

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL QUÍMICA Y AMBIENTAL
VALPARAÍSO – CHILE



**“PROPUESTA DE METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE
HUELLA DE CARBONO EN EDIFICACIONES”**

FRANCESCA ANDREA REYES MARTENS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERA CIVIL AMBIENTAL

PROFESORA GUÍA

PAMELA BONERT PUIG

PROFESOR CORREFERENTE:

DANIEL RAMIREZ LIVINGSTON

12 de julio de 2024

Resumen

Debido al rápido desarrollo de la humanidad y su aumento de población en los próximos 20 años, es que la población se adapta al entorno y transforma los recursos naturales para satisfacer sus necesidades provocando así impactos ambientales reflejados en el calentamiento global. Una de las principales adaptaciones son las viviendas, a nivel mundial, el sector de la construcción genera alrededor de un 37% de las emisiones totales de gases de efectos invernadero (GEI), donde 72% de estas emisiones provienen de la operación de edificaciones y el otro 28% proviene de los materiales (extracción y producción) y su uso durante la construcción. Sin embargo, en Chile, no existe información clara y disgregada de las emisiones de GEI en la industria de la Construcción, es por esto, que se requiere que los impactos de la industria sean medidos y controlados.

En el presente estudio, se cuantifican y analizan estos impactos mediante el indicador de huella de carbono, es decir, las emisiones de CO₂ equivalentes de una edificación habitacional, mediante la aplicación de una herramienta de cálculo creada en base al Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de una Edificación según la EN 15978 y EN15804, junto con el análisis de casos internacionales de cálculos para todo el ciclo de vida, comparativas entre distintos materiales y la forma en que son elaborados.

La aplicación se realiza a las etapas previas al uso de la vivienda, es decir obras preliminares y obra gruesa. De los resultados para una edificación de 11 pisos de hormigón se obtiene un total de emisiones de 1,217 ton CO₂ eq/m² liberadas al ambiente por metro cuadrado de superficie afectada de 1.154 m², donde se destacan el hormigón, combustibles utilizados para los movimientos de tierra y acero como los principales aportes en las emisiones con un 71,4% , 20,2% y 5,8% respectivamente, las cuales pueden ser reducidas con cambios en cómo se elaboran los materiales y utilizar otros combustibles según los casos internacionales analizados.

Si el estudio se proyecta a las viviendas a construir en Chile para el Programa de emergencia habitacional, se tiene un total 2.800 ton CO₂ eq/m², con las mismas condiciones de superficie y materialidad, notando que esta magnitud solo reflejada en cuanto a sus materiales es un indicador que se debiese considerar por el gobierno, tanto por sus distintos compromisos internacionales como para exigir e innovar en nuevas prácticas, leyes y otras iniciativas en este sector tan poco estudiado en su impacto ambiental.

Finalmente, el presente estudio, puede replantearse con otro tipo de indicador, como el Potencial de acidificación de tierra y agua, Potencial de eutrofización, entre otros que son de carácter local y se encuentran dentro de las DAP y no así el indicador de GWP, que su evaluación es de forma global. También, analizar los resultados respecto a superficie total

construida y no por área afectada, ya que las personas interesadas en realizar cambios dentro de la obra puedan considerarlo de manera particular para cada vivienda (departamento) y no en total para todo el edificio en construcción.

Palabras Claves: Huella de Carbono, Análisis de Ciclo de Vida de Edificaciones, GEI, Potencial de Calentamiento Global.

Abstract

Due to the rapid development of humanity and its population increase in the next 20 years, the population adapts to the environment and transforms natural resources to satisfy its needs, thus causing environmental impacts reflected in global warming. One of the main adaptations is housing; worldwide, the construction sector generates around 37% of total greenhouse gas (GHG) emissions, where 72% of these emissions come from the operation of buildings and the other 28% comes from materials (extraction and production) and their use during construction. However, in Chile, there is no clear and disaggregated information on GHG emissions in the Construction industry, which is why the impacts of the industry are required to be measured and controlled.

In this study, these impacts are quantified and analyzed using the carbon footprint indicator, that is, the equivalent CO₂ emissions of a residential building, through the application of a calculation tool created based on Life Cycle Analysis (LCA) of a Building according to EN 15978 and EN15804, together with the analysis of international cases of calculations for the entire life cycle, comparisons between different materials and the way in which they are made.

The application is carried out in the stages prior to the use of the home, that is, preliminary works and main work. From the results for an 11-story concrete building, a total of emissions of 1,217 tons of CO₂ eq/m² released into the environment per square meter of affected surface area of 1,154 m² are obtained, where concrete and fuels used for earthworks stand out. and steel as the main contributions to emissions with 71.4%, 20.2% and 5.8% respectively, which can be reduced with changes in how the materials are made and using other fuels according to the international cases analyzed.

If the study is projected to the homes to be built in Chile for the Housing Emergency Program, there is a total of 2,800 tons of CO₂ eq/m², with the same surface and material conditions, noting that this magnitude is only reflected in terms of its materials. It is an indicator that should be considered by the government, both for its different international commitments and to demand and innovate in new practices, laws and other initiatives in this sector so little studied in its environmental impact.

Finally, the present study can be reconsidered with another type of indicator, such as the acidification potential of land and water, eutrophication potential, among others that are local in nature and are found within the DAP and not the GWP indicator, that its evaluation is global. Also, analyze the results with respect to total constructed area and not by affected area, since people interested in making changes within the work can

consider it individually for each home (apartment) and not in total for the entire building under construction.

Keywords: Carbon Footprint, Life Cycle Analysis of Buildings, GHG, Global Warming Potential.

Agradecimientos

Las palabras son demasiado cortas para la gratitud que siento por todos ustedes.

Primeramente, a mi madre Marisol Martens que sin su esfuerzo nada de esto hubiera sido posible, gracias por alentarme día a día a continuar a pesar de todas las adversidades en nuestro camino. A mi hermana Katherine, que desde la distancia seguimos conectando nuestro particular cariño. A mi sobrino Paolo que todo lo que hago es para él. Y a mi padre Leonel Reyes que desde el cielo espero disfrute este momento junto a mi hermanito Lorenzo.

Mi familia, mis tías, tíos y primos que desde siempre he tenido sus palabras de ánimo para que este camino dejara de ser tan difícil. Para mi Lela, mi tía Solange y mi tío Nicolás, que siempre se preocuparon de mi bienestar. También para mis tías Flora y Corina, mis tíos Ricardo y Manuel, sus figuras tan paternas y maternas siempre serán mi guía en este camino de la vida, la espiritualidad y la educación.

Gracias a mis amigos de infancia, Ronny, Valentina, Noemi, Sofía y Rayder, a mis amigos de universidad Constanza, Mariela, Camila, Loreto, Kimberly, Jaime e Ignacio, las palabras de aliento, el tiempo y risas son impagables.

A mi compañera de vida, colega y hermana Daniela, las relaciones son igual que una flor que se riega, cuida y protege, nuestro camino lleno de aventuras, risas y llantos siga creciendo.

Agradezco a mi segunda familia, Hidalgo Catanzaro, que me otorgaron su hogar, tiempo y un lugar de contención en los momentos más precisos durante esta etapa.

A la comunidad de la USM, docentes, personal de asistencia, mis compañeros y amigos que hice en el proceso de mi etapa universitaria.

Finalmente, a ti mi Luz, que inesperadamente llegó a mi vida a hacer muy feliz y hacer de este proceso más calmo y llevadero.

Tabla de Contenidos

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Introducción y Objetivos..... | 12 |
| 1.1 | Planteamiento del problema | 12 |
| 1.2 | Justificación | 13 |
| 1.3 | Objetivos..... | 13 |
| 1.3.1 | Objetivo General: | 13 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos: | 13 |
| 2 | Marco Referencial | 14 |
| 2.1 | Cambio climático..... | 14 |
| 2.2 | Gases de efecto invernadero (GEI)..... | 15 |
| 2.3 | Descripción del Sector de la Construcción..... | 17 |
| 2.3.1 | Proyección de viviendas en Chile..... | 17 |
| 2.3.2 | Emisiones sector de la construcción | 19 |
| 2.3.3 | Materiales más contaminantes de la construcción..... | 21 |
| 2.4 | Huella de carbono..... | 23 |
| 2.4.1 | Factor de Emisión (FE) | 24 |
| 2.4.2 | Indicadores Ambientales | 25 |
| 2.4.3 | Metodologías existentes para cálculo de Huella de Carbono | 25 |
| 2.4.4 | Análisis de ciclo de vida de producto | 27 |
| 2.4.5 | Normativas Internacionales Aplicables para el Cálculo de Huella de Carbono 29 | |
| 2.4.6 | Análisis de Casos Internacionales en Calculo de Huella de Carbono | 36 |
| 3 | Marco Metodológico | 38 |
| 3.1 | Descripción de la Hoja de Cálculo | 39 |
| 3.1.1 | Bases de Datos..... | 39 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.1.2 | Hoja de Ingreso de Datos..... | 41 |
| 3.2 | Cálculo de emisiones Caso a analizar | 45 |
| 3.2.1 | Descripción del edificio a evaluar | 45 |
| 3.2.2 | Estimaciones y discretización..... | 46 |
| 3.2.3 | Factores de emisión utilizados..... | 49 |
| 4 | Resultados | 51 |
| 4.1 | Resultados Generales..... | 51 |
| 4.2 | Módulo A1 – A3..... | 53 |
| 4.3 | Módulo A4..... | 54 |
| 4.4 | Módulo A5..... | 55 |
| 5 | Discusiones..... | 56 |
| 6 | Conclusiones | 57 |
| 7 | Referencias..... | 59 |
| | Anexos | 63 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Ilustración 1: Cambio en la temperatura media en superficie (1986-2005 a 2081-2100). | 15 |
| Ilustración 2: Emisiones de GEI totales por sector en Chile desde 1990-2020..... | 16 |
| Ilustración 3: Inversión en Construcción, proyección 2024. Fuente: (Cámara Chilena de la Construcción, 2024)..... | 18 |
| Ilustración 4: Venta de viviendas y proyecciones. Fuente: (Cámara Chilena de la Construcción, 2024) | 19 |
| Ilustración 5 Proporción de la Demanda Energética en Chile 2020, separada por usuario. | 21 |
| Ilustración 6: Diagrama del proceso para la evaluación del desempeño ambiental de los Edificios..... | 33 |
| Ilustración 7: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría – Edificio | 51 |
| Ilustración 8: Emisiones y Porcentaje de Incidencia por Partida | 52 |
| Ilustración 9: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría - Modulo A1-A3. | 53 |
| Ilustración 10: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría - Modulo A4 | 54 |
| Ilustración 11: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría - Modulo A5 | 55 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Resumen Módulo A1-A3 | 34 |
| Tabla 2: Resumen Módulo A4-A5. | 34 |
| Tabla 3: Resumen Módulo B1-B7..... | 35 |
| Tabla 4: Resumen Módulos C1-C4 | 36 |
| Tabla 5: Base de datos de Factores de emisión de Materiales..... | 40 |
| Tabla 6: Factores de emisión de Combustibles | 40 |
| Tabla 7: Factores de Emisión Energía Eléctrica..... | 41 |
| Tabla 8: Comercios de Hormigón y Cemento para estimación de distancia..... | 46 |
| Tabla 9: Comercios de Madera para estimación de distancia | 47 |
| Tabla 10: Comercios de Aceros para estimación de distancia. | 47 |
| Tabla 11: Comercios de Áridos para estimación de distancia..... | 47 |
| Tabla 12: Comercios de Otros Materiales para estimación de distancia. | 48 |
| Tabla 13: Vertederos y Rellenos sanitarios para estimación de distancia..... | 48 |
| Tabla 14: Tiempo estimado de uso de Equipos y Maquinarias..... | 49 |
| Tabla 15: Factores de Emisión - Combustibles y Energía Eléctrica. | 49 |
| Tabla 16: Indicadores de Potencial de Calentamiento Global por Material..... | 50 |
| Tabla 17: Resultados Generales de Emisión de CO2..... | 51 |
| Tabla 18: Resumen de Resultados por Partida | 52 |
| Tabla 19: Resultados de Emisiones por Categoría Modulo A1-A3 | 53 |
| Tabla 20: Resultados de Emisiones por Categoría Módulo A4 | 54 |
| Tabla 21: Resultados de Emisiones por Categoría Módulo A5 | 55 |

Anexos

| | |
|---|----|
| Anexo 1: Tabla de Base de Datos de Materiales Disponibles..... | 63 |
| Anexo 2: Tabla Ingreso de Datos de Itemizado/Presupuesto de Construcción..... | 65 |
| Anexo 3: Tabla Ingreso de Datos de Módulo A1-A3..... | 65 |
| Anexo 4: Tabla Ingreso de Datos de Módulo A4..... | 66 |
| Anexo 5: Tabla Ingreso de Datos de Módulo A5..... | 67 |
| Anexo 6: Tabla Ingreso de Datos de Módulo B1..... | 67 |
| Anexo 7: Tabla Ingreso de Datos Módulo B2-B5..... | 68 |
| Anexo 8: Tabla Ingreso de Datos de Módulo B6..... | 68 |
| Anexo 9: Tabla Ingreso de Datos de Módulo C1..... | 69 |
| Anexo 10: Tabla Ingreso de Datos de Módulo C2..... | 69 |
| Anexo 11: Plano de Obra - Vista Superior..... | 70 |
| Anexo 12: Mapa de Ubicación Geográfica de Obra..... | 70 |
| Anexo 13: Plano de Arquitectura de Obra..... | 71 |
| Anexo 14: Presupuesto parcial de Obra..... | 72 |
| Anexo 15: Mapa de ubicación geográfica de Comercios Considerados..... | 74 |
| Anexo 16: Mapa de ubicación geográfica de Lugares de Disposición de Residuos..... | 75 |

1 Introducción y Objetivos

1.1 Planteamiento del problema

A nivel mundial, el sector de la construcción genera alrededor de un 37% de las emisiones totales de gases de efectos invernadero (GEI), donde 72% de estas emisiones provienen de la operación de edificaciones y el otro 28% proviene de los materiales (extracción y producción) y su uso durante la construcción al año 2022. Al año 2023, la normativa vigente ha incrementado a un 81% para construcciones residenciales y un 77% para estructuras no residenciales, de las cuales el 80% son obligatorias, sin embargo, un 30% de estas no han sido actualizadas desde el 2015, lo cual implica que no cumpla con los estándares de alto desempeño (United Nations Environment Programme, 2024).

Chile, en el marco del Acuerdo de París, se ha comprometido a alcanzar la carbono-neutralidad al año 2050 (Ministerio de Relaciones Exteriores, 2020) Sin embargo, debido a que en el INGEI no existe información clara y disgregada de las emisiones generadas por el sector construcción en su ciclo completo, no existe un marco normativo claro de exigencia de gestión de emisiones para este sector. En este contexto, es que no existe obligatoriedad, ni incentivos para el reporte de emisiones de este sector y por consecuencia hay ausencia de datos ambientales e impactos asociados al sector a nivel nacional. No obstante, se identifica cierto interés por parte de algunos actores del sector por obtener esta información, tales como el Ministerio de Obras Públicas y Mesas intersectoriales lideradas por el Instituto de la Construcción y el Construye 2025, con el objetivo de definir políticas y ciertos criterios de competencia verde en el mercado nacional.

En base a todo lo anterior, es imperante que el sector de la construcción cuente con una estrategia para la cuantificación de la huella de carbono, con el fin de generar un indicador del impacto de las actividades o procesos de la construcción sobre el cambio climático, y así, establecer acciones concretas para la contabilidad de GEI de todas las edificaciones, realizando un análisis de las metodologías existentes y que se adapte de mejor manera a la realidad chilena, para lograr generar líneas base y mecanismos de medición, reporte y verificación, que sean de utilidad para lograr definir metas de reducción y acciones para cumplir con los objetivos y acuerdos definidos a fin de alcanzar la carbono neutralidad, además de impulsar a nuevas tecnologías para lograr construcciones sostenibles.

Finalmente, en combinación de las distintas metodologías, es que se diseña la herramienta para el cálculo de huella de carbono y se aplica a un presupuesto entregado para la etapa de obra gruesa de un proyecto de edificación habitable en la comuna de Independencia, Región Metropolitana, Chile.

1.2 Justificación

Actualmente en Chile, la cuantificación de la huella de carbono es solo parte de la agenda de sectores exportadores como minero, pesquero, agroindustrial y forestal, por lo que el rubro de la construcción no se le ha entregado la debida relevancia en sus aportes al cambio climático.

Con el objetivo de establecer una herramienta que facilite su medición es que se plantea una metodología para el cálculo de huella de carbono específicamente para edificaciones abordando el ciclo de vida completo, permitiendo así que las empresas que se desenvuelven en este rubro, como constructoras, inmobiliarias, entre otras, pueden determinar propuestas de diseño completo considerando tanto los aspectos técnicos, económicos como su componente ambiental.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Proponer una metodología de cálculo de huella de carbono para el ciclo completo de edificación, para cuantificar, de forma estimada, el impacto de la industria de construcción en Chile.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Recopilar antecedentes sobre metodologías de cálculo de huella de carbono, para analizar e identificar su relación al área de la construcción.
- Analizar experiencias internacionales de cálculos de Huella de carbono en el ciclo completo de la edificación.
- Generar un modelo para el cálculo estimado de huella de carbono para edificaciones.
- Aplicar el modelo de cálculo para analizar dos etapas de proyectos de construcción en ejecución.

2 Marco Referencial

Con el fin de establecer una base teórica sobre la cual plantear el presente estudio, primeramente, es relevante aclarar algunos conceptos de importancia. Por esto, se explican algunos conceptos y referencias clave para una adecuada comprensión.

2.1 Cambio climático

Según la definición del Grupo intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC, por sus siglas en inglés), el cambio climático corresponde a “cambios en el estado del clima identificables mediante cambios en la media y/o la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos periodos de tiempo, generalmente decenios o periodos más largos.” (IPCC, 2018) y que “la actividad humana (95% para mayor exactitud) es la causal dominante del aumento promedio de la temperatura del planeta Tierra desde 1950” (IPCC, 2014).

La CMNUCC, en su artículo 1, define el cambio climático como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a variabilidad climática natural observada durante períodos de tiempo comparables” (Naciones Unidas, 1992), donde se distingue la diferencia entre las atribuciones provocados por la naturaleza propiamente tal y las alteraciones debido a las actividades humanas.

Chile es uno de los tantos países que se encuentran vulnerables al cambio climático, a pesar de ser responsables del 0,25% de las emisiones, contamos con 7 de las 9 condiciones de vulnerabilidad definidas por la ONU (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.), donde durante los últimos años hemos presenciado los aumentos de temperatura, olas de calor, la erosión de nuestras costas, el aumento de frecuencia y volúmenes de precipitación provocando las inundaciones de distintas comunas de nuestro país posterior a años de sequía. El año 2019, el país presentaba un déficit promedio de 23% siendo este el segundo año más seco desde 1981. Por otra parte, también existen otros países en desarrollo o menos desarrollados los cuales sufren mayor escasez de sus distintos recursos y poseen capacidades técnicas limitadas como muchos del continente africano.

2.2 Gases de efecto invernadero (GEI)

Los GEI son aquellos constituyentes gaseosos de la atmósfera, que pueden ser naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación a una longitud de onda específica que se encuentra dentro del espectro de radiación terrestre emitida por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes, provocando el efecto invernadero, por ende, contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. Los principales GEI de la atmósfera terrestre son vapor de agua (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y el ozono (O₃) (Easterbrook, 2016). A estos se les suma los gases que contemplan los Protocolo de Kioto y Montreal como hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, halocarbonos y otras sustancias que contienen cloro y bromo (Iwata & Okada, 2014)

Si bien los GEI pueden ser producidos naturalmente, la afectación de estos hoy en día es por el incremento abundante debido a las actividades humanas, por lo que distintas organizaciones y entidades gubernamentales han estudiado sus efectos negativos a largo plazo. El IPCC en su informe del año 2014 presenta el cambio de temperatura en la superficie y los niveles de precipitación hacia el año 2100 con 2 distintos escenarios de trayectoria de concentración representativas (RCP por sus siglas en inglés), RCP 2,6 representa un escenario que tiene por objetivo que sea probable mantener el calentamiento global a menos de 2°C, es decir, un escenario de mitigación estricto y RCP 8,5 o escenario “business as usual” (negocios como siempre), que representa un escenario con un nivel muy alto de emisiones de GEI donde se continúan aumentando durante todo el siglo XXI.

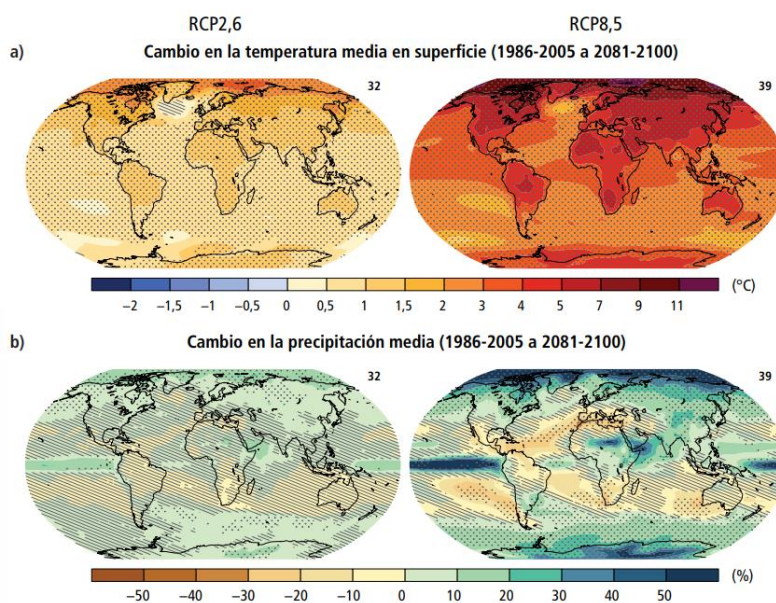


Ilustración 1: Cambio en la temperatura media en superficie (1986-2005 a 2081-2100).

Fuente: (IPCC, 2014)

Según el 5° informe del IPCC del año 2014, en la Ilustración 1 “En todos los escenarios de emisiones evaluados, las proyecciones señalan que la temperatura en superficie continuará aumentando a lo largo del siglo XXI. Es muy probable que las olas de calor ocurran con mayor frecuencia y duren más, y que los episodios de precipitación extrema sean más intensos y frecuentes en muchas regiones. El océano se seguirá calentando y acidificando, y el nivel medio global del mar continuará elevándose”.

Chile, a través del SNI, presenta los valores de emisiones de GEI en kilotoneladas de CO₂ equivalentes de los sectores de energía, IPPU, agricultura y residuos. En la Ilustración 2, se puede evidenciar el aumento de estos de casi 50.000kt a sobre 100.000kt de CO₂ equivalente para el año 2020. Respecto a este último año 2020, se nota una reducción en un 5,2% debido a la pandemia por COVID-19, sin embargo, los informes elaborados por los diversos organismos de la ONU, como por ejemplo “United in Science 2021” (World Meteorological Organization, 2021) y “United in Science 2023 (World Meteorological Organization, 2023), revelan que a pesar del cese de actividades industriales a nivel mundial, igualmente aumentaron las concentraciones de GEI durante el año 2020 y primer semestre de 2021, y que las emisiones totales de CO₂ procedentes por combustibles fósiles aumentaron un 1% a nivel mundial durante el año 2022 comparado al año 2021, principalmente debido a la recuperación del sector de aviación.

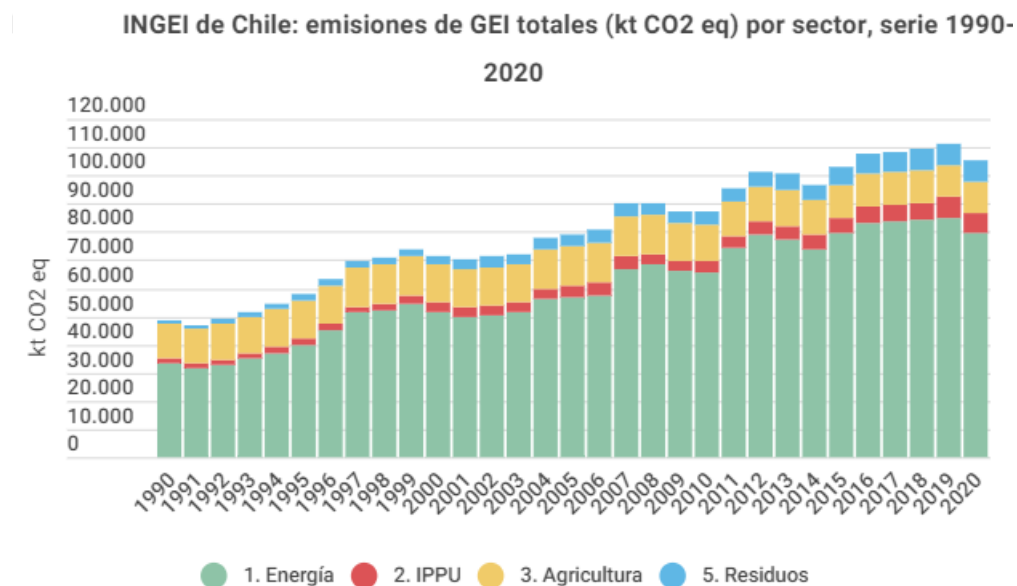


Ilustración 2: Emisiones de GEI totales por sector en Chile desde 1990-2020.

Fuente: (Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SNI), 2020)

2.3 Descripción del Sector de la Construcción

Primeramente, para poder entender de mejor manera este estudio, se deben comprender los siguientes conceptos, que son fundamentales para organizar, planificar y gestionar los distintos aspectos de los proyectos de construcción, estos son las “etapas”, “categorías” y “partidas”. A continuación, se describe cada uno de estos términos:

- a) Etapa: se refieren a las fases o periodos en los que se divide un proyecto de construcción desde el inicio hasta finalizarlo y varían según el tipo y la complejidad del proyecto, comúnmente incluyen Etapa de diseño, Preparación del sitio, Construcción, Instalación de Servicios, Terminaciones y Entrega. Siempre hay actividades o tareas específicas que concluir antes de continuar con la siguiente fase de construcción.
- b) Categoría: clasifican y agrupan los distintos tipos de actividades, recursos, materiales o costos asociados al proyecto y se definen en función de las actividades o elementos en construcción, como estructuras, instalaciones eléctricas, entre otras, facilitando la gestión del proyecto y dando una mayor precisión en el seguimiento del progreso en la construcción del proyecto y los costos asignados.
- c) Partida: elemento o tarea específica dentro de una categoría que requiere de un análisis y asignación de recursos, estas suelen ser representadas en unidades de trabajo u otras unidades de medidas que pueden ser cuantificadas y presupuestadas por separado.

Ejemplificando estos tres conceptos se tiene, dentro de la “etapa” de construcción, están las “categorías” estructuras y terminaciones, y una “partida” de cada una de estas sería los muros de contención para la primera, mientras que para terminaciones podría ser la instalación de pisos de cerámica o pintar muros.

2.3.1 Proyección de viviendas en Chile

En cuanto a nivel nacional, según el último informe de la Cámara Chilena de la Construcción “Macroeconomía y Construcción 65 (MACH 65)”, se estima que el rubro de la construcción tendrá una caída en un 1,3% en el presente año, ya que se tienen en consideración distintos factores como el incremento de la inflación a nivel mundial y nacional, llevando al aumento de los precios de materiales, tasas de interés y desempleo, junto a la desconfianza de los empresario de la construcción, lo que conlleva a limitar el acceso a vivienda en mediano plazo a los chilenos.

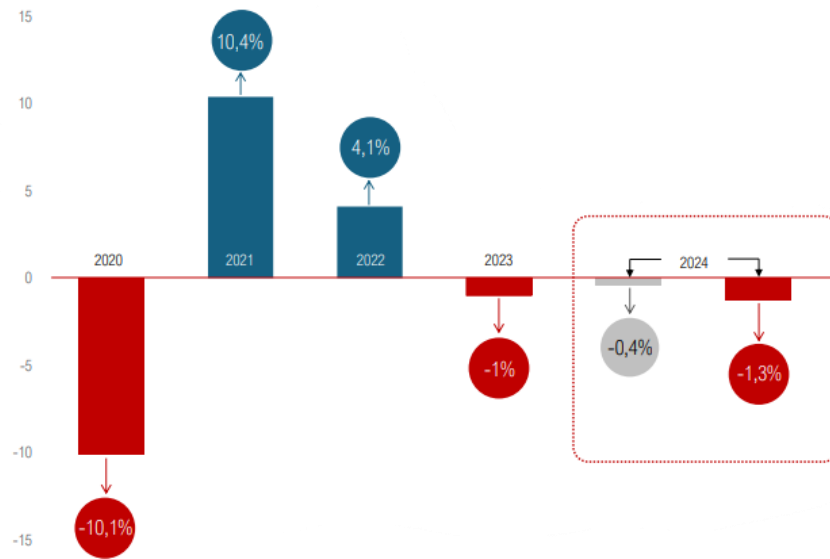


Ilustración 3: Inversión en Construcción, proyección 2024. Fuente: (Cámara Chilena de la Construcción, 2024)

A pesar de esto, la inversión para viviendas públicas está marcando un record histórico con una inversión de más de US\$ 3.870 millones destinados a la ejecución de programas habitacionales e inversión en ciudad, lo que representa un incremento de un 9% respecto al año 2023.

Esta inversión se debe a que el presente gobierno busca acortar la brecha de déficit habitacional existente en el país de más de 1 millón de familias sin vivienda propia, proponiéndose así el Plan de Emergencia Habitacional, el cual considera la construcción de 260 mil viviendas en el periodo de 4 años, con una producción de alrededor de 15.000 viviendas en promedio por región.

2.3.1.1 Impacto económico y social

Considerando el volumen de viviendas proyectadas a construcción para el 2025, el mercado inmobiliario se prevé un incremento de un 4% anual indicado en la Ilustración 4, si las relaciones entre el privado y el gobierno se fortalecen con el nuevo “Pacto Fiscal”, donde principalmente se espera la reducción del tiempo de resolución de los permisos de edificación en 1/3 que implicaría en generar crecimiento del PIB en 2,4% anual, por lo que las familias de clase media serían las más beneficiadas para poder adquirir viviendas propias.



Ilustración 4: Venta de viviendas y proyecciones. Fuente: (Cámara Chilena de la Construcción, 2024)

2.3.2 Emisiones sector de la construcción

La industria de la construcción puede ser una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero debido a la energía utilizada en la fabricación de materiales de construcción, el transporte de materiales, el funcionamiento de maquinaria pesada y la energía consumida durante la vida útil de los edificios. Algunos de los principales gases de efecto invernadero asociados con la construcción son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O_x) y el dióxido de azufre (SO₂). (Stacey, 2023)

Como en muchas partes del mundo, la construcción en Chile puede generar diversos impactos ambientales, incluida la contaminación del aire, el agua y el suelo. Algunos de los principales problemas ambientales asociados con la industria de la construcción en Chile son los siguientes:

1. Contaminación del aire: Las emisiones de polvo, gases y partículas finas durante la construcción de carreteras, edificios y otras infraestructuras pueden afectar la calidad del aire en las zonas cercanas. Esto puede conducir a problemas respiratorios y agravar condiciones de salud preexistentes en la población.
2. Contaminación del agua: Durante las actividades de construcción, se pueden liberar productos químicos, combustibles y otros contaminantes que terminan en cuerpos de agua cercanos. Esto puede causar la contaminación de ríos y lagos, afectando la vida acuática y también potencialmente afectando la disponibilidad de agua potable para las comunidades locales.

3. Destrucción del hábitat y pérdida de biodiversidad: La construcción de infraestructuras puede implicar la destrucción de hábitats naturales y áreas verdes, lo que puede llevar a la pérdida de biodiversidad y la interrupción de los ecosistemas locales.
4. Generación de residuos: La industria de la construcción produce grandes cantidades de residuos, como escombros y materiales no utilizados, que a menudo terminan en vertederos, contribuyendo a la contaminación del suelo.

Para abordar estos problemas, es fundamental que las autoridades chilenas implementen regulaciones ambientales más estrictas y fomenten prácticas de construcción sostenibles. Esto incluye el uso de tecnologías más limpias, la adopción de materiales de construcción más amigables con el medio ambiente y una gestión adecuada de los residuos generados.

Es por esto que el sector de la construcción en Chile y en todo el mundo han comenzado a adoptar algunas estrategias para reducir las emisiones de GEI en el ámbito de la construcción que incluyen:

1. Eficiencia energética: Implementar tecnologías y materiales que reduzcan el consumo de energía en edificios y obras en construcción.
2. Energías renovables: Integrar fuentes de energía renovable, como paneles solares y sistemas de energía eólica, para alimentar proyectos de construcción.
3. Materiales sostenibles: Utilizar materiales de construcción con menor huella de carbono y que sean reciclables o biodegradables.
4. Planificación urbana inteligente: Diseñar ciudades y comunidades que promuevan la movilidad sostenible y reduzcan la necesidad de transporte en automóvil.
5. Gestión de residuos: Minimizar los residuos de construcción y demolición, así como fomentar el reciclaje y la reutilización de materiales.
6. Certificaciones sostenibles: Buscar certificaciones como LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) u otras equivalentes que evalúen y reconozcan la sostenibilidad en la construcción.

En Chile, el 23,1% de la energía total consumida se utiliza en la operación de edificaciones como se muestra en la Ilustración 5 elaborada con valores obtenidos del Balance Energético Nacional (BNE) del 2020.

Proporción de la Demanda Energética en Chile, 2020

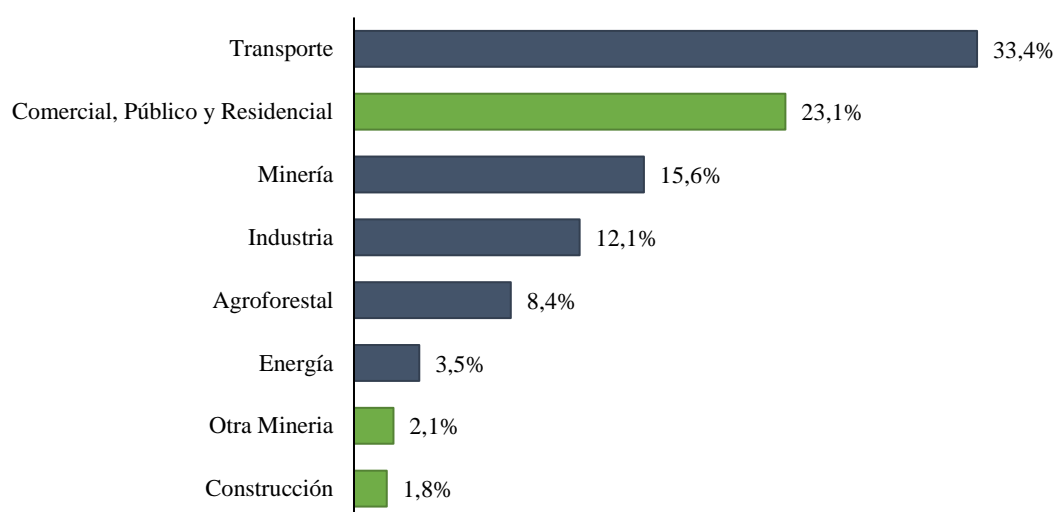


Ilustración 5 Proporción de la Demanda Energética en Chile 2020, separada por usuario.

Fuente: Elaboración propia a partir de Balance Energético Nacional 2020 (Ministerio de Energía, 2020).

Teniendo todo esto en cuenta, es necesario medir la huella de carbono de edificaciones para que los múltiples actores que están interesados como:

- Usuarios sectoriales: Ministerios, Academia o Consejos, que requieren la información para definir políticas públicas o estudios técnicos. Por ejemplo, el MMA para el cálculo del INGEL.
- Industria de la construcción: requiere la información para lograr certificaciones o diferenciarse dentro del mercado inmobiliario
- Industria de productos de la construcción: al igual que la industria de la construcción requiere la información para lograr certificaciones, mejorar sus procesos productivos y lograr diferenciarse en el mercado.

2.3.3 Materiales más contaminantes de la construcción

Como se vio anteriormente, la industria de la construcción solo utiliza un 1,8% de energía según el BNE 2020, sin embargo, más allá de la gran demanda energética para su producción, se debe considerar la utilización de recursos naturales y la liberación de sustancias tóxicas durante su ciclo de vida. Algunos de los materiales más problemáticos desde el punto de vista ambiental incluyen:

1. **Cemento:** La producción de cemento es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la industria de la construcción. La producción de clínker de cemento implica calentar piedra caliza y otros materiales a altas temperaturas, lo que libera grandes cantidades de CO₂. Además, el proceso de producción del cemento también libera otras emisiones contaminantes y utiliza grandes cantidades de agua. La extracción de materiales para su fabricación puede causar degradación del paisaje y destrucción de ecosistemas.

En general, se estima que la producción de una tonelada de cemento puede generar aproximadamente entre 0.8 y 1 tonelada de dióxido de carbono (CO₂) equivalente en emisiones de GEI. Esta cantidad incluye tanto las emisiones directas de CO₂ liberadas durante el proceso de calcinación de la piedra caliza para producir clínker de cemento como las emisiones indirectas asociadas con la generación de energía utilizada en el proceso (World Business Council for Sustainable Development, 2011).

Las emisiones de GEI de la industria del cemento se han convertido en un área de atención para reducir el impacto ambiental de esta industria. Se están llevando a cabo esfuerzos para mejorar la eficiencia energética, utilizar energías renovables, desarrollar tecnologías de Captura y Almacenamiento de Carbono (CAC), y promover el uso de cementos bajos en carbono y materiales de construcción alternativos para reducir la huella de carbono asociada con la producción de cemento.

2. **Acero:** El proceso de fabricación del acero, que incluye la reducción del mineral de hierro, también es intensivo en carbono y energía. La extracción de materias primas y el procesamiento de acero pueden contribuir significativamente a la contaminación del aire y del agua.

En general, la producción de una tonelada de acero virgen puede generar alrededor de 1,8 a 2,3 toneladas de CO₂. Estos valores están basados en datos promedio de la industria siderúrgica y pueden variar según el país y la tecnología específica utilizada (ClimateScience, 2023).

Es importante tener en cuenta que la producción de acero reciclado, es decir, acero obtenido a partir de material reciclado en lugar de materias primas vírgenes, tiene un impacto ambiental mucho menor en términos de emisiones de GEI. La producción de acero reciclado puede reducir las emisiones de CO₂ en aproximadamente un 58-86% en comparación con la producción de acero virgen.

Además, las emisiones de GEI asociadas con la producción de acero también pueden verse afectadas por políticas gubernamentales y regulaciones ambientales que busquen reducir las emisiones y promover prácticas más sostenibles en la industria.

3. **Plásticos:** El uso de materiales plásticos en la construcción, como PVC y poliestireno expandido (EPS), puede ser problemático debido a que muchos plásticos liberan sustancias químicas tóxicas durante su producción y descomposición. Además, los plásticos pueden persistir durante mucho tiempo en el medio ambiente, lo que aumenta el problema de la contaminación por residuos plásticos.
4. **Madera tratada con productos químicos:** La madera tratada con ciertos productos químicos para protegerla de la humedad y los insectos puede liberar sustancias tóxicas en el aire y el suelo.
5. **Aislantes y espumas de poliuretano:** Algunos aislantes y espumas utilizados en la construcción pueden contener productos químicos nocivos, como los retardantes de llama bromados, que pueden liberarse al medio ambiente y causar daños.
6. **Ladrillos y cerámicos cocidos:** La fabricación de ladrillos y cerámicos cocidos puede liberar emisiones contaminantes y consumir grandes cantidades de energía.

Para abordar estos problemas, los esfuerzos se centran cada vez más en promover prácticas de construcción más sostenibles y en la búsqueda de alternativas más respetuosas con el medio ambiente, como el uso de cementos bajos en carbono, materiales reciclados, maderas certificadas y materiales de construcción naturales y renovables. La adopción de estas alternativas puede ayudar a reducir significativamente el impacto ambiental de la industria de la construcción.

2.4 Huella de carbono

La huella de carbono se define como el conjunto de emisiones de gases de efecto invernadero producidas, directa o indirectamente, por personas, organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas, en términos de CO₂ equivalentes (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.).

La medición de la huella de carbono, parte del protocolo de Kioto de 1997 para frenar el cambio climático, puesto que sirve como una herramienta útil para cuantificar y generar un indicador del impacto de una actividad o proceso sobre el cambio climático.

2.4.1 Factor de Emisión (FE)

La EPA (Environmental Protection Agency), describe los factores de emisión como *"representaciones de las tasas de emisión por unidad de actividad, usado para convertir datos de actividad (como el consumo de combustible) en estimaciones de emisiones"* (EPA, 1995)

Los factores de emisión (FE) son una métrica crucial que se utiliza como indicador ambiental para estimar la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera durante las distintas actividades que realiza el ser humano como utilización de energía eléctrica, descomposición de residuos, procesos de refinación, uso de combustibles fósiles en automóviles, principalmente de los diferentes materiales, productos, servicios o procesos y que son una parte clave en el cálculo de huella de carbono.

La cantidad expresada suele escribirse como un equivalente de dióxido de carbono o CO_{2eq} en masa, es decir, los resultados de cálculo de huella de carbono incluyen más GEI que solo el CO₂.

Para determinar su valor existen diversas formas que son desde la modelización de forma teórica hasta pruebas directas en la fuente de emisión, esta variabilidad de pruebas es la que representan como media entre todos los datos disponibles u en otros casos se indica su incertidumbre. (ClimatePartner, s.f.).

Podemos acceder a los FE a través de bases de datos de acceso gratuito o realizar los cálculos debidos regidos por el instructivo del IPCC, algunas de las bases de datos más conocidas son:

- Base de Datos de Factores de Emisión del IPCC
- Base de Datos de Factores de Emisión de la EPA
- Base de Datos de Factores de Emisión de la EEA (European Environment Agency)
- Base de Datos del Programa Global de Análisis de Emisiones y Mitigación (GAINS)
- Base de Datos de Factores de Emisión de la Agencia Internacional de Energía (IEA)
- Base de Datos de Factores de Emisión del Carbon Trust
- Base de Datos de Factores de Emisión del Banco Mundial

2.4.2 Indicadores Ambientales

Un indicador ambiental es una medida que refleja el estado de una variable ambiental específica en un momento dado y que puede ser utilizada para evaluar las condiciones ambientales y los cambios a lo largo del tiempo (PNUMA). Diversas entidades gubernamentales ofrecen definiciones de indicadores ambientales, que suelen enfatizar su papel en la evaluación, monitoreo y gestión del medio ambiente.

2.4.2.1 Características Comunes de los Indicadores Ambientales

- **Especificidad:** Deben estar claramente definidos y ser relevantes para un aspecto ambiental específico.
- **Medibilidad:** Deben ser cuantificables y basados en datos sólidos y verificables.
- **Relevancia:** Deben ser pertinentes para la toma de decisiones y para el monitoreo de políticas y programas ambientales.
- **Temporalidad:** Deben permitir el seguimiento de cambios a lo largo del tiempo.
- **Accesibilidad:** La información debe ser fácilmente accesible y comprensible para los responsables de la toma de decisiones y el público en general.

2.4.2.2 Indicadores ambientales relevantes en obras de construcción:

- **Calidad del aire:** Niveles de contaminantes como el ozono troposférico, partículas PM2.5 y dióxido de nitrógeno.
- **Calidad del agua:** Concentraciones de nitratos y fosfatos en cuerpos de agua, niveles de oxígeno disuelto.
- **Biodiversidad:** Número de especies amenazadas, extensión de hábitats naturales.

2.4.3 Metodologías existentes para cálculo de Huella de Carbono

Protocolo de emisiones de gases de efecto invernadero (GHG protocol, por sus siglas en inglés) es un marco de referencia reconocido y ampliamente utilizado para medir, gestionar e informar sobre las emisiones de gases de efecto invernadero. Fue desarrollado por el World Resources Institute (WRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) en colaboración con empresas, gobiernos y organizaciones ambientales.

El Protocolo GHG proporciona una metodología estandarizada para que las organizaciones puedan cuantificar y reportar sus emisiones de gases de efecto invernadero. Cubre tres principales ámbitos de emisiones:

1. Emisiones del alcance 1 (Scope 1): Incluyen las emisiones directas de gases de efecto invernadero que provienen de fuentes propiedad o controladas por la organización, como las emisiones de los procesos industriales, la quema de combustibles fósiles en instalaciones propias y las fugas de gases refrigerantes.
2. Emisiones del alcance 2 (Scope 2): Estas son las emisiones indirectas asociadas con el consumo de electricidad, calor o vapor adquiridos por la organización. Estas emisiones se generan fuera de las instalaciones de la organización, pero son consecuencia de sus actividades.
3. Emisiones del alcance 3 (Scope 3): Son las emisiones indirectas que surgen de las actividades de la organización pero que son generadas por fuentes que están fuera de su propiedad o control. Estas pueden incluir las emisiones derivadas de la cadena de suministro, el transporte de productos, el uso de los productos vendidos, la disposición de residuos, entre otros.

2.4.3.1 Enfoques para cuantificar la huella de carbono

Existen varios tipos de huella de carbono o también llamados enfoques de huella de carbono, que pueden calcularse para evaluar el impacto de diferentes actividades, productos o eventos en las emisiones de gases de efecto invernadero. Algunos de los enfoques más comunes de huella de carbono son:

1. Enfoque Corporativa u Organizacional
2. Enfoque de Producto o servicio
3. Enfoque en eventos
4. Enfoque de Ciudad o Territorial
5. Enfoque Personal
6. Enfoques específicos por Industria

Los enfoques de mayor uso son:

1. Huella de Carbono Corporativa u Organizacional: mide la huella durante un periodo de tiempo establecido de una empresa u organización en el desarrollo de actividades y operaciones. Se cuantifican las emisiones directas e indirectas asociadas a la energía utilizada, procesos, movilidad, entre otros.

Metodologías: Norma internacional ISO 14064 y el Estándar corporativo de contabilidad y reporte (GHG Protocol) del Instituto de Recursos Mundiales (WRI) y el Consejo Mundial Empresarial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD).

2. Huella de Carbono de Producto: Este tipo de huella evalúa las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción, distribución, uso y disposición de un producto específico a lo largo de su ciclo de vida. Permite identificar las etapas con mayores impactos climáticos y promueve el diseño y fabricación de productos más sostenibles. Ha tenido un gran impacto y desarrollo en Europa y Japón, donde el etiquetado de productos es una tendencia creciente y rápidamente se está extendiendo hacia otros países, principalmente países exportadores.

Metodologías: Especificaciones para la evaluación del ciclo de vida de las emisiones de gases de efecto invernadero de bienes y servicios (PAS 2050:2011) desarrollada por la BSI Group a petición del Gobierno del Reino Unido.

3. Huella de Carbono de Evento: Se refiere a las emisiones de gases de efecto invernadero generadas por eventos como conferencias, festivales, conciertos, ferias, entre otros. Incluye tanto las emisiones directas relacionadas con la energía utilizada durante el evento como las emisiones indirectas asociadas con la movilidad de los asistentes y la producción de materiales.

Eventos de pequeña y gran envergadura han neutralizado sus emisiones de gases de efecto invernadero, algunos ejemplos destacables son el evento de lanzamiento de la segunda comunicación nacional de Chile, el festival Lollapalooza, la Conferencia de las Partes 16 en Cancún (México), la feria Carbon Expo, entre muchos otros (Ministerio del Medio Ambiente, s.f.).

Cada tipo de huella de carbono se enfoca en dimensiones específicas y tiene distintas aplicaciones para la toma de decisiones sostenibles y la lucha contra el cambio climático. La medición y reducción de estas huellas son fundamentales para contribuir a la mitigación del cambio climático y avanzar hacia una economía más baja en carbono y más sostenible.

2.4.4 Análisis de ciclo de vida de producto

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología que se utiliza para evaluar el impacto ambiental de un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su eliminación final. El objetivo principal del ACV es proporcionar una visión integral de los impactos ambientales asociados con un

producto o proceso, de modo que se puedan identificar áreas clave para mejorar su sostenibilidad y reducir su huella ambiental.

El ACV generalmente consta de cuatro etapas principales:

1. Definición de objetivos y alcance: En esta etapa, se establecen los objetivos y alcance del estudio de ACV. Se decide qué aspectos ambientales se evaluarán, cuál será el sistema de referencia (por ejemplo, comparación con otro producto o proceso similar) y qué etapas del ciclo de vida se incluirán en el análisis.
2. Análisis de inventario: En esta etapa, se recopila información sobre todas las entradas y salidas de materiales, energía y emisiones asociadas con el producto o proceso en estudio. Esto incluye la cuantificación de las materias primas utilizadas, la energía consumida, las emisiones de gases de efecto invernadero, la generación de residuos y otros impactos ambientales relevantes.
3. Evaluación del impacto: En esta etapa, los datos recopilados durante el análisis de inventario se utilizan para evaluar los impactos ambientales en diferentes categorías, como el cambio climático, la acidificación del suelo, la eutrofización, el agotamiento de recursos, entre otros. Estos impactos se pueden cuantificar y normalizar para facilitar su comparación.
4. Interpretación de resultados: En esta etapa, se interpretan los resultados del ACV y se identifican las áreas clave de impacto ambiental. También se pueden proponer recomendaciones para mejorar la sostenibilidad del producto o proceso evaluado.

El ACV es una herramienta poderosa para informar la toma de decisiones y promover la sostenibilidad en diferentes sectores, incluida la industria de la construcción. Al realizar un ACV de un edificio, por ejemplo, se puede evaluar el impacto ambiental de los materiales de construcción utilizados, la energía requerida durante la vida útil del edificio y la gestión de residuos al final de su vida útil. Esto permite identificar áreas de mejora y tomar decisiones más informadas para reducir la huella ambiental del edificio. La principal barrera en la implementación de este tipo de análisis es su elevado costo en tiempo y dinero, ya que se necesita grandes cantidades de información a recopilar.

2.4.5 Normativas Internacionales Aplicables para el Cálculo de Huella de Carbono

a) Norma ISO 14025:2006 - Principios y procedimientos para las Declaraciones Ambientales de Tipo III (DAP III)

La Declaración Ambiental de Producto (DAP), también conocida como EPD (Environmental Product Declaration) en inglés, es un documento que proporciona información objetiva y verificada sobre el impacto ambiental de un producto a lo largo de su ciclo de vida. Es una herramienta utilizada para comunicar de manera transparente y estandarizada el desempeño ambiental de un producto a lo largo de todas sus etapas, desde la extracción de materias primas hasta su eliminación o reciclaje (AENOR Chile).

La DAP se basa en un Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que evalúa los impactos ambientales asociados con el producto en diversas categorías, como emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de energía, consumo de recursos naturales, contaminación del aire, del agua y del suelo, entre otros.

Los elementos principales que se incluyen en una Declaración Ambiental de Producto son:

1. Descripción del producto: Información detallada sobre el producto, incluidas sus características técnicas, su composición y usos específicos.
2. Alcance del análisis: Definición clara de las etapas del ciclo de vida que se han tenido en cuenta en el análisis, desde la extracción de materias primas hasta la disposición final.
3. Datos de inventario: Recopilación de datos sobre las entradas y salidas de materiales, energía y emisiones asociadas con cada etapa del ciclo de vida del producto.
4. Evaluación de impacto: Cuantificación y evaluación de los impactos ambientales en diferentes categorías, normalmente utilizando indicadores de impacto ambiental.
5. Información adicional: Puede incluir información sobre el cumplimiento de regulaciones ambientales, la eficiencia energética, el contenido reciclado, entre otros aspectos relevantes.

La DAP tiene como objetivo proporcionar a los consumidores, diseñadores, arquitectos y otras partes interesadas información transparente y confiable sobre el desempeño

ambiental de los productos, lo que les permite tomar decisiones más informadas y favorecer la selección de productos más sostenibles.

La importancia de la norma ISO 14025 radica en su contribución a la transparencia, la confiabilidad y la comparabilidad de la información ambiental, lo que facilita la adopción de prácticas más sostenibles por parte de las organizaciones y consumidores.

b) Norma Europea 15804 “Sostenibilidad en la construcción de edificios - Evaluación de la sostenibilidad de los edificios - Requisitos y pautas de cálculo para la determinación del desempeño ambiental de los productos de construcción”

La norma europea 15804 proporciona Reglas de Categoría de Producto (RCP) para declaraciones ambientales de producto (DAP) para cualquier producto de construcción. Las DAP son documentos que comunican el desempeño ambiental de un producto durante todo su ciclo de vida, publicada por el Comité Europeo de Normalización (CEN).

Esta norma especifica qué información debe incluirse en una DAP para un producto de construcción, así como cómo debe recopilarse y presentarse esa información. La norma está diseñada para garantizar que las DAP sean comparables y confiables, lo que permite a los consumidores y las empresas tomar decisiones informadas sobre la selección de productos de construcción, que pueden llegar a reducir el impacto ambiental de los edificios.

La norma europea 15804 se publicó por primera vez en 2012 y se ha modificado dos veces desde entonces. La versión actual es la EN 15804:2012+A2:2020.

A continuación, se presentan algunos de los beneficios de usar la norma europea 15804:

- Mejora la transparencia: Las DAP brindan a los consumidores y las empresas información clara y concisa sobre el desempeño ambiental de un producto de construcción. Esto puede ayudarlos a tomar decisiones informadas sobre la selección de productos que reduzcan su impacto ambiental.
- Promueve la comparabilidad: La norma europea 15804 especifica cómo se debe recopilar y presentar la información en las DAP. Esto asegura que las DAP sean comparables, lo que facilita a los consumidores y las empresas comparar el desempeño ambiental de diferentes productos de construcción.

- Reduce el impacto ambiental: Al ayudar a los consumidores y las empresas a seleccionar productos de construcción con un mejor desempeño ambiental, la norma europea 15804 puede ayudar a reducir el impacto ambiental de la industria de la construcción.

Algunos de los indicadores ambientales considerados para la elaboración de las DAP son los siguientes:

- Potencial de Calentamiento Global (GWP)
- Potencial de Agotamiento (PAO)
- Potencial de Acidificación de la tierra y el agua (PA)
- Potencial de Eutrofización (EP)
- Potencial de formación de Oxidantes Fotoquímicos del ozono troposférico (POCP)
- Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos $ADP_{\text{elementos}}$
- Potencial de los combustibles fósiles $ADP_{\text{combustibles fósiles}}$

c) Norma Europea 15978 “Sostenibilidad de las obras de construcción – Evaluación del desempeño ambiental de los edificios - Método de Cálculo”

La norma europea EN 15978 establece los principios y requisitos para realizar el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de los edificios y sus componentes, publicada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), regulada principalmente por las EN 15643-1 a EN 15643-5 (Conjunto de marco de evaluación del rendimiento ambiental) y EN 15804. Se enfoca específicamente en evaluar el rendimiento ambiental de los edificios a lo largo de su ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su demolición o fin de vida útil.

Esta norma proporciona una metodología para evaluar el impacto ambiental de los edificios de manera transparente y coherente. Además, permite comparar diferentes opciones de diseño y materiales para tomar decisiones más sostenibles. Al aplicar la norma europea 15978, se pueden considerar aspectos como la energía utilizada durante la fase de construcción, el consumo de energía y recursos durante la vida útil del edificio, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos ambientales asociados.

Algunos de los aspectos clave que se abordan en la norma EN 15978 son:

1. Alcance del análisis de ciclo de vida: Se define claramente el alcance del estudio, incluidos los límites del sistema y las etapas del ciclo de vida que se deben considerar.
2. Inventario de datos: Se requiere la recopilación de datos relevantes sobre materiales, energía y otros flujos involucrados en el ciclo de vida del edificio.
3. Categorías de impacto: Se identifican las categorías de impacto ambiental relevantes para evaluar el rendimiento del edificio, como las emisiones de CO₂, el consumo de recursos naturales y la contaminación del aire y agua.
4. Evaluación del impacto ambiental: Se realiza la cuantificación de los impactos ambientales en las categorías establecidas y se normalizan para facilitar la comparación entre diferentes opciones.
5. Declaración ambiental de producto (DAP): La norma EN 15978 también permite que los resultados del ACV se utilicen para generar una Declaración Ambiental de Producto (DAP) para los materiales y componentes utilizados en el edificio.

El cumplimiento de la norma ayuda a los profesionales de la construcción a tomar decisiones más informadas y sostenibles durante el diseño, construcción y operación de los edificios. También es útil para cumplir con los requisitos de certificaciones de construcción sostenible, como los sistemas de certificación de edificios LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) o BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method).

Es importante destacar que esta norma es de aplicación voluntaria, pero su adopción contribuye a la creación de edificios más sostenibles y a la reducción del impacto ambiental de la industria de la construcción, puesto que es una herramienta valiosa para evaluar el desempeño ambiental de los edificios. Se puede utilizar para comparar diferentes opciones de diseño y especificaciones, para identificar áreas de mejora y para comunicar el desempeño ambiental de un edificio a las partes interesadas.

A continuación, en la Ilustración 6 se presenta el Diagrama de proceso para el Cálculo de la Evaluación del desempeño ambiental de los edificios:

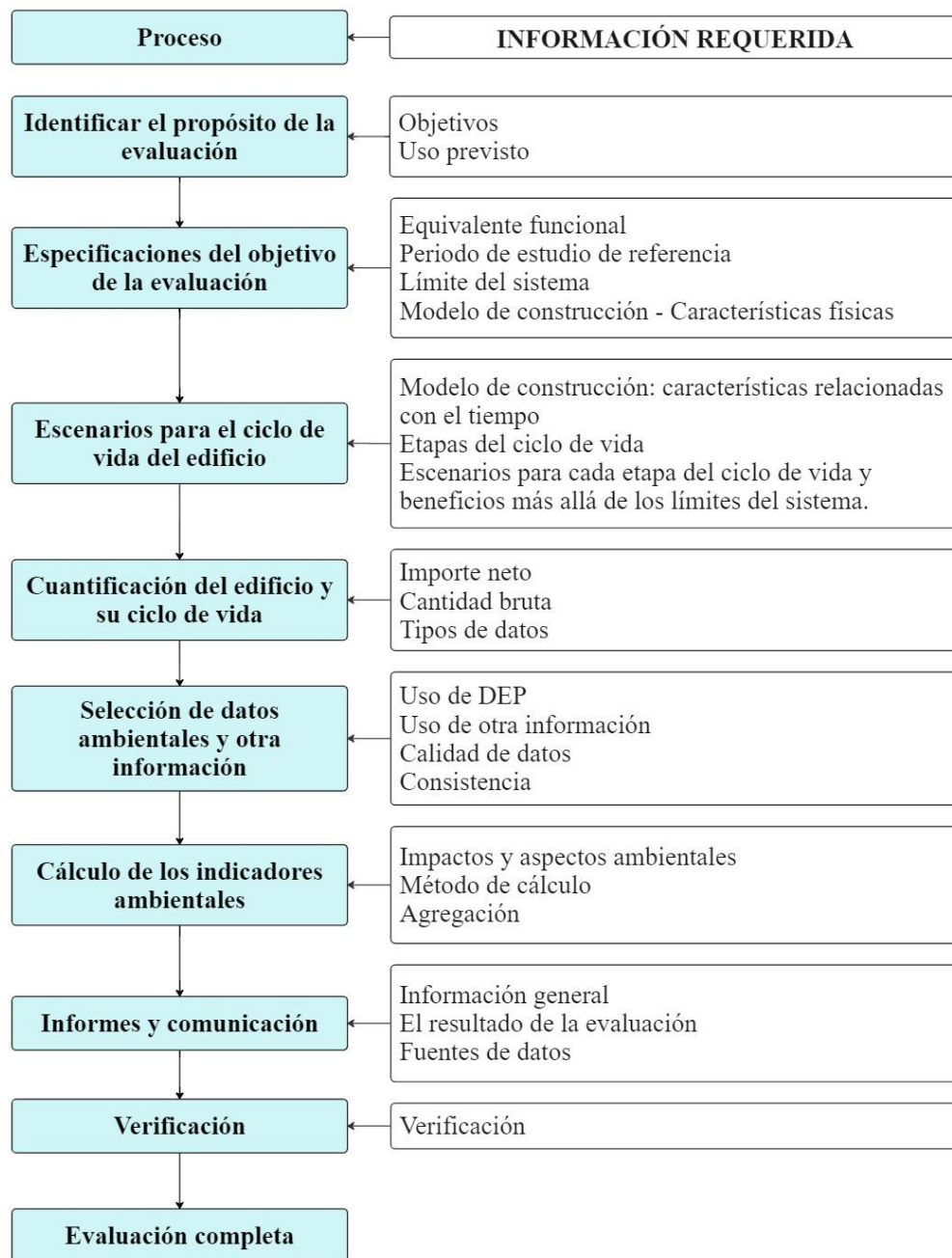


Ilustración 6: Diagrama del proceso para la evaluación del desempeño ambiental de los Edificios.

Fuente: (European Committee for Standardization, 2011)

La norma se divide en cinco etapas:

- Módulos A1-A3 Etapa de Productos: Se considera como la etapa “desde la cuna a la puerta” de los materiales y servicios utilizados para construcción. Generalmente esta información se adquiere principalmente desde las DAP o según lo que indique la EN 15804 para validar datos. Considera el suministro de materias primas, su transporte y el proceso de elaboración del producto.

Tabla 1: Resumen Módulo A1-A3

| Etapa de Productos | | |
|-------------------------------|------------|------------------------|
| A1 | A2 | A3 |
| Suministro de materias primas | Transporte | Proceso de Elaboración |

Fuente: Elaboración Propia

- Módulos A4-A5 Etapa de Proceso de Construcción: Abarca los procesos “desde la puerta de la fábrica de los distintos productos hasta la finalización práctica de la obra”, es decir, transporte desde y hacia el sitio de construcción y el proceso de instalación de la construcción. No incluye los impactos y aspectos de la fabricación de bienes capitales como camiones, grúas, entre otros.

Tabla 2: Resumen Módulo A4-A5.

| Etapa de Productos | |
|--|---|
| A4 - Transporte de materiales/productos hacia y desde el sitio | Materiales y productos. |
| | Equipos (grúas, andamios, etc.). |
| | Impactos y aspectos ambientales relacionados con las pérdidas por transporte. |
| | No considera el transporte de personas. |
| A5 - Proceso de instalación de la construcción | Obras de tierra y paisajismo. |
| | Almacenamiento de productos. |
| | Transporte de materiales, productos, desechos y equipos dentro del sitio. |
| | Obras temporales dentro y fuera del sitio que sean necesarias. |
| | Producción y transformación in situ de un producto. |
| | Provisión de calefacción, refrigeración, ventilación, etc. |
| | Instalación de los productos en el edificio. |
| | Uso de agua para refrigeración de maquinaria o limpieza in situ. |
| | Proceso de gestión de residuos generados en la obra. |
| Producción, transporte y gestión de residuos de productos y materiales perdidos. | |

Fuente: Elaboración propia

- Módulos B1-B7 Etapa de Uso: Cubre desde la finalización práctica de la obra de construcción hasta el momento en que el edificio es deconstruido/demolido. Considera entre sus 7 módulos:

Tabla 3: Resumen Módulo B1-B7

| Etapa de Uso | |
|------------------------------|---|
| B1 - Uso y Administración | Impactos y aspectos derivados del uso de los componentes del edificio en condiciones normales. |
| B2 - Mantenimiento | Producción y transporte de componentes y productos auxiliares |
| | Todos los procesos de limpieza interior y exterior del edificio |
| | Todos los procesos para mantener el rendimiento funcional y técnico del interior y exterior del edificio |
| B3 - Reparación | Producción, transporte, proceso de reparación, gestión de residuos y etapa de fin de vida útil, tanto de la parte reparada del componente y los productos auxiliares. |
| B4 - Reemplazo | Producción, transporte, proceso de sustitución, gestión de residuos y etapa de fin de vida útil, tanto del componente retirado y los productos auxiliares. |
| B5 - Rehabilitación | Producción, transporte, proceso de rehabilitación, gestión de residuos y etapa de fin de vida útil tanto de los nuevos componentes y los componentes reemplazados. |
| B6 – Energía operacional | Energía utilizada por los sistemas técnicos integrados en el edificio durante su operación. |
| | Se utiliza como referencia el Anexo 1 de la Directiva de Eficiencia Energética de los edificios |
| | Considera: Calefacción, suministro de agua caliente, aire acondicionado, ventilación, iluminación y energía auxiliar. |
| B7 – Uso de agua operacional | Toda el agua utilizada y su tratamiento durante la operación normal del edificio junto a los impactos y aspectos ambientales asociados. |
| | Incluirá: Agua potable, agua para saneamiento, agua caliente sanitaria, riego de áreas paisajísticas, agua para calefacción, refrigeración, ventilación y otros usos de agua para los sistemas integrados (fuentes, piscinas, saunas) |

Fuente: Elaboración propia

- Módulos C1-C4 Etapa de Fin de Ciclo: Se considera desde que el edificio se desmantela y no está destinado a ningún uso posterior. Entre sus 4 módulos se tiene:

Tabla 4: Resumen Módulos C1-C4

| Etapa Fin de Ciclo | |
|---|--|
| C1 – Deconstrucción/Demolición | Operaciones dentro y fuera del sitio que sean necesarias para los procesos de deconstrucción |
| C2 – Transporte de desechos | Todos los impactos debido al transporte hasta la eliminación o hasta que se alcance el estado final de desecho. |
| C3 – Procesamiento de desechos para reutilización, recuperación o reciclaje | Todos los impactos asociados con el tratamiento y procesamiento de los materiales o componentes destinados a ser recuperados, reutilizados o reciclados. |
| C4 – Eliminación / Disposición | Todas las cargas ambientales resultantes de la disposición final de materiales. |
| | Como regla general, se considera un periodo apropiado para procesos a largo plazo de 100 años. |

Fuente: Elaboración propia

- Módulo D Beneficios y Cargos fuera del límite del sistema: Cuantifica los beneficios ambientales o cargas resultantes de la reutilización, reciclaje y la recuperación de energía de los materiales y energía exportada que salen del límite del sistema. Se comunica por separado debido a la incertidumbre que conlleva.

2.4.6 Análisis de Casos Internacionales en Calculo de Huella de Carbono

La investigación internacional sobre el cálculo de la huella de carbono de los edificios residenciales revela conocimientos clave. Estudios realizados en China que analizaron la huella de carbono de los edificios a lo largo de su ciclo de vida, mostrando que HUI HOUSE, edificación que utiliza solo energía solar como fuente junto con materiales que ayudan en la eficiencia energética de la vivienda, logró la neutralidad de carbono en el noveno año y aportó 947.54 toneladas de carbono negativo a lo largo de su vida útil (Zeyu Yang, 2023). En Suecia, se comparó diferentes soluciones estructurales, destacando que la construcción basada en madera puede generar aproximadamente un 50% de ahorro en las emisiones de GEI en comparación con la construcción prefabricada de hormigón armado (Adel Younis, 2022), destacando así la importancia de la materialidad con la que se construye cada obra. Por otra parte, en Turquía, los estudios se centraron en las fuentes de emisión de diversas tipologías de edificios, enfatizando que el consumo de electricidad juega un papel importante en los cálculos de huella de carbono para hospitales y edificios complejos (Sena Ahmetoglu, 2022). Adicionalmente, un estudio sobre edificios urbanos enfatizó la importancia del mantenimiento operativo y las etapas de preparación de

materiales de construcción para reducir las emisiones de carbono, lo que representa 78.05% y 20.59% de las emisiones, respectivamente (Mei Shang, 2021).

Otro destacado análisis para este estudio, es la diferencia entre utilizar materiales generados desde cero o materiales reciclados, como en el caso de estudio estructuras prefabricadas con hormigón natural, hormigón reciclado y estructuras moldeadas in situ, resultando que las estructuras prefabricadas con hormigón ya presentan un ahorro de 25,9%, mientras que con hormigón natural se reducen en un 8% más comparadas con las que se moldean in situ con hormigón natural (E3S Conferences, 2022).

De todos los documentos analizados se puede desprender la importancia de las emisiones provenientes de la industria de la construcción, puesto a la gran capacidad de adaptación que posee, realizando cambios en las fuentes de energía, equipos de mayor eficiencia energética y materiales con menor aporte de GEI y que también son un aporte en la eficiencia energética de la vivienda por sus capacidades térmicas.

3 Marco Metodológico

En base a todo lo descrito anteriormente, en cuanto al importante aporte al medio ambiente por la medición de gases de efecto invernadero, su impacto y los fundamentos que entrega para sostener las ideas y proyectos para llevar un camino más sustentables, es que se busca calcular las emisiones de un proyecto inmobiliario en detalle para cada una de sus etapas, categoría y actividades realizadas, fundamentalmente en la etapa inicial de sus labores de construcción como lo son las obras previas y la obra gruesa.

La metodología utilizada en este estudio se llevó a cabo bajo el enfoque de producto de acuerdo con la norma EN 15978. Los principales objetivos consisten en desarrollar estándares de contabilidad y entrega de informes de emisión de CO₂ y promover su adopción a nivel nacional.

Mediante la herramienta utilizada es que se realizan las siguientes mediciones:

1. Identificar la cantidad de material: En esta primera etapa se debe medir la cantidad de cada material utilizado o extraído, como para el caso de remoción de tierras por nivelación de terreno. Se debe calcular o cubicar las materias primas totales empleadas en la obra según categorías, partidas y actividades.
2. Factores de emisión: Luego se identifican y asocian los valores de los factores de emisión de cada material utilizado. En este estudio, se formó una base de datos con declaraciones ambientales de productos, factores de emisión de energía eléctrica, combustibles fósiles y algunas maquinarias más utilizadas en la industria de la construcción.
3. Cálculo de kilogramos de CO₂ equivalente: Una vez identificado ambos valores anteriores, se procede al cálculo de emisiones de CO₂, multiplicando la cantidad de material (CM) utilizado por el valor de factor de emisión (FE) con su debida conversión (FC) si fuese necesario.

$$CO_{2,eq}[kg] = CM \cdot FE \left[\frac{kg \ CO_{2,eq}}{Unidad \ funcional} \right] \cdot FC$$

4. Sumatoria total: Finalmente, se realiza la sumatoria total por actividad, partida y categoría de los kilogramos de CO₂ obtenidos, entregando una tabla resumen de los resultados finales por etapa calculada y un gráfico con los resultados finales de la obra.

3.1 Descripción de la Hoja de Cálculo

3.1.1 Bases de Datos

Primeramente, utilizando la herramienta Excel se crea una base de datos para el perfecto funcionamiento de la hoja de cálculo de huella de carbono a desempeñar, se genera con los documentos y valores disponibles de:

- Declaraciones Ambientales de Productos (DAP o EPD, por sus siglas en inglés): existentes en Chile, junto con DAP de otros países como Suecia, Colombia, Francia, Reino Unido, entre otros, para los materiales que no se encontrasen disponibles, obtenidos desde las siguientes Administradores de Programas para la elaboración de DAP:
 - International EPD System.
 - EPD-Norge: The Norwegian EPD Foundation
 - Australasia EPD
 - AENOR Global EPD
 - EPD Danmark
- Factores de emisión de combustibles fósiles: obtenidos desde el DEFRA actualizados al año 2023 (Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales de Reino Unido, por sus siglas en inglés.)
- Factores de emisión de energía eléctrica: obtenidos desde la Base de Datos de Factores de Emisión del Programa Huella Chile, actualizados al año 2019 (última fecha disponible).

A continuación, se presentan algunos de los datos contenidos en la base de datos de factores de emisión:

- DAP para materiales de construcción: Los datos presentes en la Tabla 5 corresponden a valores de potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés), extraídos desde DAP de las distintas Administradores de Programas, a su vez se entrega la validez de la DAP las cuales tienen una duración aproximadamente de 5 años y deben ir actualizando los datos de los distintos indicadores que presentan para su producto una vez vencida la DAP. Un ejemplo parcial de la Base de datos de Materiales se encuentra en el Anexo 1.

Tabla 5: Base de datos de Factores de emisión de Materiales

| Grupo Materiales | Material | GWP [kg CO2eq] | Unidad declarada | País | Vencimiento DAP | Días faltantes | Válido |
|------------------|--|----------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|--------|
| Hormigón | Hormigón G025 a 45MPa (10)-20-12-28-B Cementos Bio Bio S.A. | 294 | m3 | Chile | 15-10-2024 | 116 | SI |
| Cemento | Cemento Average Portland Cement | 812,3 | ton | Reino Unido | 13-04-2027 | 1026 | SI |
| Acero | Acero galvanizado en caliente con recubrimiento de zinc puro (ArcelorMittal) | 2560 | ton | Alemania | 24-01-2024 | -149 | NO |
| Ladrillo | Ladrillo de Arcilla (BRE Global) | 213 | ton | Reino Unido | 18-02-2024 | -124 | NO |
| Yeso | Yeso Construcción (Volcán) | 0,0858 | kg | Chile | 30-03-2027 | 1012 | SI |
| Mat_Aislación | AislanGlass Rollo Libre (50 mm) | 1,09 | m2 | Chile | 27-04-2027 | 1040 | SI |
| Poliestireno | Aislamiento de Poliestireno Expandido | 0 | | Estados Unidos | 08-10-2022 | -622 | NO |
| Membrana | Membrana Acústica Danosa Impactodan 5 | 4,72 | m2 | España | 01-04-2025 | 284 | SI |
| PVC | Lámina Impermeabilizante de PVC | 5,64 | m2 | España | 18-05-2020 | -1495 | NO |
| Polietileno | Tubos de Polietileno (Polyethylene Pipes) | 3,1 | kg | Australia | 03-08-2021 | -1053 | NO |
| Volcanita | Volcanita ST (8mm) | 2 | m2 | Chile | 01-12-2021 | -933 | NO |
| Madera | MDF (Medium Density Fibreboard) | -7,66 | m2 | Australia | 21-10-2020 | -1339 | NO |

Fuente: Elaboración propia

- Factores de emisión de combustibles: La información presentada corresponde a los valores de factor de emisión de combustibles gaseosos, líquidos y sólidos desde la Base de Datos de DEFRA actualizados al año 2023.

Tabla 6: Factores de emisión de Combustibles

| Factores de emision por combustible | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|------------|---------------------|-----------------------|-----------|---------------|---------------|
| Tipo de combustible | Unidad | | | | | Fuente | |
| | kg CO2/litros | kg CO2/ton | kg CO2/kWh (Net CV) | kg CO2/kWh (Gross CV) | kg CO2/m3 | | |
| Combustibles gaseosos | Gas licuado de petróleo | 1,557 | 2.939 | 0,230 | 0,214 | 1.557 | DEFRA UK 2023 |
| | Gas natural | 0,002 | 2.563 | 0,203 | 0,183 | 2 | DEFRA UK 2023 |
| Combustibles Líquidos | Diésel (mezcla promedio de biocombustibles) | 2,512 | 3.016 | 0,254 | 0,239 | 2.512 | DEFRA UK 2023 |
| | Diésel (diésel 100% mineral) | 2,659 | 3.204 | 0,268 | 0,252 | 2.659 | DEFRA UK 2023 |
| | Fuelóleo | 3,175 | 3.229 | 0,285 | 0,268 | 3.175 | DEFRA UK 2023 |
| | Gasóleo | 2,755 | 3.227 | 0,273 | 0,256 | 2.755 | DEFRA UK 2023 |
| | Gasolina (mezcla promedio de biocombustibles) | 2,097 | 2.807 | 0,234 | 0,222 | 2.097 | DEFRA UK 2023 |
| | Gasolina (100% gasolina mineral) | 2,345 | 3.154 | 0,254 | 0,242 | 2.345 | DEFRA UK 2023 |
| | Kerosene | 2,540 | 3.165 | 0,260 | 0,247 | 2.540 | DEFRA UK 2023 |
| Nafta | 2,119 | 3.142 | 0,249 | 0,236 | 2.119 | DEFRA UK 2023 | |
| Combustibles sólidos | Carbon (generacion de electricidad)} | | 2.199 | 0,334 | 0,317 | | DEFRA UK 2023 |
| | Carbon (uso domestico) | | 2.905 | 0,365 | 0,347 | | DEFRA UK 2023 |
| | Petcoke | | 3.387 | 0,359 | 0,341 | | DEFRA UK 2023 |

Fuente: Elaboración propia

- Factores de emisión de energía eléctrica: Base construida a partir de la última publicación de factores de emisión para el Programa Huella Chile.

Tabla 7: Factores de Emisión Energía Eléctrica

| Año | Sistema Eléctrico | Factor de Emisión | Unidad | Fuente |
|------|-------------------|-------------------|------------|-------------------------------|
| 2021 | SEN | 0,3907 | kg CO2/kWh | (Programa Huella Chile, 2023) |
| 2022 | SEN | 0,3006 | kg CO2/kWh | (Programa Huella Chile, 2023) |
| 2023 | SEN | 0,2421 | kg CO2/kWh | (Programa Huella Chile, 2023) |

3.1.2 Hoja de Ingreso de Datos

En la Hoja de Cálculo de Huella se utilizará como referencia la EN 15978 para el análisis de ciclo de vida del edificio considerando los 5 módulos presentes en la norma. A continuación, se presenta los datos solicitados para el cálculo de emisiones de CO_{2eq} de los distintos módulos e información dispuesta por el usuario:

- Itemizado de materiales:
 1. Se debe insertar la información utilizada como presupuesto para las distintas etapas de la obra de construcción, esencialmente la categoría asignada a cada ítem, por ejemplo, material, mano de obra, material, partida, maquinaria, entre otros.
 2. Calcular el porcentaje de incidencia de los costos cada Actividad sobre los costos de Partida
 3. Calcular el porcentaje de incidencia de los costos las partidas sobre los costos de categoría
 4. Calcular el porcentaje de incidencia de los costos de cada categoría sobre el total de costos de la obra.

En el Anexo 2, se encuentra disponible el formato de solicitud de datos de itemizado.

Cada una de las etapas a continuación se debe asignar a cada ítem, material, equipo o producto, la Categoría, Partida y Actividad en la cual está siendo utilizado, para luego obtener un resumen detallado de resultados para cada una de las categorías, partidas y actividades, las hojas de solicitud de cada una de estas se encuentran disponibles en los Anexo desde N° 3 a N°10

- Etapa de Productos Módulos A1-A3:
 1. Se debe buscar en la lista desplegable el tipo de producto que se evaluara.
 2. Luego escoger entre los datos entregados por la base de datos el producto /material a evaluar o uno de similares características.
 3. La hoja indicara el origen de la DAP, unidad funcional declarada, factor de emisión y si el dato entregado es válido o la DAP/Factor de emisión se encuentra desactualizado, esto para tener en consideración la incertidumbre del calculo que se está realizando.
 4. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} por ese producto, prestando particular atención si la unidad del FE y el material sean la misma, sino se debe realizar la conversión de uno de estos valores.

- Etapa de Proceso de construcción Módulo A4:
 1. Al igual que en el módulo anterior, se solicitan las mismas asignaciones, pero en el caso de transportes.
 2. Escoger tipo de maquinaria/transporte utilizado para el traslado de materiales/productos desde y hacia la obra.
 3. La hoja entregara la capacidad del transporte utilizado, marca, modelo, tipo de combustible, rendimiento y factor de emisión (FE), calculando así la cantidad de viajes o traslados necesarios para ese producto/material
 4. Se debe indicar la distancia de traslado en kilómetros
 5. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} multiplicando la distancia, el FE y el factor de conversión si es necesario.

- Etapa de Proceso de Construcción Módulo A5:
 1. Al igual que en el módulo anterior, se solicitan las mismas asignaciones, junto con la maquinaria eléctrica o fuente que realice el suministro eléctrico u otro tipo de energía necesaria.
 2. Escoger tipo de maquinaria/transporte utilizado para el traslado de materiales/productos dentro de la obra o tipo de fuente utilizada para distribución de energía.
 3. La hoja entregara el tipo de combustible, rendimiento y factor de emisión (FE) para ambos casos.
 4. Se debe indicar la cantidad de horas de uso/día y días trabajados.

5. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} para cada caso (transporte o energía) multiplicando las horas de uso por los días trabajados, el FE y el factor de conversión si es necesario.

En las etapas que se indican a continuación, a diferencia de las anteriores, solo se debe indicar la Partida y Actividad para la etapa de uso.

- Etapa de Uso Módulo B1:

1. Luego de asignada la Partida y Actividad a realizar, se debe escoger entre material o producto en uso.
2. Escoger el tipo de material o producto utilizado en la lista desplegable con la información de la base de datos escogida o uno con características similares.
3. La hoja entregara la cantidad de años de vida útil junto con el FE
4. Se debe indicar la cantidad de material o productos.
5. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} por material o producto multiplicando el factor de emisión por la cantidad de material y el factor de conversión si fuese necesario.

En el caso de los Módulos B2 a B5 de la etapa de Uso, puesto que son casos particulares que ocurren con una frecuencia estimada, se pedirá la misma información para los 4 módulos como se presenta a continuación:

- Etapa de Uso Módulos B2 - B5:

1. Luego de asignada la Partida y Actividad a realizar, se debe escoger entre material o producto en uso.
2. Escoger el tipo de material o producto utilizado en la lista desplegable con la información de la base de datos escogida o uno con características similares.
3. La hoja entregara la cantidad de años de vida útil junto con el FE
4. Se debe indicar la cantidad de material o productos, junto con la frecuencia en la que se realiza esta actividad en los años de vida útil de la edificación (usualmente para construcciones habitacionales es de 60 años y construcciones estructurales es de 100 años).
5. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} multiplicando las emisiones de material o producto utilizado de sus módulos A1-A5 por la frecuencia de cambios o usos a realizar por el factor de conversión si fuese necesario.

- Etapa de Uso Módulo B6:

1. Se debe asignar la Categoría, Partida y Actividad a realizar.
2. Escoger el tipo de equipo utilizado en la lista desplegable con la información de la base de datos escogida o uno con características similares.
3. La hoja entregara el tipo de combustible o electricidad que utiliza, potencia en kWh, factor de emisión según combustible o electricidad
4. Se debe indicar la cantidad de equipos, junto con las horas de uso al día, cantidad de días que se utiliza.
5. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} multiplicando las horas de uso por los días trabajados, el FE y el factor de conversión si es necesario.

- Etapa de Fin de Ciclo Modulo C1:

1. Se asigna la Categoría, Partida y Actividad a realizar.
2. Se debe escoger entre maquinaria para transporte dentro de la obra o la fuente de suministro de energía en uso.
3. Escoger el tipo de maquinaria o fuente de energía utilizado en la lista desplegable con la información de la base de datos escogida o uno con características similares.
4. La hoja entregará:
 - Caso de transporte: tipo de combustible, consumo/rendimiento, factor de emisión
 - Caso fuente de energía: tipo de combustible/electricidad junto con el factor de emisión correspondiente.
5. Se debe indicar:
 - Caso de transporte horas de uso, porcentaje de uso de la capacidad de la maquinaria.
 - Caso fuente de energía: horas de uso por día, cantidad de días de uso totales.
6. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} por equipo o fuente, multiplicando el factor de emisión, las horas de uso, cantidad de días uso y factor de conversión si fuese necesario.

- Etapa de Fin de Ciclo Modulo C2
 1. Se asigna la Categoría, Partida y Actividad a realizar.
 2. Se debe escoger el tipo de transporte para el traslado de desechos.
 3. La hoja entregará la capacidad del transporte, tipo de combustible, consumo/rendimiento, factor de emisión.
 4. Se debe indicar el porcentaje de uso y distancia al lugar de desecho, para calcular la cantidad de viajes a realizar.
 5. Finalmente, se calculan las emisiones de CO_{2eq} para el transporte multiplicando FE, cantidad de viajes, porcentaje de uso, distancia y factor de conversión si fuese necesario.

Puesto que en Chile no se tiene información sobre el reciclaje de RCD, los módulos C3, C4 y D no se consideran para la hoja de cálculo.

3.2 Cálculo de emisiones Caso a analizar

3.2.1 Descripción del edificio a evaluar

El proyecto para evaluar corresponde a una edificación de 2 secciones de construcción y 1 de remodelación, en este estudio, se considera para el cálculo solo las obras de construcción del nuevo edificio, es decir, 100 unidades de departamentos y 2 estacionamientos subterráneos, ubicada en Hipódromo Chile, Independencia, Región Metropolitana. En los Anexo 11, Anexo 12 y Anexo 13 se encuentra disponible el plano de edificación, la ubicación de la obra y el modelo arquitectónico respectivamente.

La primera sección de construcción cuenta con 6 pisos elevados y 1 subterráneo, mientras que la segunda es de 11 pisos elevados y 2 subterráneos. Ambos se encuentran conectados entre sí. La construcción es de hormigón armado para sus cimientos y muros divisorios entre cada departamentos y espacios comunes, mientras que para las separaciones de dormitorios, baños y cocina son de madera contralaminada.

En el presente estudio se considera para el cálculo de huella de carbono solo la extracción de material previo y la construcción de su obra gruesa, es decir, las etapas de obras previas y obra gruesa, de estas se desprende una serie de partidas y posteriores actividades, detalladas a continuación según el presupuesto de la obra:

1. Obras Previas
 - 1.1. Trazado y Niveles
 - 1.2. Movimientos de tierra

2. Obra Gruesa
 - 2.1. Hormigón y Radieres
 - 2.2. Moldajes
 - 2.3. Enfierradura
 - 2.4. Cubiertas y hojalatería

En el Anexo 14 se encuentra la parcialidad del presupuesto, debido a la gran cantidad de datos entregados.

3.2.2 Estimaciones y discretización

Para simplificar los cálculos a realizar y debido a la falta de información entregada para realizar este análisis, se utilizan estimaciones de distancia para los transportes fuera de obra, frecuencia del uso de los equipos y maquinarias. Además, se utiliza el criterio de discretización de no considerar las partidas del presupuesto que representen menos del 5% sobre la partida destacado en la EN 15804. También, se descartan para estos cálculos, los valores de Potencial de Calentamiento Global que sean negativos, como lo es para los materiales elaborados a partir de madera.

3.2.2.1 Estimaciones de distancia de traslado de productos y residuos

A través de búsquedas en Google Maps de distintos comercios para los distintos materiales, es que se estima una distancia promedio de los posibles comercios de donde se obtuvieron los materiales y productos para la construcción del presente edificio. En el Anexo 15 se encuentra la imagen de ubicación geográfica en Google Maps de cada uno de estos comercios, mientras que en el Anexo 16 se encuentra la imagen para los lugares de disposición de residuos.

Tabla 8: Comercios de Hormigón y Cemento para estimación de distancia.

| Hormigón y Cemento | | |
|----------------------------|-------------------------|---------------|
| Comercio | Distancia a Obra | Unidad |
| Cementos Polpaico | 2.808 | m |
| Cementos BSA | 3.995 | m |
| Cementos Bio-Bio | 4.704 | m |
| Santa Laura Hormigones | 7.201 | m |
| Hormigones Premix | 7.505 | m |
| Hormigones TRANSEX | 9.106 | m |
| Melón Hormigones Quilicura | 10.335 | m |
| Promedio | 6.522 | m |
| | 6,52 | km |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 9: Comercios de Madera para estimación de distancia

| Madera | | |
|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| Comercio | Distancia a Obra | Unidad |
| Maderas Sur | 6.868 | m |
| Hugo Pohl Ltda | 1.532 | m |
| Barraca Huechuraba | 2.359 | m |
| Esteban Valenzuela Aserradero | 3.265 | m |
| ChileMat | 17.034 | m |
| Sodimac | 2.225 | m |
| Easy | 5.675 | m |
| Construmart | 6.773 | m |
| Promedio | 5.716 | m |
| | 5,72 | km |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 10: Comercios de Aceros para estimación de distancia.

| Aceros | | |
|-----------------------------|-------------------------|---------------|
| Comercio | Distancia a Obra | Unidad |
| Aceros Bravo Ltda | 1.371 | m |
| AZA | 1.760 | m |
| Carlos Herrera Máster Acero | 1.768 | m |
| Sodimac | 2.225 | m |
| Easy | 5.675 | m |
| Construmart | 6.773 | m |
| Promedio | 3.262 | m |
| | 3,26 | km |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 11: Comercios de Áridos para estimación de distancia.

| Áridos | | |
|-------------------------------|-------------------------|---------------|
| Comercio | Distancia a Obra | Unidad |
| Áridos arena gravilla | 2.989 | m |
| Vtas. Áridos Lorena Arriagada | 8.800 | m |
| Áridos López Abarca | 14.284 | m |
| Áridos Santa Gloria | 19.626 | m |
| Áridos Guayacán | 11.106 | m |
| Áridos Jaime Maldonado | 14.680 | m |
| Promedio | 11.914 | m |
| | 11,91 | km |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 12: Comercios de Otros Materiales para estimación de distancia.

| Otros Materiales | | |
|-------------------------|------------------|--------|
| Comercio | Distancia a Obra | Unidad |
| ChileMat | 17.034 | m |
| Sodimac | 2.225 | m |
| Easy | 5.675 | m |
| Construmart | 6.773 | m |
| Promedio | 7.927 | m |
| | 7,93 | km |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 13: Vertederos y Rellenos sanitarios para estimación de distancia

| Vertederos y Rellenos sanitarios | | |
|---|------------------|--------|
| Comercio | Distancia a Obra | Unidad |
| Estación de transferencia Quilicura | 5.156 | m |
| GIRI Ambipar Environment | 7.493 | m |
| Botadero Aguas Claras | 13.953 | m |
| Botadero Novicon | 13.618 | m |
| Botadero Las Condes | 13.355 | m |
| Relleno Sanitario Stgo. Poniente | 22.618 | m |
| Estación de Transferencia Relleno Santa Marta | 15.164 | m |
| Semot | 19.411 | m |
| Greenrec Lepanto | 25.541 | m |
| Relleno Sanitario Santa Marta | 34.772 | m |
| Promedio | 17.108 | m |
| | 17,11 | km |

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2.2 Estimaciones de frecuencia de uso de equipos y maquinaria

Los tiempos estimados para el uso de cada equipo y maquinaria se calcularon según consultas a los prevencionistas y trabajadores de obra, verificando también que se cumpliera con la normativa vigente del DS. 594 Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo, determinándose así los siguientes valores presentes en la Tabla 14.

Tabla 14: Tiempo estimado de uso de Equipos y Maquinarias

| Partida | Equipo | min/hora | horas/día | Total horas/día |
|-------------------------------|------------------------|----------|-----------|-----------------|
| Ejecución Pilas | Excavadora | 60 | 8 | 8 |
| | Bomba para Hormigonado | 15 | 8 | 2 |
| | Vibrador interno | 7 | 8 | 1 |
| Excavación Masiva | Excavadora | 60 | 8 | 8 |
| Excavación Fundaciones | Miniexcavadora | 60 | 8 | 8 |
| Hormigón y Radieres | Bomba para Hormigonado | 7 | 8 | 1 |
| | Taladro | 15 | 8 | 2 |
| | Hidrolavadora | 15 | 8 | 2 |
| | Rotomartillo | 15 | 8 | 2 |
| | Grúa | 60 | 8 | 8 |
| | Alisador de pavimento | 15 | 8 | 2 |

Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Factores de emisión utilizados

A continuación, se detallan los factores de emisión utilizados para el cálculo de emisiones de CO₂ eq presentes en la hoja de cálculo de huella de carbono.

3.2.3.1 Combustibles y energía eléctrica

Tabla 15: Factores de Emisión - Combustibles y Energía Eléctrica.

| Año | Tipo | FE | Unidad FE | Fuente |
|------|------------------------------|-------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2023 | Diésel (diésel 100% mineral) | 2,659 | kg CO ₂ eq /litros | (DEFRA UK, 2023) |
| 2023 | SEN | 0,242 | kg CO ₂ eq /kWh | (Programa Huella Chile, 2023) |

3.2.3.2 Factores de emisión de materiales utilizados en obra

En la Tabla 16, se encuentran algunos de los valores utilizados en la elaboración de la base de datos para factores de emisión para los materiales utilizados, separados por tipo de material o elemento a evaluar.

Tabla 16: Indicadores de Potencial de Calentamiento Global por Material

| Tipo de Material | Nombre Comercial Material | GWP kg CO₂eq / unidad declarada | Unidad declarada |
|-------------------------|---|---|-------------------------|
| Acero | Barras de Refuerzo de Acero AZA A440-280H (8-16mm) A630-402H (8-40mm) | 287 | ton |
| Acero | Perfiles de Acero Laminado (AZA) (L, estrella, redonda, plana, cuadrada, hexagonal) | 299 | ton |
| Acero | Perfil metálico de acero galvanizado C y Z 0,83-1,83mm (Metalco S.A.) | 37,07 | m |
| Acero | Perfil de acero galvanizado C, Z, U (Lundell Oy) 0,7-2mm 275 g/m ² | 2,07 | kg |
| Acero | Perfiles de acero galvanizado C-U-Z (Lindab) 0,52-3mm | 2,79 | kg |
| Baranda | Barandillas de escalera, balcones y pasarelas prefabricados en acero (Vikorsta AS) alto 1,2m ancho 2m | 3,26 | ml |
| Canaletas | Canaletas para lluvia de zinc-aluminio-magnesio largo 30m, esp 0,7mm, ancho 75-90mm (Plaslmo A/S) | 193 | unidad |
| Cemento | Cemento Average Portland Cement | 812,3 | ton |
| Grava | Triturada 3/8" Dens 2 713 kg/m ³ | 2,699 | ton |
| Hormigón | Hormigón G025 a 45MPa (10)-20-12-28-B Cementos Bio Bio S.A. | 294 | m ³ |
| Hormigón | Concrete B30 M60 (Mossia Ans) Dens 2,3ton/m ³ | 200 | m ³ |
| Madera | Madera seca aserrada de abeto o pino Dens 489 kg/m ³ | -744 | m ³ |
| Madera | Madera contrachapada 6,12,15,18,21,25,30mm SELEX-Plywood (CMPC) | -454 | m ³ |
| Madera | OSB (Oriented Strand Board) Norbord Europe Lt. 8-30mm Dens 600kg/m ³ Producida en UK | -861,39 | m ³ |
| Polietileno | Película impermeabilizante de polietileno para losa (150 micras) | 0,0397 | m ² |
| PVC | Tubería de PVC Pressure pipe Dens 1420 kg/m ³ (Iplex pipelines Australia ltd) | 3,33 | kg |
| Yeso | Yeso Construcción (Volcán) | 0,0858 | kg |

Fuente: Elaboración Propia

4 Resultados

4.1 Resultados Generales

A partir de los resultados obtenidos, se observa primeramente que de la Tabla 17 el total de emisiones de las etapas consideradas corresponde a 1.404.492 kg CO₂ eq para una superficie afectada de 1154 m², si estos valores se extrapolasen a las más de cien mil viviendas construidas anualmente (Cámara Chilena de la Construcción, 2022), el nivel de emisiones de CO₂ eq alcanzaría sobre las 1,4 Mton CO₂ eq si estas se construyesen solo de hormigón. Por otra parte, el módulo de mayor incidencia sobre los cálculos corresponde al A1-A3 que son las emisiones producidas por la adquisición de los materiales de construcción y su instalación alcanzando un 80% de incidencia sobre el total, mostrando así la importancia de la calidad de los materiales considerados, tanto su proceso productivo como el manejo de su aplicación y transporte de estos.

Tabla 17: Resultados Generales de Emisión de CO₂

| Resultados Totales | | | | | |
|---------------------------|--------------|--------------|--------------|------------------|---------------------------------------|
| Etapas | Módulos | | | | Unidad |
| | A1-A3 | A4 | A5 | Total | |
| Obras Preliminares | 151.357 | 23.990 | 107.754 | 283.102 | kg CO ₂ eq |
| Obra Gruesa | 1.107.911 | 10.483 | 2.837 | 1.121.391 | kg CO ₂ eq |
| Totales | 1.259.428 | 34.473 | 110.591 | 1.404.492 | kg CO ₂ eq |
| Total/Superficie Afectada | 1,091 | 0,030 | 0,096 | 1,217 | ton CO ₂ eq/m ² |

Fuente: Elaboración Propia

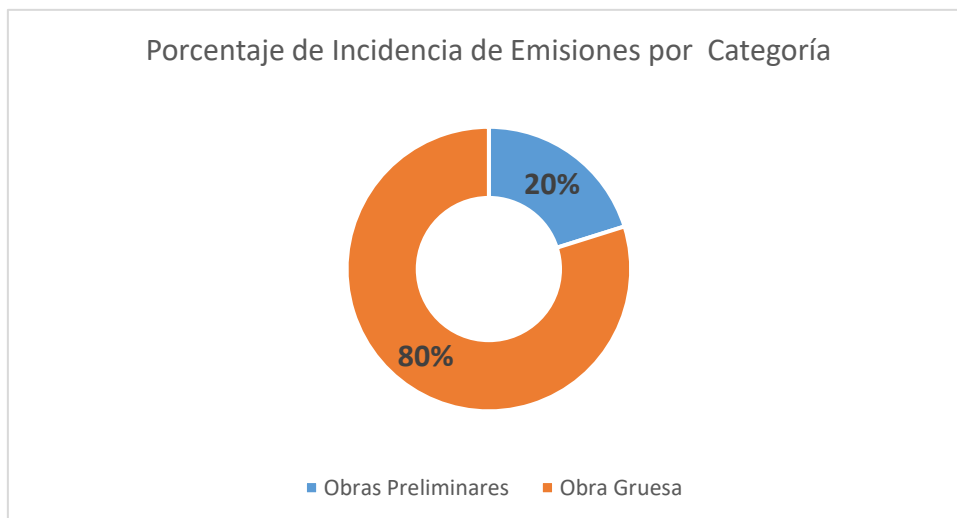


Ilustración 7: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría – Edificio

Fuente: Elaboración Propia

Si analizamos en particular cada partida realizada durante la obra de construcción, notamos a partir de la Tabla 1 Tabla 18, que las partidas de mayor incidencia corresponde a Hormigón y Radieres con un 71.4%, seguida de Movimientos de tierra con 20.2% y Enfierradura con un 5.8%, esto quiere decir que la materialidad con la que sea construida nuestro proyecto es el de mayor importancia dentro de las emisiones.

Tabla 18: Resumen de Resultados por Partida

| Resumen Resultados por Partida | | |
|---|-----------------------------------|-------------|
| Partidas | Emisiones [kg/CO ₂ eq] | %Incidencia |
| Trazado y niveles | 40,30 | 0,0% |
| Movimiento de tierra | 283.061,23 | 20,2% |
| Hormigón y radieres | 1.002.545,41 | 71,4% |
| Moldajes | 378,57 | 0,0% |
| Enfierradura | 81.429,46 | 5,8% |
| Estructura y Carpintería Metálica | 36.878,26 | 2,6% |
| Cubiertas y hojalatería | - | 0,0% |
| Total emisiones [kg/CO₂ eq] | 1.404.333,24 | |

Fuente: Elaboración Propia

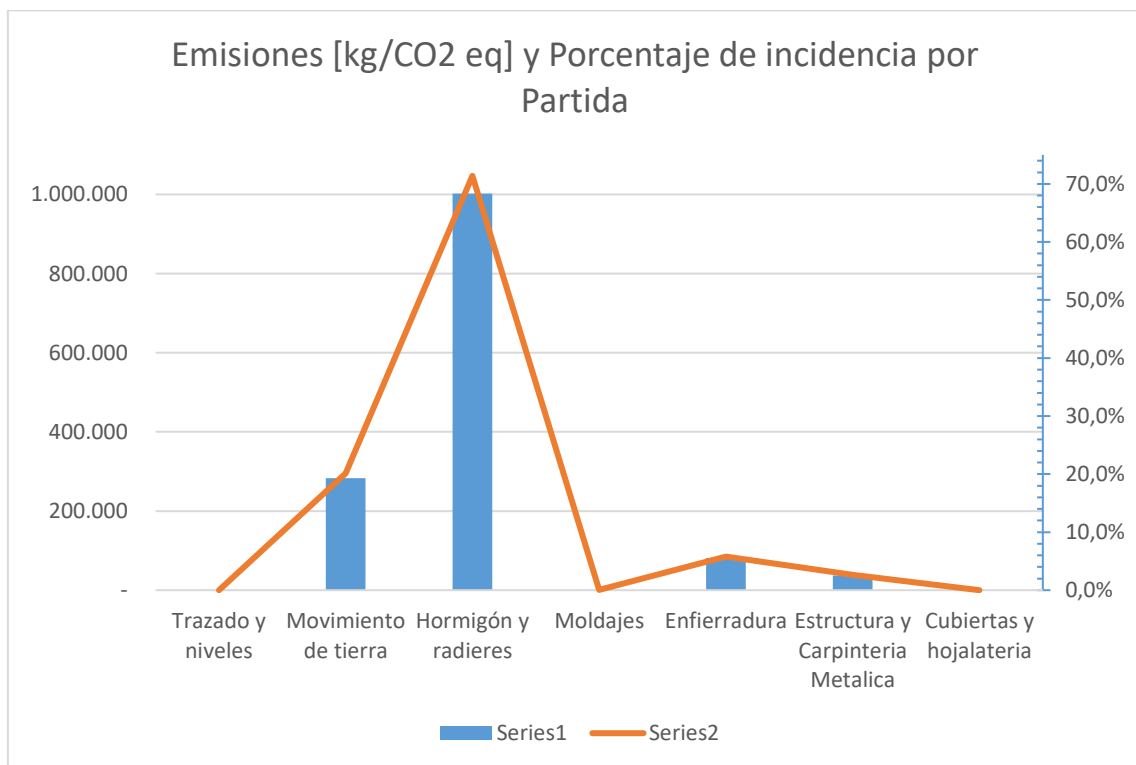


Ilustración 8: Emisiones y Porcentaje de Incidencia por Partida

Fuente: Elaboración Propia

4.2 Módulo A1 – A3

Para los cálculos particulares del Módulo A1-A3, la categoría de mayor incidencia corresponde a la Obra Gruesa con un 88%, donde las emisiones de mayor valor son las de hormigón y radieres, notando así que el material imperante de contribución de emisiones es el hormigón alcanzando las 990 ton CO_{2eq}.

Tabla 19: Resultados de Emisiones por Categoría Modulo A1-A3

| Módulo A1-A3 | | |
|---------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Categoría | Partida | Emisiones kg CO _{2eq} |
| Obras Preliminares | Trazado y niveles | 25,74 |
| | Movimiento de tierra | 151.331,62 |
| | Total Categoría | 151.357,36 |
| Obras Gruesa | Hormigón y radieres | 990.206,02 |
| | Moldajes | - |
| | Enfierradura | 81.180,19 |
| | Estructura y Carpintería Metálica | 36.525,20 |
| | Cubiertas y hojalatería | - |
| | Total Categoría | 1.107.911,41 |
| Total Módulo A1-A3 | | 1.259.427,93 |

Fuente: Elaboración Propia

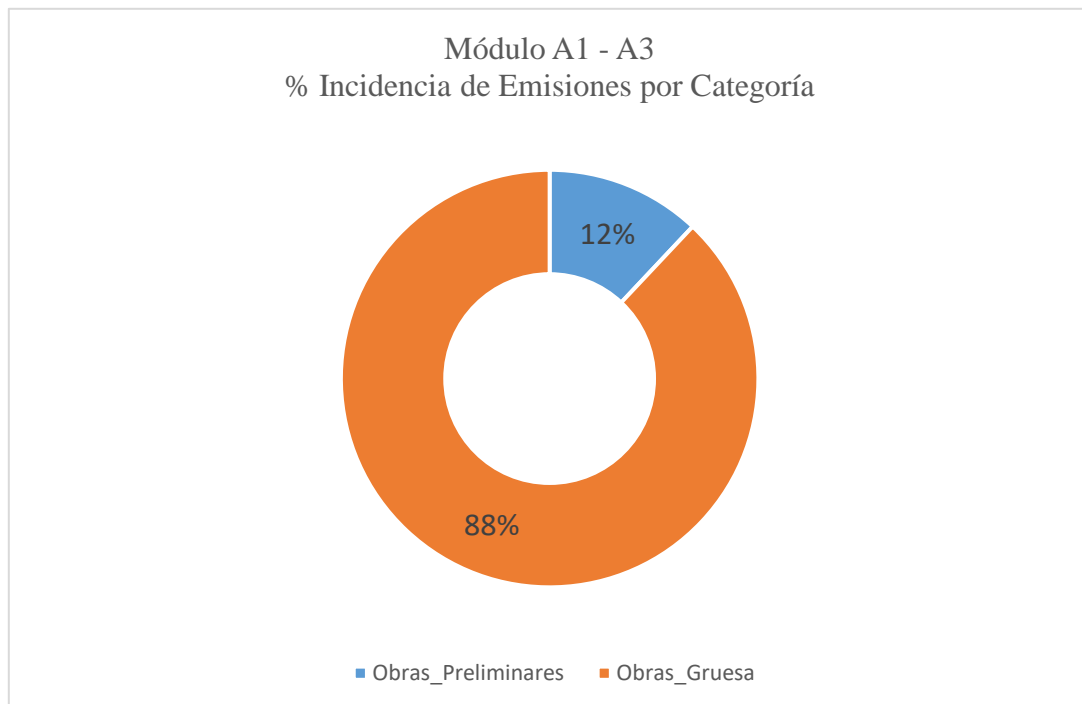


Ilustración 9: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría - Modulo A1-A3.
Fuente: Elaboración Propia

4.3 Módulo A4

En los cálculos realizados para el módulo A4, correspondiente al transporte de materiales y residuos de la construcción de la obra, se obtiene que la categoría de mayor incidencia corresponde a Obras Preliminares con un 70%, esto debido que existe una mayor cantidad de traslado de las tierras extraídas del lugar de construcción en comparación al traslado de materiales, que las emisiones generadas se calculan según el porcentaje de ocupación del medio de transporte.

Tabla 20: Resultados de Emisiones por Categoría Módulo A4

| Módulo A4 | | |
|------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| Categoría | Partida | Emisiones kg CO ₂ eq |
| Obras Preliminares | Trazado y niveles | 14,56 |
| | Movimiento de tierra | 23.975,61 |
| | Total Categoría | 23.990,17 |
| Obras Gruesa | Hormigón y radiers | 9.502,39 |
| | Moldajes | 378,57 |
| | Enfierradura | 249,27 |
| | Estructura y Carpintería Metálica | 353,06 |
| | Cubiertas y hojalatería | - |
| | Total Categoría | 10.483,30 |
| Total Módulo A4 | | 34.473,46 |

Fuente: Elaboración Propia

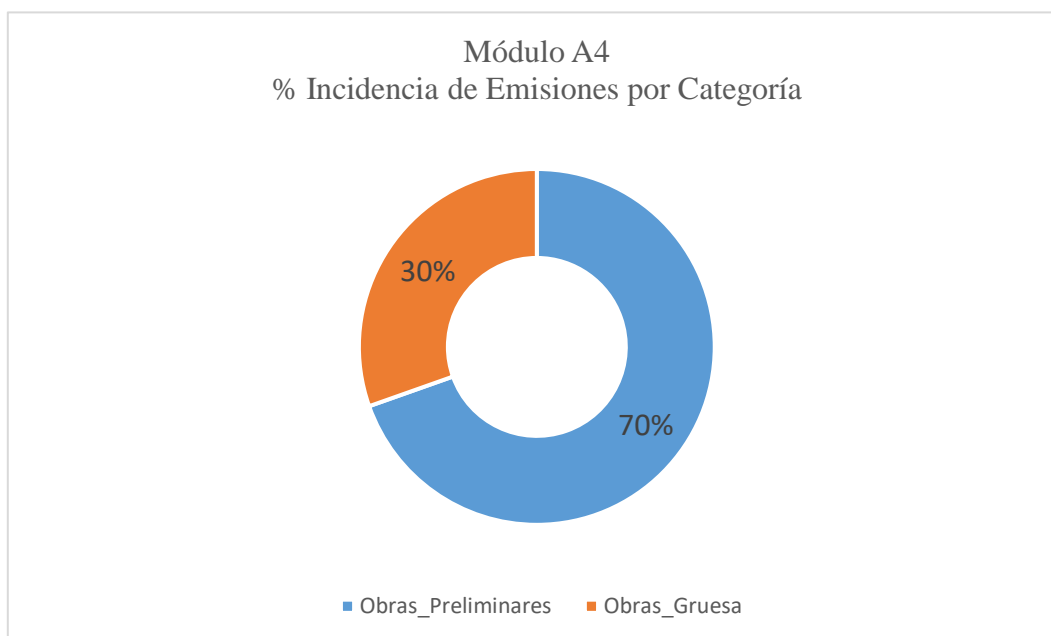


Ilustración 10: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría - Modulo A4

Fuente: Elaboración Propia

4.4 Módulo A5

De la etapa de instalación de la construcción, se observa que nuevamente las Obras Preliminares poseen mayor incidencia con un 97%, debido a que los equipos utilizados para estas actividades corresponden mayoritariamente a medios de transporte de combustibles fósiles comparado con los equipos utilizados en Obra Gruesa que son mayoritariamente eléctricos, por lo que las emisiones son menores.

Tabla 21: Resultados de Emisiones por Categoría Módulo A5

| Módulo A5 | | |
|------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| Categoría | Partida | Emisiones kg CO _{2eq} |
| Obras Preliminares | Trazado y niveles | - |
| | Movimiento de tierra | 107.754 |
| | Total Categoría | 107.754 |
| Obras Gruesa | Hormigón y radieres | 2.837 |
| | Moldajes | - |
| | Enfierradura | - |
| | Estructura y Carpintería Metálica | - |
| | Cubiertas y hojalatería | - |
| | Total Categoría | 2.837 |
| Total Módulo A5 | | 110.591 |

Fuente: Elaboración Propia

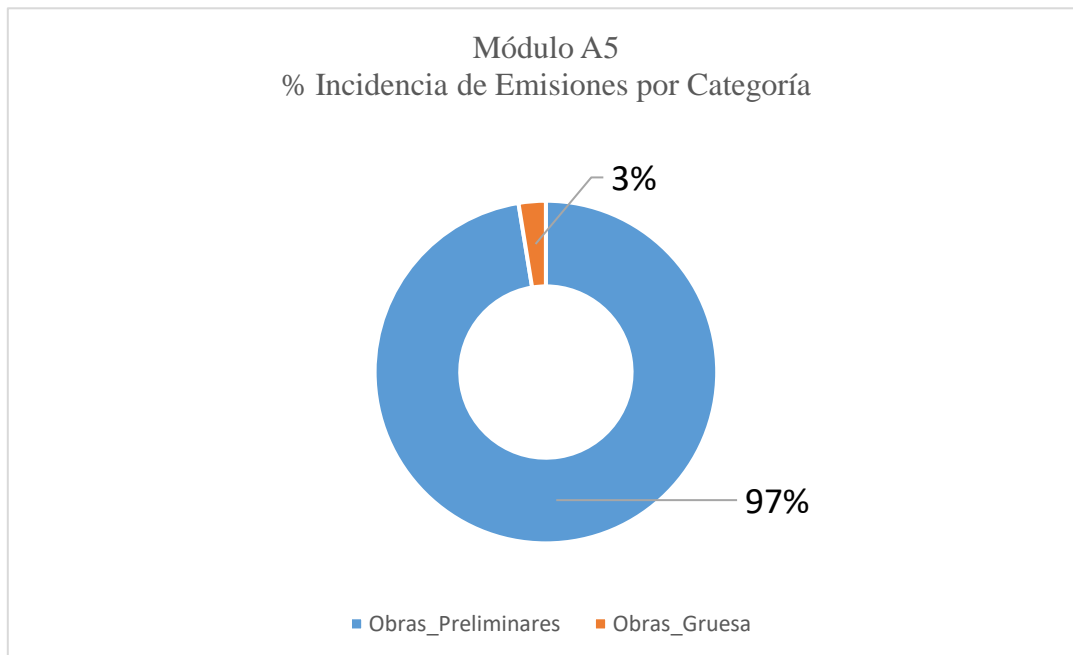


Ilustración 11: Porcentaje de Incidencia de Emisiones por Categoría - Modulo A5

Fuente: Elaboración Propia

5 Discusiones

A partir de los resultados obtenidos, notamos que dentro de la etapa de productos, módulos A1-A3, el material de mayor incidencia en los resultados es el hormigón con un 78,6%, seguido del movimiento de tierra 12,02% y enfierradura con un 6,4%, puesto que estos son los principales materiales de la obra, si estos fuesen reemplazados por materiales reciclados como acero reciclado, hormigón elaborado a partir de áridos reciclados, sus emisiones de GEI se reducirían hasta en un 30% (E3S Conferences, 2022)

Lo mismo sucede con las etapas de Transporte de productos e Instalación de la construcción, módulos A4 y A5 respectivamente, donde el Movimiento de tierra y hormigón son los de mayor incidencia, estos igualmente pueden ser reducidos mediante la utilización de equipos con otro tipo de combustibles o vehículos eléctricos.

Si proyectamos las emisiones GEI para las 260.000 viviendas proyectadas dentro del Plan de Emergencia Habitacional que busca ser realizado durante el gobierno, se puede estimar aproximadamente 2.800 [ton CO₂ eq] por 2600 edificios con 100 viviendas de materialidad y superficie similar a la estudiada.

Sabemos que la importancia detrás del Plan de Emergencia Habitacional es mejorar la calidad de vida de las personas de medianos y escasos recursos, y conlleva a un crecimiento económico del país al entregar mayores posibilidades económicas para adquirir una vivienda, sin embargo, se debe tener en cuenta este indicador ambiental para que seamos conscientes de los cambios que se provocan al realizar estos megaproyectos y buscar soluciones constructivas más amigables con el medioambiente.

Chile carece de indicadores ambientales en el sector de la construcción, es por esto, que el presente estudio posee un gran valor de incertidumbre dentro de los resultados, ya que estos son basados principalmente en Declaraciones Ambientales de Productos de otros países y son los valores de mayor relevancia dentro del estudio.

Finalmente, el modelo aplicado es útil tanto para viviendas, edificios de uso público o construcciones estructurales y entrega información de alta relevancia tanto para las distintas industrias involucradas en el sector de la construcción, como para el gobierno, las instituciones involucradas como bancos y los destinatarios finales como ciudadanos o empresas concesionarias.

6 Conclusiones

En este estudio se analizaron distintas metodologías de cálculo de huella de carbono para así aplicar una o algunas de estas para realizar un estudio de emisiones dentro del sector de la construcción, específicamente en una edificación habitable, por lo que finalmente se opta por basarnos en las normas europeas 15.978 y 15.804, donde la primera es un análisis de ciclo de vida para edificaciones en general y la segunda corresponde a las bases para elaborar una Declaración Ambiental de Productos, en ambas se analiza el ciclo completo de los productos, es decir, desde la “cuna” a la “tumba”.

Por otra parte, se analizaron distintas experiencias internacionales de cálculo de huella de carbono para edificaciones, donde se aprecia la relevancia de este indicador ambiental respecto a la versatilidad que posee para poder realizar cambios innovadores y que pueden seguir en estudio como aplicación de tecnologías renovables en la etapa de uso de un edificio, materiales reciclados aplicados en la etapa de productos o maquinarias con combustibles más amigables con el medio ambiente.

Teniendo en cuenta estas consideraciones es que se elaboró un modelo para el cálculo estimado de huella de carbono para edificaciones aplicado a dos etapas de un proyecto en construcción, donde para una superficie afectada de 1.154 [m²] se emiten 1,217 [ton CO₂ eq/m²] entre los módulos A1-A3, A4 y A5.

De estos 3 módulos, el primero, sobre los productos utilizados, los de mayor aporte de emisiones corresponden a hormigón con un 78,6%, seguido del movimiento de tierra 12,02% y enfierradura con un 6,4%, puesto que estos son los principales materiales de la obra, por lo que como se estudió en casos internacionales, estos pueden ser reemplazados por materiales de menor emisiones como madera o por materiales a partir de hormigón reciclado o acero reciclado, los que disminuyen las emisiones en hasta un 30% aproximadamente.

Luego, de los módulos A4 y A5, donde se destacan el aporte de emisiones de Movimiento de tierra y hormigón nuevamente, son los de mayor incidencia dentro de los resultados, que igualmente pueden verse reducidos en emisiones si se considera la utilización de equipos con otro tipo de combustible o con uso responsable de los equipos con tiempos determinados, entre otras prácticas.

Si este método de cálculo de huella de carbono se aplica a la proyección de viviendas del Programa de emergencia habitacional, obtenemos un total de emisiones de aproximadamente 2.800 [ton CO₂ eq/m²] para las 260.000 viviendas si se elaborasen 2.600 edificios con superficie y materialidad similar a la de este estudio. Lo que demuestra el

impacto del sector de la construcción que no es considerado a nivel nacional para los compromisos pactados por Chile a nivel internacional.

Finalmente, ya que los cálculos están basados en el indicador de Potencial de Calentamiento Global, nos da una mirada de la afectación global de este problema, sin embargo, el estudio realizado, pudiese plantearse de manera local, utilizando otros indicadores ambientales presentes en las DAP, como lo son el Potencial de acidificación de tierra y agua, Potencial de eutrofización, entre otros. Igualmente, ya que los resultados obtenidos son para la superficie de emplazamiento de las obras, se podría considerar otra área de afectación, como la totalidad de superficie elevada construida, es decir, la medición de emisiones de GEI por piso construido, considerando que la evaluación de construcción tendría en cuenta que a mayor cantidad de pisos o superficie construida mayor son las emisiones generadas. Todo esto con la finalidad que los estudios se realicen de manera particular a cada sección construida y no afectar en su totalidad en cambios estructurales la obra, como alguna de sus otras condiciones como eficiencia térmica, entre otras.

7 Referencias

- Adel Younis, A. D. (2022). *Comparative Carbon-Footprint Analysis of Residential Buildings with Different Structural Materials*. Obtenido de <https://lnu.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1668511&dswid=841>
- AENOR Chile. (s.f.). *AENOR*. Obtenido de <https://www.aenorchile.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2022). *Cámara Chilena de la Construcción*. Obtenido de <https://cchc.cl/comunicaciones/noticias/mas-de-157-mil-viviendas-se-necesitaran-al-ano-2035-para-cubrir-el-deficit-habitacional-y-demanda-generada-por-nuevos-hogares-en-la-region-del-maule>
- Cámara Chilena de la Construcción. (2024). *Macroeconomía y Construcción 65*. Cámara Chilena de la Construcción. Gerencia de Estudios y Políticas Públicas. Obtenido de <https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/mach-actualizacion-65.pdf>
- ClimatePartner. (s.f.). *Climate Partner*. Obtenido de <https://www.climatepartner.com/es/conocimientos/glosario/factores-de-emision>
- ClimateScience. (27 de Septiembre de 2023). *ClimateScience*. Obtenido de <https://climatescience.org/es/advanced-steel-climate>
- DEFRA UK. (2023). *GHG Conversion Factors*. Obtenido de <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023>
- E3S Conferences. (22 de Diciembre de 2022). Carbon emission of recycled concrete based integrated pre-fabricated structure: Case study from perspective of entire materialisation. *E3S Conferences*. doi:10.1051/e3sconf/202338501005
- Easterbrook, D. J. (2016). Greenhouse Gases. En D. J. Easterbrook, *Evidence-Based Climate Science* (2da ed., págs. 163-173). Elsevier.
- EPA. (1995). *Environmental Protection Agency*. Obtenido de <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>
- European Committee for Standardization. (2011). *EN 15978 Sustainability of Construction works-Assessment of environmental performance of buildings-*

Calculation Methods. Obtenido de <https://bsol-bsigroup-com.us1.proxy.openathens.net/Bibliographic/BibliographicInfoData/000000000030256638>

IPCC. (2014). *Cambio Climático 2014: Informe de Síntesis*. Ginebra, Suiza. Obtenido de <https://www.ipcc.ch/2018/10/08/summary-for-policymakers-of-ipcc-special-report-on-global-warming-of-1-5c-approved-by-governments/>

IPCC. (2018). *Annex I: Glossary in Global Warming of 1.5°C an IPCC Special Report*. Cambridge, UK and New York, USA: Matthews, J.B.R. Obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/10/SR15_Glossary_spanish.pdf

Iwata, H., & Okada, K. (2014). Greenhouse gas emissions and the role of the Kyoto Protocol. *Environmental Economics and Policy Studies*, 16, 325-342.

Leben Inmobiliaria. (2022). *Leben Inmobiliaria*. Obtenido de <https://indi.ileben.cl/>

Mei Shang, H. G. (2021). *A study on carbon emission calculation of residential buildings based on whole life cycle evaluation*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/351799832_A_study_on_carbon_emission_calculation_of_residential_buildings_based_on_whole_life_cycle_evaluation

Ministerio de Energía. (2020). *Balance Nacional de Energía*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/pelp/balance-nacional-de-energia>

Ministerio de Energía. (s.f.). *Ministerio de Energía*. Obtenido de <https://energia.gob.cl/edificacion#:~:text=El%202050%20se%20duplicar%C3%A1%20el,el%20combate%20a%201%20cambio%20clim%C3%A1tico>

Ministerio de Relaciones Exteriores. (12 de Diciembre de 2020). *Ministerio de Relaciones Exteriores*. Obtenido de <https://www.minrel.gob.cl/noticias-antteriores/a-cinco-anos-del-acuerdo-de-paris-chile-reafirma-su-compromiso-en-la>

Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Cambio Climático*. Obtenido de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/>

Ministerio del Medio Ambiente de Chile. (01 de Junio de 2016). *Biblioteca del Congreso Nacional de Chile*. Obtenido de

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894&idParte=9705129&idVersion=2016-06-01>

Ministerio del Medio Ambiente. (s.f.). *Ministerio del Medio Ambiente, Cambio Climático*. Obtenido de <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>

Naciones Unidas. (1992). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre El Cambio Climático*. Nueva York. Obtenido de <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>

PNUMA. (s.f.). *Indicadores Ambientales*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Obtenido de <http://www.pnuma.org/forodeministros/14-panama/pan11nfe-IndicadoresAmbientales.pdf>

Programa Huella Chile. (2023). *Factores de emisión Nivel Básico*. Obtenido de <https://huellachile.mma.gob.cl/material-de-apoyo/>

Sena Ahmetoglu, A. T. (2022). *Carbon Footprint Calculation of Different Building Typologies under Construction*. International Journal of Environment and Geoinformatics (IJECEO). Obtenido de <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1554337>

Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SNI). (2020). *SNI Chile*. Obtenido de <https://snichile.mma.gob.cl/>

Stacey, C. (06 de Enero de 2023). *CrowCon*. Obtenido de <https://www.crowcon.com/es/blog/why-is-gas-emitted-in-cement-production/>

United Nations Environment Programme. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. Nairobi.

World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Cement Sustainability Initiative (CSI): CO2 and Energy Accounting and Reporting Standard for the Cement Industry*. Conches-Geneva, Suiza. Obtenido de <https://docs.wbcsd.org/2011/05/CSI-CO2-Protocol.pdf>

World Meteorological Organization. (2021). *United in Science 2021*. Obtenido de <https://wmo.int/es/news/media-centre/el-cambio-climatico-y-sus-efectos-se-aceleran>

World Meteorological Organization. (2023). *United in Science 2023*. Obtenido de <https://wmo.int/news/media-centre/climate-change-undermines-nearly-all-sustainable-development-goals>

Zeyu Yang, e. a. (2023). *Carbon footprint analysis of Buildings Based on LCA Theory Under Carbon Neutrality Goals*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/367206334_Carbon_Footprint_Analysis_of_Buildings_Based_on_LCA_Theory_Under_Carbon_Neutrality_Goals_Taking_the_3rd_China_International_Solar_Decathlon_Competition_as_an_Example

Anexos

Anexo 1: Tabla de Base de Datos de Materiales Disponibles

| Grupo Materiales | Material | GWP kg CO2eq | Unidad declarada | País | Vencimiento DAP | Días faltantes | Válid o |
|------------------|---|--------------|------------------|----------------|-----------------|----------------|---------|
| Hormigón | Hormigón G025 a 45MPa (10)-20-12-28-B Cementos Bio Bio S.A. | 294 | m3 | Chile | 45580 | 113 | SI |
| Cemento | Cemento Average Portland Cement | 812,3 | ton | Reino Unido | 46490 | 1023 | SI |
| Acero | Barras de Refuerzo de Acero AZA A440-280H (8-16mm) A630-402H (8-40mm) | 287 | ton | Chile | 46705 | 1238 | SI |
| Acero | Perfiles de Acero Laminado (AZA) (L, estrella, redonda, plana, cuadrada, hexagonal) | 299 | ton | Chile | 46705 | 1238 | SI |
| Yeso | Yeso Construcción (Volcán) | 0,0858 | kg | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Mat_Aislación | AislanGlass Rollo Libre (50 mm) | 1,09 | m2 | Chile | 46504 | 1037 | SI |
| Mat_Aislación | Aislamiento térmico y acústico para cubiertas 30,38,50mm | 2,59 | m2 | Colombia | 46180 | 713 | SI |
| Membrana | Membrana Acústica Danosa Impactodan 5 | 4,72 | m2 | España | 45748 | 281 | SI |
| Membrana | Membrana Acústica Danosa MAD 4 | 1,92 | m2 | España | 45748 | 281 | SI |
| Membrana | Membrana Acústica Danosa MAD 2 | 1,92 | m2 | España | 45748 | 281 | SI |
| Volcanita | Volcanita ST (15mm) | 3,52 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Volcanita | Volcanita RH (15mm) | 4,01 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Volcanita | Volcanita RF (15mm) | 3,84 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Fibrocemento | Placas de Fibrocemento EQUITONE | 9,786 | m2 | Alemania | 45662 | 195 | SI |
| Piso | Losas de Gres Porcelánico (8mm) | 16,2 | m2 | Italia | 45861 | 394 | SI |
| Grifería | Grifería de Latón para el Baño (Brass Bathroom Mixers Faucets) | 0 | | Turquía | 45913 | 446 | SI |
| Aluminio | Perfil Anodizado con RPT | 8,64 | kg | España | 45774 | 307 | SI |
| Aluminio | Perfil de Aluminio (Aluminium Profiles) | 9,87 | kg | Turquía | 46268 | 801 | SI |
| Pintura | Pintura acrílica (Jotun Paints Europe) | 3,52 | kg | Reino Unido | 45936 | 469 | SI |
| Baranda | Baranda metálica | 8,9 | m | Estados Unidos | 46051 | 584 | SI |
| Mat_Aislación | Lana Mineral Colchoneta Papel 1 Cara R122 50mm (Volcán) | 4,95 | m2 | Chile | 46504 | 1037 | SI |

| | | | | | | | |
|---------------|---|-------|-----|----------|-------|------|----|
| Mat_Aislación | AislanGlass Rollo Papel 1 Cara (50mm) | 1,09 | m2 | Chile | 46504 | 1037 | SI |
| Mat_Aislación | Lana Mineral Colchoneta Papel 2 Caras R122 50mm (Volcán) | 5,07 | m2 | Chile | 46504 | 1037 | SI |
| Acero | Barra de refuerzo de acero (soldable y no soldable) CAP acero | 1430 | ton | Chile | 45776 | 309 | SI |
| Fibrocemento | Fibrocemento Textura Madera 6mm (Volcán) | 3,48 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Fibrocemento | Fibrocemento Siding 6mm (Volcán) | 3,39 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Fibrocemento | Fibrocemento Siding Color Plus 6mm (Volcán) | 3,95 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Fibrocemento | Fibrocemento Base Cerámica 6mm (Volcán) | 3,58 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| PVC | Perfiles de ventana de PVC | 3,572 | kg | Chile | 46021 | 554 | SI |
| Mat_Aislación | Lana Mineral Colchoneta Libre R122 50mm (Volcán) | 4,81 | m2 | Chile | 46504 | 1037 | SI |
| Fibrocemento | Fibrocemento Tabique 6mm (Volcán) | 3,48 | m2 | Chile | 46476 | 1009 | SI |
| Arena | Arena Dens 2 708 kg/m3 | 3,345 | ton | Colombia | 46651 | 1184 | SI |
| Grava | Triturada 3/8" Dens 2 713 kg/m3 | 2,699 | ton | Colombia | 46652 | 1185 | SI |
| Grava | Triturada 1" Dens 2 760 kg/m3 | 2,699 | ton | Colombia | 46653 | 1186 | SI |
| Mat_Aislación | Fibra de Vidrio PS Tecnología Q | 0,575 | m | Colombia | 46288 | 821 | SI |
| Mat_Aislación | Fibra de Vidrio CR Tecnología Q | 1,92 | m2 | Colombia | 46288 | 821 | SI |
| Mat_Aislación | Fibra de Vidrio Frescasa Eco Lámina | 1,99 | m2 | Colombia | 46180 | 713 | SI |
| Mat_Aislación | Fibra de Vidrio ATAC | 2,59 | m2 | Colombia | 46180 | 713 | SI |
| Mat_Aislación | Fibra de Vidrio Teatro Negro | 2,16 | m2 | Colombia | 46180 | 713 | SI |
| Mat_Aislación | Fibra de Vidrio Climaver Neto | 3,29 | m2 | Colombia | 46180 | 713 | SI |

Anexo 2: Tabla Ingreso de Datos de Itemizado/Presupuesto de Construcción

| Presupuesto o Itemizado | | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|--|---------------|---------------------------|----------------------|--------------------------|--------------|---------------------|------------------------------------|
| Código Presupuesto | Categoría | Ítems o partidas de las obras contratadas | Unidad | Cant/cant unitaria | Cantidad Real | Precios unitarios | Costo | % Incidencia | % Incidencia sobre el total |
| | | | | | | | | | |

Anexo 3: Tabla Ingreso de Datos de Módulo A1-A3

| Etapas Producto Modulo A1-A3 | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|----------------|------------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------------|---------------|-------------------------|--------------------------|------------------------|--|-----------|------------------|--|
| Categoría | Partida | Actividad | Material | DAP Material | Unidad DAP | Validación DAP | Origen | Vida útil (años) | Cantidad Material | Unidad material | Cantidad Material en Unidad Funcional | FE | Unidad FE | Emisión por producto [kgCO2 eq] |
| | | | | | | | | | | | | | | |

Anexo 4: Tabla Ingreso de Datos de Módulo A4

| Etapa Proceso de Construcción - Transporte a obra Modulo A4 | | | | | | | | | |
|--|----------------|------------------|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------|---------------|
| Emisiones por combustión | | | | | | | | | |
| Categoría | Partida | Actividad | Transporte/Maquinaria | Distancia (puerta a obra) [km] | Tipo de transporte | Capacidad Transporte | Unidad de Capacidad | Marca | Modelo |
| | | | | | | | | | |

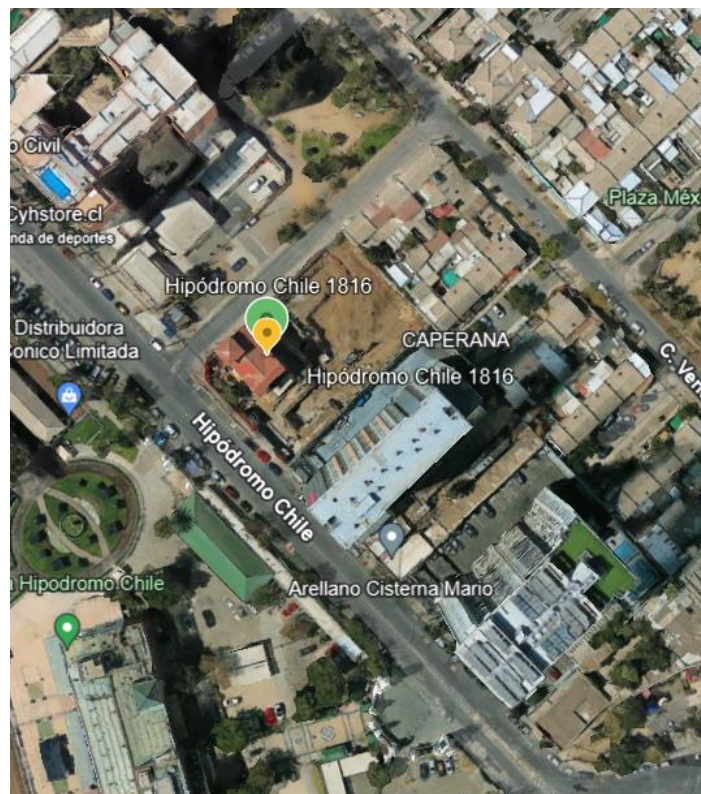
| Etapa Proceso de Construcción - Transporte a obra Modulo A4 | | | | |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|---|
| Emisiones por combustión | | | | |
| Combustible | Consumo/ Rendimiento | Unidad Consumo/Rendimiento | FE [kg CO2 eq/km] | Emisiones de Transp. de Producto/RCD [kg CO2 eq] |
| | | | | |

Anexo 11: Plano de Obra - Vista Superior

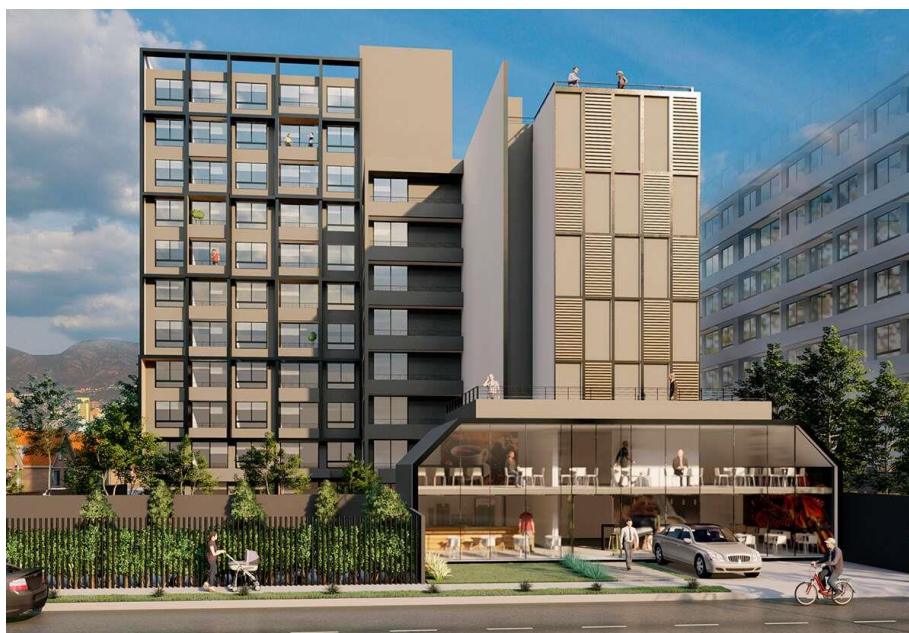


(Leben Inmobiliaria, 2022)

Anexo 12: Mapa de Ubicación Geográfica de Obra



Anexo 13: Plano de Arquitectura de Obra



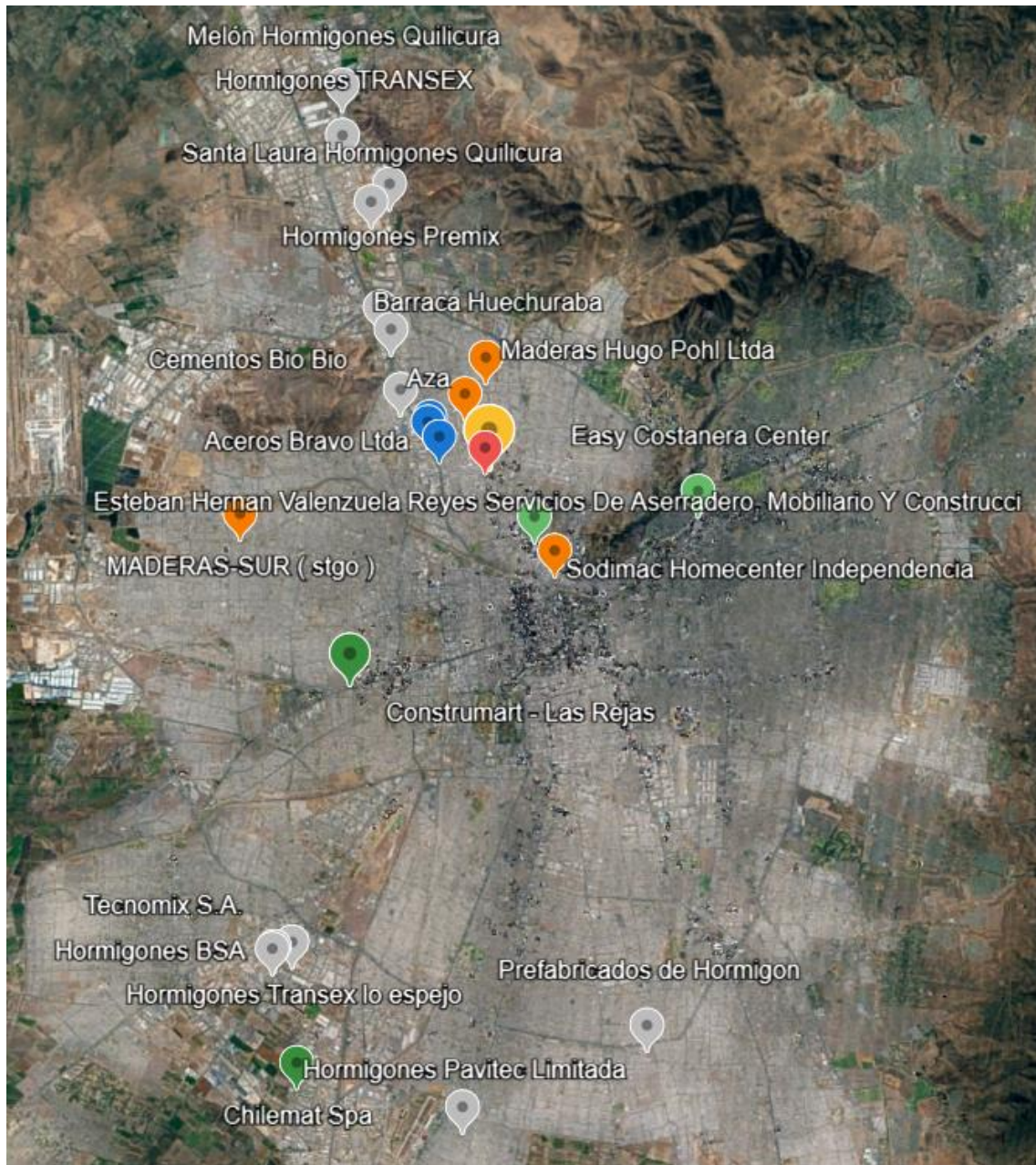
(Leben Inmobiliaria, 2022)

Anexo 14: Presupuesto parcial de Obra

| | | | | | | |
|--|------|----------|---------|------------|------------|---------|
| OBRAS PREVIAS | gl | 1,00 | 1,0 | 0,0000 | 0,0000 | |
| TRAZADO Y NIVELES | gl | 1 | 1,0 | 10,8508 | 10,8508 | 0,03% |
| Trazados y niveles | gl | 1,00 | 1,0 | 10,8508 | 10,8508 | 100,00% |
| Cuartón pino bruto 3x3" L=3,20mt | uni | 10,0000 | 10,0 | 0,0822 | 0,8220 | 7,58% |
| Pino bruto 1x4" L=3,20mt. | uni | 55,0000 | 55,0 | 0,0292 | 1,6060 | 14,80% |
| Pino bruto 2x3" L=3,20 mt. | uni | 55,0000 | 55,0 | 0,0757 | 4,1635 | 38,37% |
| Alamb.neg #14 37mt/kg r/50k | kg | 75,0000 | 75,0 | 0,0237 | 1,7775 | 16,38% |
| Yeso super volcán (s=25kg) | saco | 12,0000 | 12,0 | 0,1439 | 1,7268 | 15,91% |
| OBRA GRUESA | gl | 1 | 1,0 | 39608,6544 | 39608,6544 | |
| MOVIMIENTO DE TIERRA | gl | 1 | 1,0 | 8438,7858 | 8438,7858 | 21,31% |
| Excavación masiva con retiro a botadero | | | - | | | 14,00% |
| Excavación masiva con retiro a botadero | m3 | 7.904,03 | 7.904,0 | 0,1495 | 1.181,6525 | |
| Subcontrato Excavación a máquina masiva en terreno natural con retiro a botadero | m3 | 1,0000 | 7.904,0 | 0,1495 | 0,1495 | 100,00% |
| Excavación fundación a máquina | | | | | | 0,32% |
| Excavación fundación a máquina | m3 | 192,56 | 192,6 | 0,1404 | 27,0354 | |
| Subcontrato Excavación Fundaciones a máquina | m3 | 1,0000 | 192,6 | 0,1404 | 0,1404 | 100,00% |
| Excavación Fundación a Mano | | | | | | 3,46% |
| Excavación Fundación a Mano | m3 | 280,71 | 280,7 | 1,0399 | 291,9103 | |
| Subcontrato Excavación a mano | m3 | 1,0000 | 280,7 | 0,6239 | 0,6239 | 60,00% |
| Subcontrato Retiro material excavación | m3 | 1,2000 | 336,9 | 0,3467 | 0,4160 | 40,00% |
| Excavación Fundación a Mano perfilado | | | | | | 3,40% |
| Excavación Fundación a Mano perfilado | m3 | 425,37 | 425,4 | 0,6741 | 286,7419 | |
| Subcontrato Perfilado a mano | m3 | 1,0000 | 425,4 | 0,2581 | 0,2581 | 38,29% |
| Subcontrato Retiro material excavación | m3 | 1,2000 | 510,4 | 0,3467 | 0,4160 | 61,71% |
| Excavación a mano por ml | | | | | | 0,24% |
| Excavación a mano por ml | ml | 59,90 | 59,9 | 0,3383 | 20,2642 | |

| | | | | | | |
|--|-----|----------|----------|--------|----------|---------------|
| Subcontrato Excavación por ml | ml | 1,0000 | 59,9 | 0,3383 | 0,3383 | 100,00% |
| Relleno ripio bajo radier | | | | | | 1,26% |
| Relleno ripio bajo radier | m3 | 171,34 | 171,3 | 0,6204 | 106,2993 | |
| Polietileno negro reciclado | m2 | 12,0000 | 12,0 | 0,0145 | 0,1740 | 28,05% |
| Placa compactadora | día | 0,2500 | 42,8 | 0,3264 | 0,0816 | 13,15% |
| Relleno con estabilizado bajo radier | | | | | | 0,24% |
| Relleno con estabilizado bajo radier | m3 | 77,57 | 77,6 | 0,2657 | 20,6103 | |
| Placa compactadora | día | 0,2500 | 19,4 | 0,3264 | 0,0816 | 30,71% |
| Pilas entibación | | | | | | 49,99% |
| Fierro estriado A63 [pilas] | kg | 55,7449 | 33.001,0 | 0,0321 | 1,7894 | 25,11% |
| Hormigón GB25 (90) 20/10 Pilas | m3 | 0,7455 | 441,3 | 2,2193 | 1,6545 | 23,22% |
| Cuartón pino 3x3" | uni | 0,8000 | 473,6 | 0,1655 | 0,1324 | 1,86% |
| Pino Bruto 1x6" 3,20 MT | uni | 5,8108 | 3.440,0 | 0,0731 | 0,4248 | 5,96% |
| Pino Bruto 1x6" 3,20 MT [entibación] | uni | 2,6351 | 1.560,0 | 0,0731 | 0,1926 | 2,70% |
| Pilas Cálculo | | | | | | 2,07% |
| Fierro estriado A63 [pilas cálculo] | kg | 125,8248 | 3.051,3 | 0,0279 | 3,5105 | 48,77% |
| Hormigón HB 30 (90) 20/10 c/servicio de bombeo | m3 | 0,7800 | 18,9 | 1,9700 | 1,5366 | 21,35% |
| Cuartón pino 3x3" | uni | 0,8000 | 19,4 | 0,1655 | 0,1324 | 1,84% |
| Pino bruto 1x4" L=3,20mt. | uni | 2,6700 | 64,7 | 0,0292 | 0,0780 | 1,08% |
| Vibrador de alta frecuencia 36mm-50mm | d | 0,8000 | 19,4 | 0,0736 | 0,0589 | 0,82% |
| Mini excavador | hr | 0,4028 | 9,8 | 0,5516 | 0,2222 | 3,09% |
| Subcontrato Retiro material excavación | m3 | 0,7680 | 18,6 | 0,3467 | 0,2663 | 3,70% |

Anexo 15: Mapa de ubicación geográfica de Comercios Considerados



Anexo 16: Mapa de ubicación geográfica de Lugares de Disposición de Residuos

