CO ₂ durante la construcción	Inexistente	0
	No significativo	0-5000 kg CO ₂ /m ²
	Marginalmente significativo	5001-10000 kg CO ₂ /m ²
	Extremadamente significativo	>10000 kg CO ₂ /m ²
Emisiones de CO ₂ durante la operación	Inexistente	0
	No significativo	0-50 kg CO ₂ /m ² /año
	Marginalmente significativo	51-100 kg CO ₂ /m ² /año
	Extremadamente significativo	>100 kg CO ₂ /m ² /año
Emisiones de CO ₂ durante la demolición	Inexistente	0
	No significativo	0-1000 kg CO ₂ /m ²
	Marginalmente significativo	1001-5000 kg CO ₂ /m ²
	Extremadamente significativo	>5000 kg CO ₂ /m ²

Criterio de Evaluación	Categorías de Impacto	Límites Numéricos
Consumo de energía durante la operación	Inexistente	0
	No significativo	0-50 kWh/m ² /año
	Marginalmente significativo	51-100 kWh/m ² /año
	Extremadamente significativo	>100 kWh/m ² /año
Uso de agua durante la operación	Inexistente	0
	No significativo	0-200 L/m ² /año
	Marginalmente significativo	201-500 L/m ² /año
	Extremadamente significativo	>500 L/m ² /año
Generación de residuos durante la construcción	Inexistente	0
	No significativo	0-5 kg/m ²
	Marginalmente significativo	6-10 kg/m ²
	Extremadamente significativo	>10 kg/m ²

4.3.3 Determinación de la severidad de los impactos ambientales

Para calcular la severidad de los impactos ambientales, se pueden asignar pesos a cada uno de estos factores y luego sumar los valores ponderados. Por ejemplo, tomando de referencia la tabla 11, si se asigna un peso del 30% a la escala, un peso del 40% a la gravedad, un peso del 20% a la duración y un peso del 10% a la probabilidad, la ecuación para calcular la severidad de un impacto ambiental sería:

Tabla 11

Cálculo de la severidad del aspecto ambiental

Aspecto ambiental	Escala espacial	Gravedad	Probabilidad	Duración	Puntaje
Emisiones a la atmósfera					
Descargas de agua					
Generación, reciclado, reutilización, transporte y eliminación de desechos					
Uso y contaminación de la tierra					
Uso de recursos naturales y materias primas					
Problemas locales					
Aspectos relacionados al transporte					

Riesgos de accidentes e impactos ambientales

Efectos sobre la biodiversidad

$$\text{Severidad} = (0.3 \times \text{Escala}) + (0.4 \times \text{Gravedad}) + (0.2 \times \text{Duración}) + (0.1 \times \text{Probabilidad})$$

Los valores de Escala, Gravedad, Duración y Probabilidad pueden ser obtenidos de la matriz de evaluación de impactos ambientales, donde cada impacto ambiental es evaluado en términos de estos factores.

4.3.3.1 Determinación del impacto ambiental

Para determinar el impacto ambiental que tendría un proyecto de construcción, podemos utilizar la matriz de identificación de aspectos ambientales y la matriz de evaluación de la severidad de los impactos ambientales. La ecuación para calcular el impacto ambiental sería la siguiente:

$$\text{Impacto Ambiental} = \sum (\text{Escala} \times \text{Gravedad} \times \text{Duración} \times \text{Probabilidad}) \times \text{Severidad}$$

Donde:

Escala: corresponde al área física influenciada por el aspecto ambiental particular.

Gravedad: es la combinación de cantidad, toxicidad, volumen afectado, área superficial y extensión temporal del impacto ambiental.

Duración: es la persistencia del impacto ambiental.

Probabilidad: es la posibilidad de que el evento cause el impacto ambiental.

Severidad: es la evaluación de la importancia del impacto ambiental, determinada a partir de la matriz de evaluación de la severidad de los impactos ambientales.

Cada criterio se evalúa en una escala del 1 al 4, donde 1 indica la menor severidad y 4 la mayor severidad. La escala, la gravedad, la duración y la probabilidad se multiplican para obtener un valor total para cada aspecto ambiental, que se multiplica por la severidad para obtener la puntuación total del impacto ambiental.

Esta ecuación permite una evaluación cuantitativa de los impactos ambientales de un proyecto de construcción, teniendo en cuenta tanto la escala y la gravedad de los impactos, como la evaluación subjetiva de su importancia en términos de severidad. Los resultados obtenidos pueden ayudar a los tomadores de decisiones a evaluar los impactos ambientales y a identificar medidas para reducirlos.

Capítulo 5. Conclusiones

La construcción de edificaciones verticales son una combinación compleja de muchos materiales procesados, cada uno de los cuales contribuye a la energía total del edificio contenido. La energía empleada es proporcional al nivel de procesamiento requerido por el material, cuanto más complejo sea el material y mayor sea la cantidad de proceso requerido, mayor será la cantidad de energía consumida. Es decir, altos niveles de energía contenida implican un mayor nivel de contaminación al final de la producción ya que el consumo de energía suele producir emisiones. Materiales como el concreto, el aluminio y el acero son de los materiales ampliamente usados en la construcción y adicionalmente se encuentran entre los materiales con mayor contenido de energía contenida y también son responsables de grandes cantidades de emisiones de CO₂.

A partir de la revisión de literatura se pudo establecer que las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía operativa de los edificios aumentaron alrededor de un 5 % en 2021 en comparación con 2020 a alrededor de 10 GtCO₂, superando el pico anterior de 2019 de 9,6 GtCO₂ en un 2 %. Este aumento sigue a la reducción sin precedentes en las emisiones de CO₂ en 2020 de alrededor del 10 por ciento desde los niveles de 2019 debido a la pandemia de COVID-19. Así mismo, se estima que las emisiones de la fabricación de concreto, acero y aluminio utilizados en la construcción de edificios representan un 6 % más (alrededor de 2,3 GtCO₂) de las emisiones globales y otros materiales utilizados en la construcción de edificios, como ladrillos y vidrio, representan alrededor del 2% al 4% (1,2 GtCO₂) de las emisiones globales. En conjunto estos representarían alrededor del 9 por ciento de la energía operativa global y las emisiones relacionadas con los procesos, lo que significa que la industria de la construcción y los

edificios representan alrededor del 37 por ciento de la energía operativa global y las emisiones de CO₂.

Finalmente, se ha desarrollado una metodología para el cálculo de la huella de carbono considerando el ciclo de vida de los edificios residenciales la cual se dividió en cuatro etapas: fabricación de materiales de construcción, construcción, operación y demolición. Se proporcionaron tablas para poder identificar, evaluar y determinar el impacto ambiental que el desarrollo de los proyectos de construcción puede generar. Así mismo se estableció que las emisiones de CO₂ dependen en gran medida de la fuente de energía que se utiliza y de los factores de construcción y ocupación, los materiales empleados, el diseño arquitectónico, además del nivel de aislamiento y la eficiencia de los electrodomésticos y finalmente de la disposición final de los RCD y si estos se reincorporan o no al ciclo productivo.

Referencias

- Abhilash, H. N., Hamard, E., Beckett, C. T. S., Morel, J.-C., Varum, H., Silveira, D., Ioannou, I., & Illampas, R. (2022). Mechanical Behaviour of Earth Building Materials. *RILEM State-of-the-Art Reports*, 35, 127–180. https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1_4
- Affolderbach, J., Schulz, C., & Braun, B. (2018). Green building as urban climate change strategy. *Urban Book Series*, 9783319777085, 3–14. https://doi.org/10.1007/978-3-319-77709-2_1
- Chau, C. K., Hui, W. K., Ng, W. Y., Leung, T. M., & Xu, J. M. (2017). Assessment of CO₂ Emissions Reduction in High-Rise Concrete Office Buildings Using Different Material-Use Options. In *Handbook of Low Carbon Concrete*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00003-8>
- Churkina, G. (2012). Carbon cycle of urban ecosystems. In *Carbon Sequestration in Urban Ecosystems*. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2366-5_16
- Croft, J., Engelbrecht, S., Ladenika, A. O., MacGregor, O. S., Maepa, M., Bodunrin, M. O., Burman, N. W., Goga, T., & Harding, K. G. (2019). Review: the availability of life-cycle studies in Sweden. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24(1), 6–11. <https://doi.org/10.1007/s11367-018-1510-4>
- Dai, T., Yang, Y., Lee, R., Fleischer, A. S., & Wemhoff, A. P. (2020). Life cycle environmental impacts of food away from home and mitigation strategies—a review. *Journal of Environmental Management*, 265. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110471>
- D'Alessandro, A., Fabiani, C., Pisello, A. L., Ubertini, F., Luigi Materazzi, A., & Cotana, F. (2017). Innovative concretes for low-carbon constructions: A review. *International Journal*

of Low-Carbon Technologies, 12(3), 289–309.

<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0->

[85031758015&partnerID=40&md5=f683c73ef548afe0da22a8a6e02a67bd](https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85031758015&partnerID=40&md5=f683c73ef548afe0da22a8a6e02a67bd)

Dey, A., LaGuardia, P., & Srinivasan, M. (2011). Building sustainability in logistics operations: A research agenda. *Management Research Review*, 34(11), 1237–1259.

<https://doi.org/10.1108/01409171111178774>

Dixit, M. K. (2017). Life cycle embodied energy analysis of residential buildings: A review of literature to investigate embodied energy parameters. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79, 390–413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.051>

Dixit, M. K., Culp, C. H., Fernandez-Solis, J. L., & Lavy, S. (2016). Reducing carbon footprint of facilities using a facility management approach. *Facilities*, 34(3–4), 247–259.

<https://doi.org/10.1108/F-11-2014-0091>

Ebi, K. L., Vanos, J., Baldwin, J. W., Bell, J. E., Hondula, D. M., Errett, N. A., Hayes, K., Reid, C. E., Saha, S., Spector, J., & Berry, P. (2020). Extreme Weather and Climate Change: Population Health and Health System Implications. *Annual Review of Public Health*, 42, 293–315. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-012420-105026>

Fenner, A. E., Kibert, C. J., Woo, J., Morque, S., Razkenari, M., Hakim, H., & Lu, X. (2018).

The carbon footprint of buildings: A review of methodologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1142–1152. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.07.012>

Gangoellis, M., Casals, M., Gassó, S., Forcada, N., Roca, X., & Fuertes, A. (2009). A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the

construction process of residential buildings. *Building and Environment*, 44(3), 558–571.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.001>

Giama, E. (2015). Life cycle versus carbon footprint analysis for construction materials. In

Energy Performance of Buildings: Energy Efficiency and Built Environment in Temperate

Climates. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20831-2_6

Haque, N. (2020). The life cycle assessment of various energy technologies. In *Future Energy:*

Improved, Sustainable and Clean Options for Our Planet. [https://doi.org/10.1016/B978-0-](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00029-3)

[08-102886-5.00029-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102886-5.00029-3)

Ibrahim, M., Rachid, E., Awera, Y., & Beheiry, S. (2021). Green Building Retrofitting in the

UAE. *Advances in Science, Technology and Innovation*, 637–642.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-48465-1_105

Iddio, E., Wang, L., Thomas, Y., McMorrow, G., & Denzer, A. (2020). Energy efficient

operation and modeling for greenhouses: A literature review. *Renewable and Sustainable*

Energy Reviews, 117. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109480>

Janjua, S. Y., Sarker, P. K., & Biswas, W. K. (2019). A Review of Residential Buildings’

Sustainability Performance Using a Life Cycle Assessment Approach. *Journal of*

Sustainability Research, 1(1). <https://doi.org/10.20900/jsr20190006>

Kahn, M. E., & Walsh, R. (2015). Cities and the Environment. *Handbook of Regional and Urban*

Economics, 5, 405–465. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-59517-1.00007-6>

Khan, D., Khan, E. A., Tara, M. S., Shujaa, S., & Gardezi, S. (2021). Embodied Carbon

Footprint Assessment of a Conventional Commercial Building Using BIM. *Advances in*

Science, Technology and Innovation, 247–250. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48465-1_41

Kosicki, M., Tsiliakos, M., ElAshry, K., & Tsigkari, M. (2022). Big Data and Cloud Computing for the Built Environment. *Structural Integrity*, 20, 131–155. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82430-3_6

Kunal, Siddique, R., & Rajor, A. (2012). Use of cement kiln dust in cement concrete and its leachate characteristics. *Resources, Conservation and Recycling*, 61, 59–68. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.01.006>

Labaran, Y. H., Mathur, V. S., Muhammad, S. U., & Musa, A. A. (2022). Carbon footprint management: A review of construction industry. *Cleaner Engineering and Technology*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100531>

Lai, J. H. K., Yik, F. W. H., & Man, C. S. (2012). Carbon audit: A literature review and an empirical study on a hotel. *Facilities*, 30(9), 417–431. <https://doi.org/10.1108/02632771211235233>

Li, D. H. W., Yang, L., & Lam, J. C. (2012). Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones - A review. *Energy*, 42(1), 103–112. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.044>

Lip, Y. Y., Teo, F. Y., & Tang, I. Y. H. (2020). Carbon Footprint Analysis of Industrialised Building System in Malaysia. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 53, 817–825. https://doi.org/10.1007/978-3-030-32816-0_59

Luhar, S., Luhar, I., Abdullah, M. M. A. B., & Hussin, K. (2021). Challenges and prospective trends of various industrial and solid wastes incorporated with sustainable green concrete.

In *Advances in Organic Farming: Agronomic Soil Management Practices*.

<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822358-1.00001-8>

Ma, M., Cai, W., & Wu, Y. (2019). China Act on the Energy Efficiency of Civil Buildings (2008): A decade review. *Science of the Total Environment*, 651, 42–60.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.118>

Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., & Marrero, M. (2017). Carbon footprint of utility consumption and cleaning tasks in buildings. In *Environmental Carbon Footprints: Industrial Case Studies*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812849-7.00009-X>

Nain, A., Banerjee, A., & Melkania, N. P. (2021). Effects of Green Buildings on the Environment. In *Digital Cities Roadmap: IoT-Based Architecture and Sustainable Buildings*. <https://doi.org/10.1002/9781119792079.ch15>

Nelson, K., Retsina, T., Iakovlev, M., van Heiningen, A., Deng, Y., Shatkin, J. A., & Mulyadi, A. (2016). American process: Production of low cost nanocellulose for renewable, advanced materials applications. *Springer Series in Materials Science*, 224, 267–302.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-23419-9_9

Pacheco-Torgal, F. (2015). Introduction to Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. In *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*.

<https://doi.org/10.1533/9781782422884.1>

Sharma, A. K. (2022). Climate Responsive Traditional Urbanism of Jaipur. *Advances in 21st Century Human Settlements*, 195–229. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4089-7_7

- Shree, V., Nautiyal, H., & Goel, V. (2021). Carbon footprint estimation for academic building in india. *Environmental Footprints and Eco-Design of Products and Processes*, 55–70.
https://doi.org/10.1007/978-981-33-4373-3_3
- Şoimoşan, T. M. (2021). Environmental Impact of Buildings Heating Systems: Renewable Energy Sources and Energy Hub. *Springer Tracts in Civil Engineering*, 205–234.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-57418-5_8
- Srivastava, A., Singh, P., Janhavi, N. N., & Singh, A. (2017). Green buildings: Eco-friendly technique for modern cities. *Urban Book Series*, 415–432. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47145-7_26
- Vardoulakis, S., Dimitroulopoulou, C., Thornes, J., Lai, K.-M., Taylor, J., Myers, I., Heaviside, C., Mavrogianni, A., Shrubsole, C., Chalabi, Z., Davies, M., & Wilkinson, P. (2015). Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK. *Environment International*, 85, 299–313.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.010>
- Verma, P., Pandey, D., Krishnaswamy, U., Dutta, K., Daverey, A., & Arunachalam, K. (2021). Simultaneous Wastewater Treatment and Carbon Capture for Energy Production. *Energy, Environment, and Sustainability*, 127–145. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0638-0_7
- Wu, H. J., Yuan, Z. W., Zhang, L., & Bi, J. (2012). Life cycle energy consumption and CO₂ emission of an office building in China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 17(2), 105–118. <https://doi.org/10.1007/s11367-011-0342-2>

Wu, P., Xia, B., Pienaar, J., & Zhao, X. (2014). The past, present and future of carbon labelling for construction materials - A review. *Building and Environment*, 77, 160–168.

<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.023>

Zhang, Z., Wong, Y. C., Arulrajah, A., & Horpibulsuk, S. (2018). A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. *Construction and Building Materials*, 188,

1101–1118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.152>