



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

IMPACTO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL ACERO EN OBRAS PÚBLICAS:
APLICACIÓN A PROYECTO DE PUENTES DE LA DIRECCIÓN DE VIALIDAD DEL
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

JAVIERA RUBILAR FERIS

PROFESOR GUÍA:
JUAN CARLOS GUTIERREZ PINTO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MARLENA MURILLO SEGURA
MARCELO MÁRQUEZ MARAMBIO
WILLIAM WRAGG LARCO

SANTIAGO DE CHILE

2024

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: JAVIERA RUBILAR FERIS
FECHA: 2024
PROF. GUÍA: JUAN CARLOS GUTIERREZ

IMPACTO DE LA ECONOMÍA CIRCULAR DEL ACERO EN OBRAS PÚBLICAS: APLICACIÓN A PROYECTO PILOYO DE LA DIRECCIÓN DE VIALIDAD DEL MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

La construcción es un pilar fundamental para el crecimiento de un país y el desarrollo de sociedades sostenibles. Es considerada la industria más contaminante a nivel mundial, y para avanzar hacia un futuro más sostenible es indispensable generar conciencia e implementar medidas que mitiguen su nivel de influencia sobre el calentamiento global.

Este trabajo aborda la evaluación del impacto ambiental al aplicar principios de la economía circular desde la etapa de diseño, con enfoque específico en la circularidad del acero. El estudio se centra en un proyecto piloto de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, que comprende la construcción del Puente Rubens y Puente Marquesa.

Ambos puentes exigen la implementación de un 80% de acero reciclado para las barras de refuerzo en la estructura, según detallan sus especificaciones ambientales.

La medición de impacto se realiza en base a la reducción de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq), según los factores de emisión recabados de declaraciones ambientales de producto (DAP). El estudio se enfoca en la estructura de los puentes, analizando un 95% de los materiales involucrados, medidos en costos de presupuesto.

La metodología incluye la aplicación de la “Guía para la Estimación de Huella de Carbono en Proyectos MOP” en desarrollo por la Dirección General de Obras Públicas. Se evalúa la huella de carbono en las etapas A1-A3 y A4 del ciclo de vida, y se realiza un análisis comparativo de escenarios con y sin la aplicación de acero reciclado, contrastando el diseño sustentable y el diseño tradicional.

Los resultados indican que la implementación del 80% de acero reciclado para armaduras tiene un impacto significativo en las emisiones de CO₂eq. Tras el análisis de ambos proyectos se evidencia una disminución efectiva cercana al 20% de las emisiones totales vinculadas a la estructura del puente.

El estudio concluye que la implementación de estrategias de economía circular, para este caso sobre el acero, es una medida efectiva para mitigar el impacto ambiental de la industria de la construcción, específicamente en infraestructuras públicas de similar envergadura. Además, se sugieren futuras líneas de investigación para proyectos y la exploración de otras aplicaciones de circularidad.

Para mi abuela Silvia, por cumplir su parte del trato.

Con amor, Javi.

En cuanto al trabajo.

A mis profesores, Juan Carlos y Marlina, en cuyo curso encontré la línea a seguir, y la forma de fusionar dos enfoques que me interesan de la construcción: la sostenibilidad y el acero.

A los cuerpos docentes y todo el personal funcionario que me crucé en el paso por la universidad, por aportar a mi formación, y velar por una mejor educación superior.

Al ingeniero Marcelo Márquez y al MOP, que me facilitaron trabajar en este proyecto.

En lo que respecta a la vida.

A mi mamá, Marcela, por acompañarme siempre y por todo su amor.

A mi papá, Luis, por siempre creer en mí; aunque estemos lejos siempre te tendré cerca.

A mi abuela, Silvia, por cada vez que me ha hecho saber que se preocupa por mí, a su manera.

A mi amiga, Gabi, por motivarme a seguir este camino y apostar sus cartas en mí.

A mi hermano, Hernán, y mi primo, Guillermo, por recibirme en Santiago, incorporarme en su vida universitaria e introducirme a la mía, por mostrarme que no estaba sola en esto.

A mis mascotas, Asgard y Pietro, por tantos días y tantas noches estudiando a mi lado, sin fallar.

A mi instructor, por enseñarme equilibrio, disciplina y valores que aplican dentro y fuera del tatami, trabajaré el resto de mi vida en ser consistentemente mejor persona.

A mis amigos que conocí en la universidad, por hacer esta etapa tan amena y querida, porque en ellos encontré más que compañeros de estudio: Gonza, Cata, Panchita, Cami, Carlita, Dante, Mari Quilo, Nico, Vito, Lucas, Nikki.

Finalmente a mi Sevita, por tu apoyo, por escucharme, por tu paz, por tu compañía y por tu amor. A donde nos lleve la vida... Gracias.

***¿Que hemos de ser
si no es ser agradecidos?***

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	MOTIVACIÓN	1
1.2	SOBRE EL TRABAJO	1
1.3	OBJETIVOS	2
2	METODOLOGÍA	3
2.1	GUÍA ESTIMACIÓN HUELLA DE CARBONO PROYECTOS MOP.....	3
3	MARCO TEÓRICO	5
3.1	OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE AGENDA 2030	5
3.2	ECONOMÍA LINEAL Y CIRCULAR	6
3.3	HUELLA DE CARBONO.....	9
3.4	ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA.....	10
3.5	DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO.....	12
3.6	ECONOMÍA CIRCULAR EN CHILE	13
3.7	CONTRIBUCIONES DETERMINADAS A NIVEL NACIONAL.....	14
3.8	HOJA DE RUTA PARA UN CHILE CIRCULAR AL 2040	16
4	SUSTENTABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN	18
4.1	PLAN DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN DE LOS SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO 2017-2022	20
4.2	HOJA DE RUTA RCD ECONOMÍA CIRCULAR EN CONSTRUCCIÓN 2035	20
4.3	LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA.....	23
4.4	FABRICACIÓN DE ACERO RECICLADO EN CHILE.....	27
4.5	FABRICACIÓN DE ACERO A PARTIR DE MINERAL DE HIERRO Y CHATARRA EN CHILE	27
5	SITUACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN OBRAS PÚBLICAS EN CHILE ...	28
5.1	MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS	28
5.2	DIRECCIÓN DE VIALIDAD	28
5.3	DEPARTAMENTO DE PUENTES.....	29
5.4	PROYECTO PILOTO DE LA DIRECCIÓN DE VIALIDAD.....	30
5.5	GUÍA ESTIMACIÓN HUELLA DE CARBONO PROYECTOS MOP.....	31
6	ANTECEDENTES PARA ANÁLISIS DE PROYECTOS	36

6.1	CASO DE ESTUDIO 1: PUENTE MARQUESA.....	36
6.2	CASO DE ESTUDIO 2: PUENTE RUBENS	44
7	ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	52
7.1	PUENTE MARQUESA: RESULTADOS BRUTOS.....	53
7.2	PUENTE MARQUESA: RESULTADOS PROCESADOS	56
7.3	PUENTE RUBENS: RESULTADOS BRUTOS.....	61
7.4	PUENTE RUBENS: RESULTADOS PROCESADOS	64
7.5	RESULTADOS COMPARATIVOS DE PUENTES DEL PROYECTO.....	69
8	DISCUSIÓN.....	73
9	CONCLUSIONES	77
10	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	80
11	BIBLIOGRAFÍA.....	81
12	ANEXOS	88
	ANEXO A: ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS	88
	ANEXO B: PUENTE MARQUESA.....	96
	ANEXO C: PUENTE RUBENS.....	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, s.f.a).	5
Ilustración 2: Modelo de producción lineal (MMA et al, 2021).	6
Ilustración 3: Modelo de economía circular (MMA et al, 2021).	7
Ilustración 4: Esquema general de módulos para análisis de ciclo de vida de la construcción (Wiche, 2020).	11
Ilustración 5: Relación entre los principales estándares internacionales para la cuantificación de impactos ambientales de la construcción y edificación (Wiche, 2020).	12
Ilustración 6: Ejes estratégicos y transversales de la HDR RCD ECC 2035 (Construye2025 et al, 2020).	22
Ilustración 7: Esquema de acciones para implementación de economía circular en la construcción (Recylink, 2023).	23
Ilustración 8: Distribución geográfica de producción global de acero crudo (Worldsteel, 2024).	24
Ilustración 9: Distribución geográfica de producción Latinoamericana de acero crudo (Alacero, 2023).	24
Ilustración 10: Sectores consumidores de acero 2023 a nivel global (Worldsteel, 2024).	25
Ilustración 11: Sectores consumidores de acero 2023 en América Latina (Alacero, 2023).	25
Ilustración 12: Energía consumida por proceso en alto horno y horno eléctrico (Gervasio, 2014).	26
Ilustración 13: Extracto "4.2. Especificaciones Ambientales Generales", Antecedentes de Licitación (DV, 2023).	31
Ilustración 14: Etapas de ciclo de vida consideradas para el alcance de evaluación de huella de carbono en casos de estudio de proyectos MOP (EBP et al, 2023).	32
Ilustración 15: Diagrama metodología básica para levantamiento de emisiones en proyectos de infraestructura y edificación pública (Alarcón, 2024)	33
Ilustración 16: Categorías y subcategorías de infraestructura en proyectos MOP (MOP, 2023).	33

Ilustración 17: Metodología de levantamiento de información para cálculo de huella de carbono en su ciclo completo (Alarcón, 2024).	34
Ilustración 18: Elementos a considerar para la interpretación (Alarcón, 2024).	35
Ilustración 19: Plano de ubicación Puente Marquesa. Fuente: Bases de licitación del proyecto.	36
Ilustración 20: Esquema de análisis para la evaluación del proyecto Puente Marquesa. Fuente: Elaboración propia.	38
Ilustración 21: Módulos del ciclo de vida evaluados en cada subcategoría del Puente Marquesa. Fuente: Elaboración propia.	38
Ilustración 22: Factor de emisión de transporte para camiones (Equipo Huella Chile, 2024).	42
Ilustración 23: Plano de ubicación Puente Rubens. Fuente: Bases de licitación del proyecto.	44
Ilustración 24: Esquema de análisis para la evaluación del proyecto Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	46
Ilustración 25: Módulos del ciclo de vida evaluados en cada subcategoría del Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	46
Ilustración 26: Factor de emisión de transporte para camiones (Equipo Huella Chile, 2024).	50
Ilustración 27: Huella de carbono según alternativa de diseño en Puente Marquesa Fuente: Elaboración propia.	57
Ilustración 28: Participación materialidad en HDC según alternativa de diseño en Puente Marquesa Fuente: Elaboración propia.	58
Ilustración 29: Participación acero según origen en HDC para ambas alternativas de diseño en Puente Marquesa. Fuente Elaboración propia.....	59
Ilustración 30: Huella de carbono agregada según origen de acero para armaduras en Puente Marquesa. Fuente: Elaboración propia.	60
Ilustración 31: Huella de carbono según alternativa de diseño en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	65
Ilustración 32: Participación materialidad en HDC según alternativa de diseño en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	66
Ilustración 33: Participación acero según origen en HDC para ambas alternativas de diseño en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	67

Ilustración 34: Huella de carbono agregada según origen de acero para armaduras en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	68
Ilustración 35: Porcentaje de incidencia en HDC según factor de emisión para acero reciclado y convencional. Fuente: Elaboración propia.....	69
Ilustración 36: Huella de carbono porcentual según proyecto y alternativa de diseño. Fuente: Elaboración propia.	70
Ilustración 37: Huella de carbono porcentual agregada según módulos para cada caso. Fuente: Elaboración propia.	71
Ilustración 38: Huella de carbono normalizada por unidad de área de tablero para cada caso. Fuente: Elaboración propia.	72
Ilustración 39: Factor de emisión de transporte para barcos (Equipo Huella Chile, 2024).	88
Ilustración 40: Emisiones módulos A1-A3 y A4 según origen de acero de barras de refuerzo, por metodología de estudio de transporte de material. Fuente: Elaboración propia.....	91
Ilustración 41: Datos agregados de emisiones del Puente Quillagua (DGOP, 2023).	93
Ilustración 42: Emisiones totales de cada puente considerando etapas de producción y construcción. Fuente: Elaboración propia.....	94
Ilustración 43: Plano vista en planta Puente Marquesa. Fuente: Antecedentes de licitación.	96
Ilustración 44: Plano perfil longitudinal Puente Marquesa. Fuente: Antecedentes de licitación.	96
Ilustración 45: Plano sección transversal típica tablero Puente Marquesa. Fuente: Antecedentes de licitación.....	96
Ilustración 46: Detalle presupuesto estructura y costo total. Fuente: Antecedentes de licitación.	97
Ilustración 47: Plano vista en planta Puente Rubens. Fuente: Antecedentes de licitación.	98
Ilustración 48: Plano perfil longitudinal Puente Rubens. Fuente: Antecedentes de licitación.	98
Ilustración 49: Plano sección transversal típica tablero Puente Rubens. Fuente: Antecedentes de licitación.....	98
Ilustración 50: Detalle presupuesto estructura y costo total Puente Rubens. Fuente: Antecedentes de licitación.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Comparación compromisos NDC por parte de Chile. Fuente: Elaboración propia.....	15
Tabla 2: Datos generales proyecto Puente Marquesa. Fuente: Elaboración propia.	37
Tabla 3: Factores de emisión de materiales de construcción de origen en Chile según su DAP. Fuente: Elaboración propia a partir de datos EPD (2019, 2022, 2023).....	39
Tabla 4: Factores de emisión de materiales de construcción, estimados mediante calculadora EC3. Fuente: Elaboración propia a partir de datos EC.....	40
Tabla 5: Cubicaciones materiales a evaluar en estructura Puente Marquesa a partir de presupuesto. Fuente: Elaboración propia a partir de Presupuesto Estimativo Puente Marquesa.	41
Tabla 6: Datos contemplados para el cálculo de emisiones asociadas a transporte. Fuente: Elaboración propia.	42
Tabla 7: Estimación de viajes para suministro de materiales a obra Puente Marquesa. Fuente: Elaboración propia.	43
Tabla 8: Datos generales proyecto Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.....	45
Tabla 9: Factores de emisión de materiales de construcción de origen en Chile según su DAP. Fuente: Elaboración propia a partir de datos EDP (2019, 2022, 2023).....	47
Tabla 10: Factores de emisión de materiales de construcción, estimados mediante calculadora EC3. Fuente: Elaboración propia a partir de datos EC3.....	48
Tabla 11: Cubicaciones materiales a evaluar en estructura Puente Rubens a partir de presupuesto. Fuente: Elaboración propia a partir de Presupuesto Estimativo Puente Rubens.....	49
Tabla 12: Datos contemplados para el cálculo de emisiones asociadas a transporte en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	50
Tabla 13: Estimación de viajes para suministro de materiales a obra Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.	51
Tabla 14: Casos de estudio para análisis de huella de carbono. Fuente: Elaboración propia.....	52
Tabla 15: Cubicaciones acero de refuerzo según proveedor para cada caso. Fuente: Elaboración propia.	52
Tabla 16: Emisiones de CO ₂ eq módulos A1-A3 caso 1.a. Fuente: Elaboración propia.	53

Tabla 17: Emisiones de CO ₂ eq módulo A4 caso 1. Fuente: Elaboración propia.	54
Tabla 18: Emisiones de CO ₂ eq módulos A1-A3 caso 1.b. Fuente: Elaboración propia.	55
Tabla 19: Datos agregados de emisiones Puente Marquesa caso 1.a. Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 20: Datos agregados de emisiones Puente Marquesa caso 1.b. Fuente: Elaboración propia.....	56
Tabla 21: Emisiones de CO ₂ eq módulos A1-A3 caso 2.a. Fuente: Elaboración propia.	61
Tabla 22: Emisiones de CO ₂ eq módulo A4 caso 2. Fuente: Elaboración propia.	62
Tabla 23: Emisiones de CO ₂ eq módulos A1-A3 caso 2.b. Fuente: Elaboración propia. ...	63
Tabla 24: Datos agregados de emisiones Puente Rubens caso 2.a. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 25: Datos agregados de emisiones Puente Rubens caso 2.b. Fuente: Elaboración propia.....	64
Tabla 26: Datos para cálculo de emisiones por transporte alternativo. Fuente: Elaboración propia.	89
Tabla 27: Emisiones asociadas al módulo A4 para alternativa de transporte de material reciclado. Fuente: Elaboración propia.....	90
Tabla 28: Emisiones totales módulos A1-A3 y A4 para alternativa de transporte. Fuente: Elaboración propia.	91
Tabla 29: Emisiones estimadas para el módulo A5 en ambos puentes. Fuente: Elaboración propia.....	94

SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ACV:	Análisis de Ciclo de Vida.
CC:	Cambio Climático
CChC:	Cámara Chilena de la Construcción.
CES:	Certificación Edificio Sustentable.
CO₂:	Dióxido de Carbono.
CO₂eq:	Dióxido de Carbono Equivalente.
CORFO:	Corporación de Fomento de la Producción.
CSH:	Compañía Siderúrgica Huachipato.
CVS:	Certificación Vivienda Sustentable
DAP:	Declaraciones Ambientales de producto.
DGOP:	Dirección General de Obras Públicas.
DV:	Dirección de Vialidad.
EC:	Economía Circular.
ECC:	Economía Circular en la Construcción.
GEI:	Gases de Efecto Invernadero.
HDR:	Hoja de Ruta
IAT:	Informes Ambientales Territoriales.
IC:	Instituto de la Construcción.
INN:	Instituto Nacional de Normalización.
MC:	Manual de Carreteras.
MINVU:	Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
MMA:	Ministerio de Medio Ambiente.
MOP:	Ministerio de Obras Públicas.
NDC:	Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (siglas en inglés)
ODS:	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
ONG:	Organización No Gubernamental.
ONU:	Organización de las Naciones Unidas.
RCD:	Residuos de Construcción y Demolición.
RCP:	Reglas de Categoría de Producto.
SEMAT:	Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN

La construcción y mantenimiento de infraestructura son actividades esenciales para el desarrollo de un país y de sociedades modernas. Sin embargo, estas actividades conllevan impactos ambientales significativos, siendo la industria más crítica en cuanto a emisiones de gases de efecto invernadero.

La fabricación y empleo de materiales de construcción, como el acero y el hormigón, son responsables de gran parte de la emisión de estos contaminantes. Frente a la creciente inquietud por el cambio climático y la necesidad de adoptar prácticas sostenibles, surge la urgencia de encontrar soluciones que mitiguen el impacto ambiental de los proyectos de construcción.

El presente trabajo encuentra su motivación en el efecto positivo que la economía circular puede generar en el sector de la construcción, particularmente a través de la promoción del uso de acero reciclado, un material que se adapta fácilmente a un modelo de circularidad económica sostenible en el tiempo.

Es crucial que las obras públicas adopten este enfoque para establecer ejemplos de eficiencia y sostenibilidad en la construcción, dando el primer paso hacia la circularidad en la industria. De acuerdo con esto, se establece el objetivo de este trabajo, cuyo desarrollo se centra en la evaluación de un proyecto piloto que incorpora elementos de economía circular.

La importancia de este estudio reside en demostrar cómo la economía circular puede aplicarse eficientemente en el uso del acero en la construcción, cuantificando y evaluando su impacto en la reducción de emisiones de carbono.

Se espera que estos métodos puedan ser adoptados en un futuro cercano por más proyectos de obras públicas, no sólo mediante la implementación de acero reciclado, sino que también de otros materiales con baja huella de carbono, y de forma integral en los proyectos. También se tiene la expectativa de que el sector privado opte por adaptarse a estos métodos y prácticas sostenibles, fomentando así un futuro más ecológico para la construcción.

1.2 SOBRE EL TRABAJO

El trabajo evalúa los efectos que provoca la integración de los principios de la economía circular en la construcción de infraestructura pública, específicamente en el uso de acero reciclado.

El estudio se centra en un proyecto piloto actualmente en implementación por la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, que incluye la construcción de dos

puentes: Puente Marquesa en la Región de Coquimbo y Puente Rubens en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena.

Se enfoca el impacto en la reducción de la huella de carbono asociada a la producción de materiales a implementar. Para ello se comparan dos escenarios de diseño: un caso hipotético aplicando el sistema tradicional actual, y el caso de los proyectos basado en la aplicación de economía circular desde la etapa de diseño.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el impacto ambiental del uso de acero reciclado en un proyecto piloto de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas, enfocado a las etapas de producción y construcción de super e infraestructura, aplicando la metodología “Guía para la estimación de huella de carbono en proyectos MOP” desarrollada por la DGOP.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar datos precisos sobre las cantidades de material utilizados, factores de emisión de sus procesos de fabricación, transporte y construcción, y las fuentes de energía involucradas.
- Aplicar la guía de estimación HDC del MOP para determinar las emisiones de CO₂eq en ambos casos, siguiendo la metodología establecida en el documento.
- Identificar y clasificar los materiales y procesos de mayor aportación a la HDC involucrados en las etapas de producción y construcción (Módulos A1 al A5) de la superestructura e infraestructura de ambos puentes, con especial énfasis en las aplicaciones de acero.
- Identificar las etapas asociadas al ciclo de vida del proyecto con mayores contribuciones a la huella de carbono.
- Comparar emisiones de carbono entre el uso de acero reciclado y acero convencional, para un diseño de proyecto sustentable y un caso hipotético de diseño tradicional, identificando las diferencias en términos de impacto ambiental.

2 METODOLOGÍA

1. Realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre el estado actual de la sostenibilidad y economía circular en el sector público de la construcción en Chile, incluyendo la industria siderúrgica.
2. Recopilar información sobre ambos puentes del proyecto piloto, incluyendo especificaciones técnicas y requisitos de economía circular, a partir de los antecedentes de licitación de los proyectos.
3. Aplicar la “Guía para la estimación de huellas de carbono en proyectos MOP” a ambos proyectos de puentes con los datos recabados:
 - i. Definir alcance y objetivos del análisis.
 - ii. Clasificar y agrupar partidas.
 - iii. Recopilar información.
 - iv. Estimar emisiones por etapa.
 - v. Evaluar impacto.
 - vi. Analizar resultados.
4. Realizar misma aplicación y análisis para escenario hipotético donde se utilice solo acero convencional en ambos puentes, como alternativa de diseño tradicional.
5. Evaluar impactos de la aplicación de economía circular del proyecto.

2.1 GUÍA ESTIMACIÓN HUELLA DE CARBONO PROYECTOS MOP

A continuación, se describen en rasgos generales los pasos a considerar para el análisis de impacto en huella de carbono del uso de acero reciclado en ambos proyectos de puentes, según la guía desarrollada por Alarcón (2024):

Paso 1. Definición de alcance y objetivos.

- Definir etapas a considerar del ciclo de vida del producto.
- Definir límites físicos, tipos de datos a utilizar, normativa a cumplir y criterios de corte para aplicación de metodología.

Paso 2. Clasificación y agrupación de partidas.

- Definir esquema de categorías y subcategorías a evaluar.

Paso 3. Recopilación de información.

- Recuperar los antecedentes requeridos para cada módulo según las etapas a considerar de las bases de proyectos, y qué requisitos deben cumplir.
- Determinar la calidad de los datos a utilizar en los cálculos.

Paso 4. Estimación de emisiones por etapas.

- Identificar a que etapa del ciclo de vida corresponde cada componente.
- Estimar huella de carbono dentro de cada partida para materiales y procesos a partir de lo previamente establecido en las ecuaciones (1), (2) y (3) presentadas en la sección 5.5 del documento.

Paso 5. Evaluación de impacto.

- Realizar evaluación sumando impactos asociados, por contaminante, para obtener totales por componente, subcategoría y categoría, y finalmente obtener huella de carbono final sobre módulos evaluados.

Paso 6. Análisis de resultados.

- Realizar una evaluación preliminar donde se rectifique que los resultados corresponden a los supuestos realizados en el alcance y objetivos, de acuerdo con los elementos definidos en la Ilustración 18 en la sección 5.5 del documento.
- Identificar problemáticas en el estudio realizado.
- Evaluar completitud y consistencia del análisis.

Paso 7. Conclusiones y recomendaciones.

- Declarar conclusiones obtenidas del análisis del proceso y establecer recomendaciones para su mejoramiento.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE AGENDA 2030

En el año 2015, los líderes mundiales, por medio de la Organización de las Naciones Unidas, definieron y aprobaron un total de 17 objetivos de desarrollo sostenible (ODS), los cuales tienen como finalidad erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad para todos como parte de una nueva agenda de desarrollo sostenible (Naciones Unidas [ONU], s.f.a).

Cada uno de estos objetivos posee sus propias metas, y, como indica la agenda en su nombre, buscan cumplirse para el año 2030. Los 17 objetivos precisados por el encuentro son los que se observan en la siguiente imagen.



Ilustración 1: Objetivos de Desarrollo Sostenible (ONU, s.f.a).

Actualmente existe un documento denominado *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible* por parte de las Naciones Unidas, el cual reporta los avances en los distintos objetivos para el año 2023. Sin embargo, estando a mitad de camino en términos temporales, el progreso en la agenda no va acorde con lo estipulado. Según afirma el documento, “los avances para más del 50% de las metas de los ODS son endeble e insuficientes, y el 30% están estancados o han retrocedido” (Naciones Unidas [ONU], 2023, p.2).

El alcance de los objetivos planteados se vio últimamente afectado debido a la crisis climática, la débil economía mundial, diversos conflictos, y los efectos persistentes de la pandemia por COVID-19 (Naciones Unidas [ONU], s.f.b). Sin embargo, no es demasiado tarde para restablecer iniciativas para alcanzarlos. Quedando siete años para cumplir con la Agenda 2030, es indispensable un cambio fundamental con urgencia.

La relevancia de cumplir con los ODS según la agenda establecida queda reforzada por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC] (2018), que establece que el punto crítico de inflexión de aumento en 1,5°C. Se espera que este hito sea alcanzado entre el año 2030 y 2052, si el calentamiento global sigue aumentando al ritmo actual.

Uno de los elementos más relevantes para cumplir con los ODS, o encaminarse hacia estos, es el cambio del modelo de producción establecido hoy en día. Es aquí donde

entra el concepto de un modelo de producción de *Economía Circular (EC)*, el cual se alinea con varios propósitos perseguidos por los ODS, considerando también aportaciones mutuas, de forma firme y directa para algunos, y colaterales o tangenciales para otros (Santurde y Castro, 2021).

Según el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) et al. (2021) “de los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, al menos 10 serían impactados directa y positivamente por la transición a una economía circular”.

Además, de acuerdo con Santurde y Castro (2021), los ODS que tienen una relación más sólida con los principios de la EC son los siguientes:

8. Trabajo decente y crecimiento económico.
9. Industria, innovación y estructura.
10. Reducción de las desigualdades.
11. Ciudades y comunidades sostenibles.
12. Producción y consumo responsables.
13. Acción por el clima.
15. Vida de ecosistemas terrestres.

3.2 ECONOMÍA LINEAL Y CIRCULAR

Actualmente, a nivel global, la economía se ha basado en un modelo de producción lineal en el cual se obtienen recursos de distintas fuentes para generar productos. Estos mismos, una vez terminado su ciclo de uso, son desechados. Se le conoce a este modelo de producción como *cultura del descarte*, se ve representado en la Ilustración 2, y es un sistema perjudicial para el medioambiente, ya que, en la realidad, los recursos que tenemos son finitos (Ministerio de Medio Ambiente [MMA] et al., 2021).

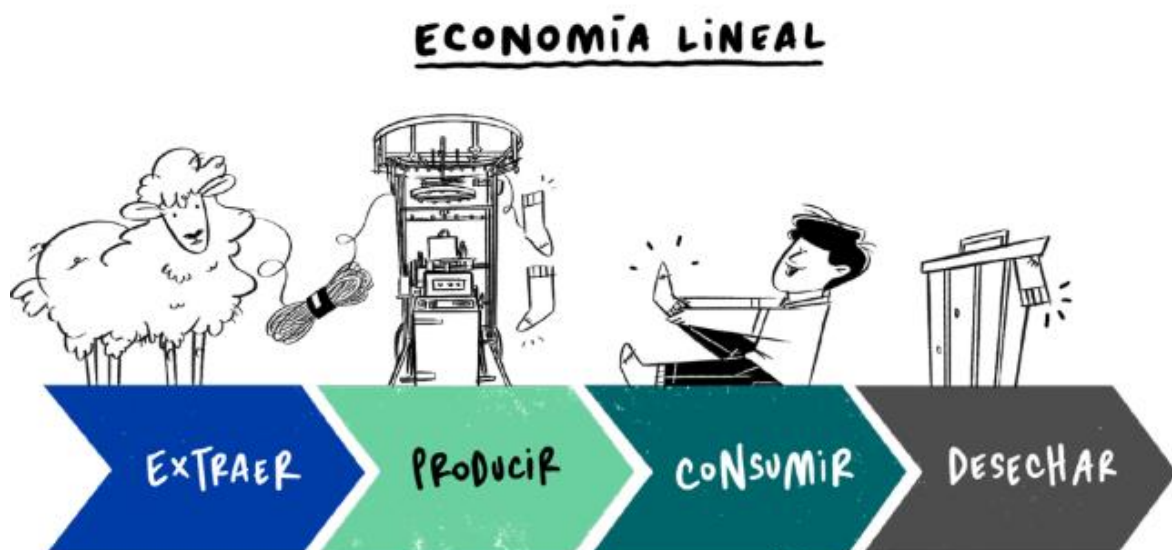


Ilustración 2: Modelo de producción lineal (MMA et al, 2021).

Existen varios conceptos de prácticas perjudiciales que incorpora un modelo de negocio lineal, y traen la incerteza de que eventualmente las organizaciones puedan dejar de funcionar. Ramukumar et al. (2018) definen el concepto como *Riesgo Lineal*, y establecen cuatro prácticas:

1. Uso de recursos escasos y no renovables.
2. Priorizar ventas de nuevos productos.
3. No colaborar.
4. No innovar ni adaptarse.

Como alternativa a este modelo se plantea un sistema denominado economía circular, que transformará los bienes que han cumplido con su vida útil en recursos para otros, cerrando ciclos en ecosistemas industriales y minimizando el desperdicio, como se muestra en la Ilustración 3.

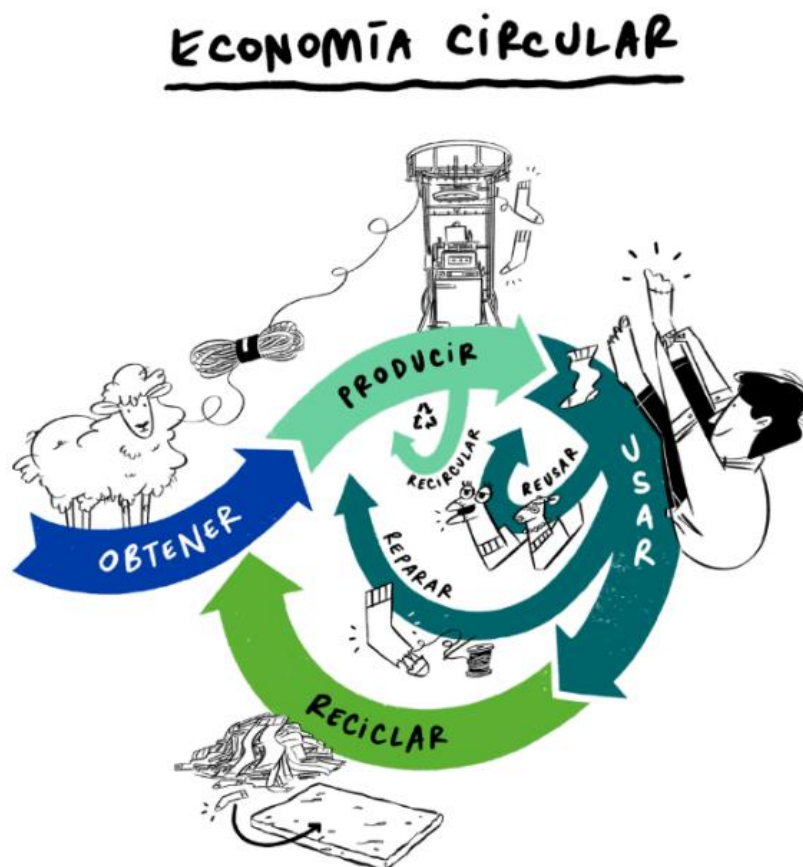


Ilustración 3: Modelo de economía circular (MMA et al, 2021).

El principal objetivo es sustituir la producción por la suficiencia, es decir, reutilizar lo que se encuentre en condiciones, reparar lo que esté roto, y remanufacturar lo que no se pueda reparar, así disminuyendo el uso de recursos finitos y gasto energético al generar un producto (Stahel, 2016).

La economía circular está ganando atención como una vía para un aumento de la prosperidad, minimizando externalidades negativas en la sociedad. La transición de una economía lineal a circular requiere de un enfoque sistemático, el cual implica ir más allá de las mejoras incrementales al modelo existente, así como el desarrollo de nuevos mecanismos de colaboración (World Economic Forum [WEF] et al, 2016).

De acuerdo con lo establecido por Ellen MacArthur Foundation (s.f.), la economía circular se basa en tres principios:

1. Eliminar los residuos y los contaminantes desde la etapa de diseño.

No es sostenible a largo plazo un modelo basado en obtención-uso-desecho de recursos finitos. Los desechos se consideran error de diseño y deben ser eliminados del mismo, deteniendo estos antes de incluso crearlos, comenzar a cerrar ciclos de materiales y no incurrir costos de gestión de residuos.

2. Circular productos y materiales en su máximo valor.

Mantener materiales en uso, ya sea como producto o, cuando ya no pueda usarse, como componente o materia prima. De esta forma se minimiza el desperdicio, y se conserva el valor intrínseco de productos y materiales.

3. Regenerar los sistemas naturales.

Más allá de la conservación, se debe buscar la regeneración de capital natural y biodiversidad, apoyando procesos naturales, y dejando espacio para que así la naturaleza prospere.

Para Prieto-Sandoval et al (2018) la EC no es una solución intransable para la sostenibilidad, sino una herramienta avanzada para el cambio de paradigma en la forma en que la sociedad se relaciona con la naturaleza, facilitando el desarrollo sostenible en niveles micro, meso y macro. También establece que alcanzar este modelo requiere innovaciones ambientales cíclicas y regenerativas en la forma en que la sociedad legisla, produce y consume.

Dentro del marco legislativo, el progreso de la EC precisa reformas a nivel institucional de cada nación, y es igualmente necesaria la capacidad de las empresas para adaptarse y ajustarse a estos cambios (Levänen, Lyytinen y Gatica, 2018). Esto implica que las organizaciones deben estar preparadas para implementar nuevas políticas y estructuras promovidas por la EC, asegurando una evolución a la par con el marco institucional y así aprovechar oportunidades emergentes.

Los mismos autores indican, según su estudio, que aquellos países que brindan fuerte apoyo institucional a las empresas, logran resultados con mayor valor positivo en el impulso de prácticas sostenibles (Levänen, Lyytinen y Gatica, 2018).

El compromiso de los dirigentes políticos es clave para el éxito de la agenda mundial de sostenibilidad y los ODS. Quienes reconozcan oportunidades y desafíos de la transición a un nuevo modelo serán fundamentales, ya que tienen el poder de legislar y promover políticas de circularidad (Schröder et al., 2020).

Además, Schröder et al. (2020) plantea que los gobiernos desempeñan un papel crítico en la financiación del desarrollo hacia una EC, debiendo aumentar sus carteras de financiamiento más allá de solo el manejo de residuos, apoyando también la innovación y adopción de nuevas tecnologías. Aun así, el financiamiento público no es suficiente, y se debe incentivar también el sector privado a movilizar recursos para alcanzar objetivos de sostenibilidad.

3.3 HUELLA DE CARBONO

La huella de carbono (HDC) mide el impacto que tiene una actividad o proceso sobre el cambio climático, directa o indirectamente, tanto por individuos, como organizaciones, productos, eventos o regiones geográficas. Es una herramienta útil para identificar y gestionar conductas o acciones que aumentan las emisiones de GEI y así promover un uso más eficiente de recursos (MMA, 2021).

Se mide como la suma de emisiones de gases de efecto invernadero generados en unidades de masa de CO₂ equivalente. Se utiliza dicha medida ya que el dióxido de carbono es el gas más abundante dentro de los GEI y el que tiene un impacto más penetrante, y se utiliza como referencia para el resto de los elementos contenidos (Greenpeace, 2020).

Dentro del sector de la construcción la huella de carbono asociada a un proyecto se subdivide en dos categorías, dependiendo de la etapa del ciclo de vida en que son emitidos los GEI, conocidos como carbono incorporado y carbono operacional.

El carbono incorporado corresponde a las emisiones asociadas a materiales y procesos de la construcción en todo su ciclo de vida. Se divide este en carbono incorporado de etapa inicial (manufactura, transporte, etc.), carbono incorporado de etapa de funcionamiento (mantención, reparaciones, etc.), y carbono incorporado de etapa final (demolición, tratamiento de desechos, etc.) (World Green Building Council [WorldGBC], 2019)

El carbono operacional corresponde a las emisiones asociadas al uso de energía necesaria para mantener en correcta operación una estructura durante su vida útil (WorldGBC, 2019).

De acuerdo con la asociación Greenpeace (2020) y el MMA (2021) no existe una única medición para la huella de carbono, debido a que hay distintos enfoques para evaluar esta. Se destacan seis enfoques principales enumerados a continuación.

1. Corporativo: Evalúa emisiones de una organización durante un periodo de tiempo definido, para mejor aprovechamiento de recursos. Se utiliza para generar reportes de desempeño ante cambio climático.
2. Ciclo de vida de un producto o servicio: Evalúa emisiones de mercancías o servicios en toda su cadena de valor, incluyendo a veces su consumo o vida útil, y término o desecho. La metodología de mayor reconocimiento internacional corresponde a *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 *British Standards Institute Group*.
3. Personal: Evalúa emisiones directas e indirectas de un individuo en un lapso específico de tiempo. Es un indicador de incidencia de las acciones personales sobre el cambio climático.
4. Eventos: Evalúa emisiones debido a la planificación y realización de un evento. Usualmente calculado para adoptar acciones compensadoras de emisiones, como la compra de bonos de carbono, y así obtener la certificación de *evento carbono neutral*.
5. Territorial: Evalúa emisiones de un área específica con límites establecidos geográficos o político-administrativos. Sirve para determinar el impacto global del cambio climático en un área e implementar planes de mitigación a escala efectiva.
6. Por industria: Evalúa emisiones de un sector productivo en particular. Representa una oportunidad para optimizar recursos y uso de materias primas, ofreciendo ventajas competitivas e impacto ambiental controlado.

Dentro del sector de la construcción el enfoque que se alinea con los objetivos de evaluación de proyectos corresponde al número 2, asociado a lo que se conoce como análisis de ciclo de vida, ya que se considera cada obra como un producto al cual es posible evaluar durante toda su cadena de producción.

3.4 ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta utilizada para evaluar el impacto ambiental de un producto, proceso o actividad. Este abarca todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materias primas hasta su demolición y desecho de residuos (Eurofins Environment Testing Spain [EurofinsETS], 2024).

La función principal del ACV es la de “brindar soporte para tomar las decisiones que se relacionan con productos o servicios; y más específicamente, la de conocer las posibles consecuencias ambientales relacionadas con el uso de un producto o con la configuración y utilización de un servicio” (Romero, 2003).

Para cualquier proyecto de construcción, ya sea de edificación, vial, aeroportuario, industrial, etc., existen etapas definidas dentro de su ciclo de vida. Estas etapas y sus actividades son estandarizadas por las normas *ISO 21930:2017 Sustentabilidad en edificios y obras de ingeniería civil – Normas básicas para declaraciones ambientales de productos de construcción y servicios*, y *EN 15978:2012 Sostenibilidad en la construcción - Evaluación del comportamiento ambiental de los edificios – Métodos de cálculo*.

Si bien ambas normas se enfocan el área de edificaciones, la categorización utilizada es aplicable a todas las obras de construcción. En la Ilustración 4 se puede apreciar dichas etapas, con su respectiva nomenclatura. Además también se hace la distinción sobre en cuales de estas etapas se considera huella de carbono incorporado u operacional.

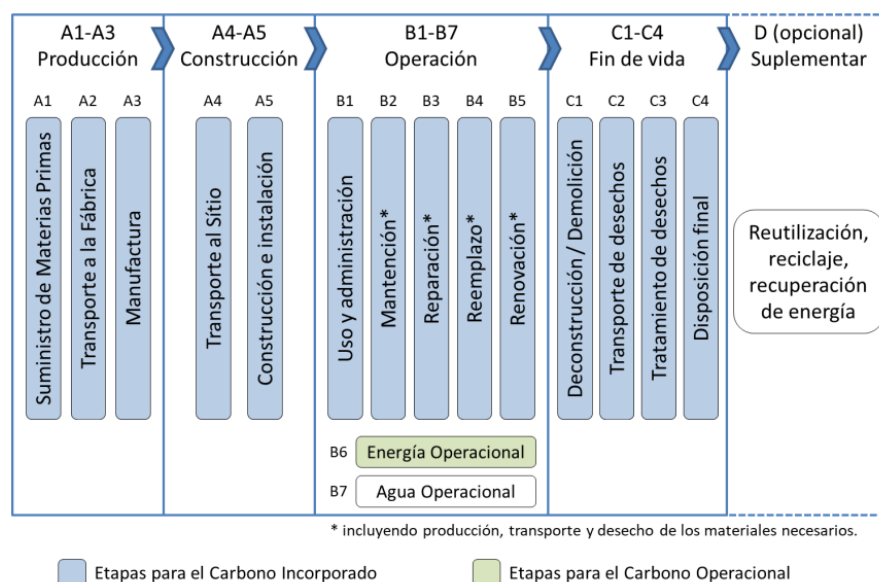


Ilustración 4: Esquema general de módulos para análisis de ciclo de vida de la construcción (Wiche, 2020).

En el ACV en la construcción se suelen considerar las etapas de producción, construcción y operación. Esto se debe a que los proyectos generalmente tienen una vida útil prolongada y están diseñados para incluir trabajos de mantenimiento y renovación, en lugar de ser obras temporales que deban ser demolidas y desechadas, a excepción de casos particulares.

La metodología de medición de HDC enfocada en un ACV se encuentra actualmente estandarizada mediante una estructura de trabajo sistematizada por las normas *ISO 14040:2006 Gestión ambiental - Análisis del ciclo de vida - Principios y marcos de referencia*, e *ISO 14044:2006 Gestión ambiental – Análisis del ciclo de vida – Requisitos y directrices*, ambas emitidas en el año 2006.

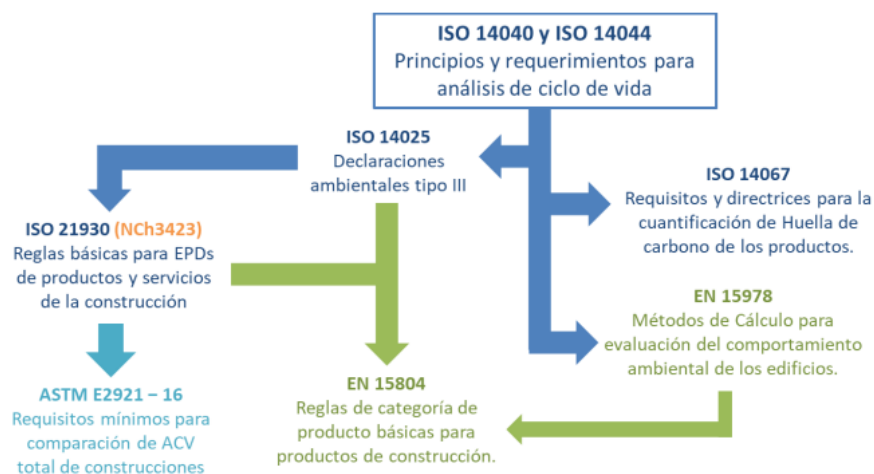


Ilustración 5: Relación entre los principales estándares internacionales para la cuantificación de impactos ambientales de la construcción y edificación (Wiche, 2020).

Existen softwares para realizar ACV, tales como OpenLCA, GaBi, SimaPro, entre otros, pero también existen metodologías definidas de manera interna por instituciones, siempre regidas por los estándares ya mencionados. Los softwares usualmente permiten realizar estos cálculos de manera más sencilla para un producto o servicio en general.

3.5 DECLARACIONES AMBIENTALES DE PRODUCTO

Las Declaraciones Ambientales de Producto (DAP) son ecoetiquetas de tipo III y proporcionan un perfil ambiental normalizado basado en datos ambientales cuantificados, desarrolladas mediante un ACV de acuerdo con las normas internacionales mencionadas.

El *International EPD System*¹, gestionado por *EPD International AB*, es el sistema más antiguo de medición, y también el creador de la DAP y las Reglas de Categoría de Producto (RCP). El sistema tiene su origen en el año 1998 en Suecia. En América Latina se gestionan las DAP por *Hub Latin America International EPD System*², y es operado en Chile por ADDERE Investigación.

El objetivo del programa de eco-etiquetado es “ayudar y dar apoyo a organizaciones para que comuniquen el desempeño ambiental de sus productos de una manera creíble y comprensible” (EPD Latin America [EPD], 2015a). Así mismo, se espera fomentar la demanda y producción de aquellos productos que causen un menos impacto sobre el medio ambiente, en la medida que más empresas incurran en ellas.

Si bien son de carácter voluntario, sirven como una herramienta de comunicación fiable entre empresas para evitar sesgos en información ambiental (*greenwashing*³), ya

¹ Sitio web: <https://www.environdec.com/home>

² Sitio web: <https://www.epd-americalatina.com/>

³ *Greenwashing*, o *Limpieza de imagen verde*, refiere a “Prácticas de marketing usadas por las empresas para proyectar una imagen pública de sello verde sin sustento en la realidad” (Gallardo, 2024)

que son la única forma de reportar de manera certificada los indicadores de desempeño ambiental de productos destinados a grandes transacciones comerciales a nivel global, aportando a su vez transparencia hacia los consumidores (AENOR Chile, 2024).

Las DAP se encuentran normalizadas internacionalmente por los estándares ISO 14025:2006 Etiquetas y declaraciones ambientales – Declaraciones ambientales tipo III – Principios y procedimientos, y EN 15941:2024 Sostenibilidad en la construcción – Calidad de datos para la evaluación ambiental de productos y obras de construcción – Selección y uso de los datos.

Por otro lado, las RPC son documentos que definen aquellos requisitos para la DAP de una determinada categoría de producto, y permiten la transparencia y comparabilidad entre diferentes DAP's que se basen en una misma RCP (EPD, 2015b).

3.6 ECONOMÍA CIRCULAR EN CHILE

En el contexto actual nacional, el Gobierno de Chile ha desarrollado diversas políticas y estrategias para fomentar el cambio hacia una economía circular, impulsando un modelo económico más sostenible.

Según lo señalado por Schröder et al. (2020), entre los países de América Latina y el Caribe (ALC), Chile es el país con mayor cantidad de iniciativas públicas orientadas en economía circular. A pesar de la buena posición estadística a nivel de ALC, el nivel de legislación sustentable sigue siendo bajo comparado a grandes potencias mundiales como Estados Unidos o China. Contradictoriamente, estos son los países más contaminantes debido a sus magnitudes de producción (Salvatierra, 2019).

En las políticas asociadas a la sostenibilidad se pueden encontrar leyes, planes de acción, programas, entre otros. Algunos de los ejemplos de políticas actuales que encaminan a la consolidación del desarrollo sustentable a nivel nacional son:

- 2012: Convenio Interministerial de Construcción Sustentable.
- 2014: Plan de Acción Nacional frente al Cambio Climático 2017-2022 (PANCC)⁴.
- 2016: Ley 20.920/2016: Establece marco para la gestión de residuos, la responsabilidad extendida del productor y fomento al reciclaje (REP)⁵.
- 2016: Programa Nacional de Consumo y Producción Sustentable⁶.
- 2017: Programa Huella Chile⁷.

⁴ Disponible en: <http://biblioteca.digital.gob.cl/handle/123456789/1422>

⁵ Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1090894>

⁶ Disponible en: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/08/20160905_PNCPS.pdf

⁷ Disponible en: <https://huellachile.mma.gob.cl/>

- 2019: Programa Estado Verde⁸.
- 2021: Ley 21.305/2021: Sobre eficiencia energética⁹.
- 2022: Ley 21455/2022: Ley Marco de Cambio Climático¹⁰

Existen además certificaciones sustentables emitidas por distintas Organizaciones No Gubernamentales (ONG) a las cuales se puede acceder voluntariamente.

Por ejemplo, en Chile se encuentran empresas de asesorías que ofrecen prestaciones para certificación de empresas, productos, servicios y eventos sustentables. Se proporcionan certificados de medición de Huella de Carbono y de Huella del Agua para su gestión, certificaciones de Carbono Neutral, y verificación del Programa Huella Chile en cuantificación, reducción, neutralización de Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Además, a nivel nacional Chile se comprometió en el Acuerdo de París con las *Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional*¹¹. También ha desarrollado y emitido una *Hoja de Ruta para un Chile Circular al año 2040*¹².

3.7 CONTRIBUCIONES DETERMINADAS A NIVEL NACIONAL

Existen compromisos que adquieren los países de manera voluntaria para hacer frente al cambio climático (CC), se les denomina Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC). En el Acuerdo de París se establece que los estados partícipes deben preparar, comunicar y mantener las NDC.

En el año 2015 Chile presenta su primera NDC, el proceso de actualización comenzó el año 2017 para finalmente entregar el año 2020 el documento con los nuevos compromisos NDC, de acuerdo con la fecha establecida. Se establecen compromisos en cuanto a mitigación de GEI, adaptación, ecosistemas, entre otros. Además, se incluye el pilar social, que busca establecer el criterio de justicia climática en la implementación de compromisos nacionales (Gobierno de Chile, 2020).

Según indica la División de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente, “Chile ha adoptado una posición líder en acción climática a nivel regional y mundial, demostrando su compromiso continuo a través de la implementación de diversas iniciativas o políticas y la presentación de NDC ambiciosas” (MMA, s.f.b).

En la NDC se encuentran los compromisos de mitigación de cambio climático. Entre estos Chile propone un presupuesto de emisiones de GEI que no supere las 1100 MtCO₂eq, entre el 2020 y 2030, con un máximo de emisiones de GEI al 2025, y alcanzar

⁸ Disponible en: <https://estadoverde.mma.gob.cl/Manual-Estado-Verde.pdf>

⁹ Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1155887>

¹⁰ Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1177286>

¹¹ Disponible en: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/contribucion-determinada-ndc/>

¹² Disponible en: <https://economiecircular.mma.gob.cl/hoja-de-ruta/>

un nivel de emisiones de GEI de 95 MtCO₂eq al 2030. También existen compromisos en los ámbitos de adaptación y de integración.

La Tabla 1 a continuación presenta las actualizaciones en las NDC por parte de Chile en los casos indicados, comparando las NDC 2015, con las propuestas de actualización de NDC en proceso de consulta pública (PAC), y las NDC 2020.

*Tabla 1: Comparación compromisos NDC por parte de Chile.
Fuente: Elaboración propia.*

ACTUALIZACIÓN NDC 2015 - 2020				
Área	Variable	NDC 2015	Propuesta NDC PAC	NDC 2020
Mitigación	Emisiones GEI	Intensidad de emisiones (tCO ₂ /PIB) reducción al 30% al 2030, base 2007	Emisiones absolutas: Llegar a 95 MtCO ₂ eq al 2030 Presupuesto de carbono periodo 2020 a 2030: 1100 a 1175 MtCO ₂ eq Peak emisiones: 2027	Emisiones absolutas: Llegar a 95 MtCO ₂ eq al 2030 Presupuesto de carbono periodo 2020 a 2030: 1100 MtCO ₂ eq Peak emisiones: 2025
	Carbono negro	Sin meta de reducción	Reducción de un 10% a 25% de las emisiones totales de CN al 2030, base 2016	Reducción de al menos un 25% de las emisiones totales de carbono negro al 2030, base 2016
Adaptación	Planes e instrumentos	Plan nacional Planes sectoriales de adaptación	Actualización del Plan Nacional y Planes sectoriales de adaptación. Desarrollo planes de acción regional. Mapa de vulnerabilidad a nivel comunal	Se mantienen compromisos, y se agregan: Determinación costos de inacción. Evaluación de riesgo para grupos más vulnerables con enfoque de género.
Integración	Residuos Orgánicos	Sin meta	2020: Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos	Se mantiene compromiso con propuesta
	Hoja de ruta e indicadores	Sin meta	2020: Hoja de ruta de Economía Circular (2020 a 2040). 2022: Generar e implementar métricas e indicadores de circularidad para monitorear avances del país	Se mantiene compromiso con propuesta Se mantiene compromiso con propuesta

Por otro lado, se menciona la promulgación e implementación de la Ley Marco de Cambio Climático por el MMA (s.f.b), la cual reconoce las NDC como un Instrumento de Gestión del Cambio Climático (IGCC), y estipula alcanzar la Carbono Neutralidad para el año 2050.

Según lo estipulado por el Acuerdo de París, para el año 2025 Chile debe presentar una actualización de su compromiso internacional de la NDC a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), de la cual se espera una mantención del nivel de ambición actual, y establecimiento de nuevos compromisos en un periodo de diez años.

3.8 HOJA DE RUTA PARA UN CHILE CIRCULAR AL 2040

En el año 2019 se inició el desarrollo de la denominada Hoja de Ruta (HDR) para un Chile Circular al 2040, por parte del Ministerio de Medio Ambiente (MMA), con el apoyo del Ministerio de Economía, la Corporación de Fomento de la Producción (CORFO), y la Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático. Dicho documento se publicó oficialmente en 2021.

El documento corresponde a un instrumento de política pública que orienta la transición del país hacia un modelo de desarrollo enfocado en un uso de recursos eficiente y sostenible, pilar fundamental del desarrollo sustentable (MMA, s.f.a).

De acuerdo con el mismo organismo, la finalidad de la Hoja de Ruta para el año 2040 es que “la economía circular regenerativa impulse a Chile hacia un desarrollo sostenible, justo y participativo (...), a través del cuidado de la naturaleza y sus seres vivos, la gestión responsable y eficiente de los recursos naturales, y una sociedad que usa, consume y produce de manera sostenible y consciente, fomentando la creación de empleos verdes y oportunidades para personas y organizaciones a lo largo del país” (MMA, s.f.a).

En la propia HDR (MMA et al., 2021) se establecen siete metas a largo plazo al 2040, con sus respectivas metas intermedias al año 2030. Dichas metas corresponden a:

1. Generación de empleos.
2. Disminución de la generación de residuos sólidos municipales por habitante.
3. Disminución de la generación total de residuos por PIB.
4. Aumento de la productividad material.
5. Aumento de la tasa general de reciclaje.
6. Aumento de la tasa de reciclaje de residuos sólidos municipales.
7. Recuperación de sitios afectados por la disposición ilegal de residuos.

Para poder alcanzar las metas mencionadas, la HDR propone 28 iniciativas, cada una de las cuales a su vez posee distintas acciones. Para esto se agrupan en torno a cuatro grandes ejes de acción: Innovación Circular, Cultura Circular, Regulación Circular y Territorios Circulares.

Cada uno de estos ejes tiene un foco distinto declarado por MMA et al (2021):

- **Innovación:** Fomenta la innovación para reducir impactos socioambientales, promoviendo negocios circulares y valorización de residuos.
- **Cultura:** Impulsa cambios sociales hacia estilos de vida sostenibles y mejora la educación y transparencia en la gestión de residuos.
- **Regulación:** Promueve regulaciones e incentivos económicos desde el estado para apoyar la economía circular y participación ciudadana.
- **Territorios:** Facilita la integración de la economía circular en el desarrollo regional, adaptándose a las particularidades locales y mejorando su infraestructura.

El Programa de Territorio Circular desarrolló y gestiona actualmente un *tablero de seguimiento y monitoreo*¹³. Es el elemento central para poder visualizar el progreso de tanto acciones del mismo programa como de las establecidas en la Hoja de Ruta para un Chile Circular al 2040.

El tablero de control posee una estructura de proyectos, acciones, iniciativas y ejes. Cuenta con 118 acciones, que son parte de las 28 iniciativas, agrupadas en los cuatro ejes de transformación fundamentales mencionados anteriormente.

¹³ Disponible en: <https://hojaderuta.sofofahub.cl/inicio>

4 SUSTENTABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN

La construcción de infraestructuras y obras públicas son esenciales para el crecimiento de un país. Asimismo, juega un papel fundamental en el desarrollo de sociedades sostenibles, en la búsqueda de soluciones para los desafíos ambientales y económicos actuales (Vera, 2019).

Esta industria es una de las más contaminantes en cuanto al nivel de emisiones de carbono que conlleva (Li *et al*, 2010). De acuerdo con la Agencia Internacional de Energía (IEA) a 2016, es responsable de generar cerca de un 38% de emisiones de GEI a escala global, y a nivel nacional se estima que el sector construcción podría potencialmente participar en cerca del 22,8% del total de emisiones de GEI. (Acuña *et al*, 2019).

Estos índices de contaminación se asocian también a la producción y transporte de materiales que se utilizan en ella. Por lo tanto, el impacto no es solamente por mera consecuencia de la construcción, sino que también debido al origen de sus materiales y sus procesos asociados, abarcando varias etapas de un proyecto (Lippiat, 1999).

El poder predecir los impactos sobre el ecosistema que conlleva el rubro de la construcción dentro de las primeras etapas del proyecto es un factor fundamental para conducir a un mejor comportamiento medioambiental de las obras de construcción (Enshassi *et al*, 2014). Los impactos de la construcción se clasifican en tres categorías, que involucran impacto sobre los ecosistemas, sobre los recursos naturales y sobre la comunidad (Chang *et al*, 2011).

La necesidad de abordar la construcción de manera más eficiente, tanto en lo económico como en lo medioambiental respecta, se ha convertido en una prioridad a escala global. Es en este contexto que, dentro del rubro de la construcción, la economía circular ha emergido como un enfoque innovador que promueve la maximización de los recursos, minimización de residuos, y disminución de emisiones de carbono (Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA], 2018).

De acuerdo se indica por el programa Construye2025 (2023), las normas técnicas juegan un rol fundamental en el avance del desarrollo de la economía circular del sector, y son un instrumento de apoyo eficaz para alcanzar la uniformidad necesaria, previo a la regulación.

Existe actualmente una norma nacional para construcción, *NCh3562:2019 Gestión de Residuos de la Construcción y Demolición (RCD)*, con la finalidad de establecer directrices para gestión de RCD y disminuir sus impactos ambientales y económicos.

También existe una norma complementaria a esta, *NCh3727:2021 Gestión de residuos – Consideraciones para la gestión de residuos de obras de demolición y auditorías previas a obras de demolición*. Es de carácter voluntario y algunas empresas de demolición la ofertan como parte de sus estándares (Construye2025, 2023).

El MMA solicitó al Instituto Nacional de Normalización (INN) el desarrollo de siete normas técnicas, todas bajo el título general: *Economía Circular – Atributos de circularidad e indicadores de desempeño circular*. Su objetivo se enfoca particularmente en el sector de la construcción, y la especificación se detalla a continuación.

1. prNCh3835: Vocabulario y marco de referencia para atributos e indicadores de circularidad en entornos construidos.
2. prNCh3836: Materiales, productos y elementos de construcción.
3. prNCh3837: Sistemas Constructivos.
4. prNCh3838: Planificación y diseño de proyectos de edificación e infraestructura.
5. prNCh3839: Construcción de proyectos de edificación e infraestructura.
6. prNCh3840: Planificación y diseño de barrios y entornos construidos
7. prNCh3841: Planificación, diseño y operación de ciudades circulares.

Específicamente en la construcción se cuenta también con certificaciones de sustentabilidad, y las hay, tanto de carácter internacional como nacional. En el nivel internacional, las certificaciones que operan en Chile corresponden a la certificación *LEED*¹⁴, *EDGE*¹⁵ y *Passihaus*¹⁶. En el nivel nacional, las certificaciones asociadas a la construcción son: *Certificación Vivienda Sostenible (CVS)*¹⁷ y *Certificación Edificio Sostenible (CES)*¹⁸.

Además de las normas y certificaciones, existen una serie de programas para la sustentabilidad en la construcción, algunos de ellos son:

1. *2013: Estrategia Nacional de Construcción Sustentable*¹⁹.
2. *2017: Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022*²⁰.
3. *2020: Hoja de Ruta RDC Economía Circular en Construcción 2035*²¹.
4. *2021: Estrategia Nacional de Huella de Carbono en el Sector Construcción*²².

¹⁴ Sitio web: <https://www.usgbc.org/leed>

¹⁵ Sitio web: <https://edgebuildings.com/>

¹⁶ Sitio web: <https://passivehouse.com/>

¹⁷ Sitio web: <https://cvschile.cl/#/home>

¹⁸ Sitio web: <https://www.certificacionsustentable.cl/>

¹⁹ Disponible en: <https://csustentable.minvu.gob.cl/item/estrategia-nacional-de-cs/>

²⁰ Disponible en: <https://dgop.mop.gob.cl/Documents/PlanAccionMop.pdf>

²¹ Disponible en: <https://economiecircular.mma.gob.cl/construccion/>

²² Disponible en:

https://participacionciudadana.minvu.gob.cl/sites/default/files/20210611_borrador_enhsc_formato_consulta_publica.pdf

4.1 PLAN DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN DE LOS SERVICIOS DE INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO 2017-2022

En el año 2017 fue elaborado el Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático. por la Secretaría Ejecutiva del Medio Ambiente y Territorio (SEMATE) de la Dirección General de Obras Públicas (DGOP). Se desarrolló el marco del Plan Nacional de Cambio Climático y fue aprobado por el Consejo de Ministros para la Sustentabilidad.

La visión se focaliza en que los servicios de infraestructura no se vean interrumpidos producto de amenazas climáticas, en el sentido de construir infraestructura que reduzca el riesgo de desastres producto de amenazas hidroclimáticas, y a su vez incorpore medidas de mitigación frente al CC (SEMATE, 2017)

El objetivo general del plan es la “incorporación de la problemática cambio climático en los servicios de infraestructura que provee el MOP, a fin de adaptarse a los cambios hidrometeorológicos futuros en un marco de resiliencia y sustentabilidad, además de contribuir a la mitigar la generación de GEI en las distintas fases del ciclo de vida de los proyectos” (SEMATE, 2017).

Posee una estructura de tres ejes temáticos: 1. Adaptación, 2. Mitigación, y 3. Gestión del conocimiento. Entre estos ejes se distribuyen un total de nueve líneas de acción que suman entre ellas 23 medidas específicas.

Los objetivos específicos de cada eje establecidos por el mismo documento son:

- Eje 1: Adaptar los servicios de infraestructura a los impactos proyectados por CC, bajo un enfoque de blindaje climático preventivo.
- Eje 2: Propender hacia la construcción de las obras de infraestructura MOP baja en carbono.
- Eje 3: Generar capacidades e institucionalidad en materia de CC en el MOP, para las áreas de adaptación y mitigación.

El plan se rige bajo cinco principios: Precautorio, Flexibilidad, Resiliencia, Gradualidad y Sustentabilidad.

4.2 HOJA DE RUTA RCD ECONOMÍA CIRCULAR EN CONSTRUCCIÓN 2035

En el año 2018 comienza el desarrollo de una Hoja de Ruta específicamente enfocada en la construcción, y es una iniciativa multisectorial conjunta de los ministerios del Medio Ambiente, Obras Públicas, Vivienda y Urbanismo, la CORFO, y el Programa Construye 2025. La Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción 2035 es finalmente publicada en el año 2020.

La visión nacional de esta HDR es que para el 2035 Chile sea “un país que gestiona de forma eficiente y responsable los recursos en el ciclo de vida de los proyectos de edificación e infraestructura, involucrando a todos los actores de la cadena de valor, (...), impactando positivamente en los ámbitos social, ambiental y económico” (Construye2025 et al, 2020).

Dentro de su alcance se definen metas para los años 2025 y 2035, organizadas bajo cinco ejes estratégicos que abordan las temáticas más importantes que conducen al cierre de brechas en el sector, y corresponden a los siguientes:

1. Planificación territorial e infraestructura.
2. Coordinación pública para el marco regulatorio.
3. Ecosistemas y cadenas de valor.
4. Información e indicadores.
5. Restauración de pasivos.

Las metas al año 2035 más relevantes para cada uno de estos ejes considerando sus lineamientos y acciones, de acuerdo con Recylink (2023), plantean lo siguiente:

- Eje 1: Ordenamiento y planificación del territorio consideran el crecimiento de la edificación e infraestructura y los impactos que genera la construcción, estableciendo instrumentos que fomentan la economía circular y el uso eficiente de recursos
- Eje 2: El 50% de la edificación e infraestructura pública nueva en Chile cuenta con criterios y atributos circulares, acreditados a través de certificaciones.
- Eje 3: A nivel nacional, el 40% de la oferta de materiales, productos y componentes para la construcción cuenta con atributos circulares.
- Eje 4: el país cuenta con plataformas de trazabilidad de materiales y residuos para la economía circular del sector de la construcción.
- Eje 5: El país cuenta con programas a nivel regional para la remediación, restauración y mitigación de los riesgos generados por la extracción ilegal de áridos y disposición inadecuada de RCD.

Los lineamientos, acciones, metas y actores se desarrollan también bajo cinco ejes transversales para complementar su categorización, estos ejes son:

1. Institucionalidad.
2. Marco regulatorio y fiscalización.
3. Fomento e inversión.
4. Formación y difusión.
5. Innovación y tecnologías.

EJES ESTRATÉGICOS



Ilustración 6: Ejes estratégicos y transversales de la HDR RCD ECC 2035 (Construye2025 et al, 2020).

El programa Construye2035 et al (2020) también declara los ocho principios para la implementación de la HDR RCD ECC, considerando:

1. Gradualismo.
2. Colaboración multisectorial.
3. Inclusión, participación y transparencia.
4. Velar por el bien común.
5. Fomento a la colaboración para mejorar competitividad, innovación y emprendimiento.
6. Modernización hacia una economía circular
7. Fomento al fortalecimiento regional y local.
8. Racionalidad y responsabilidad ambiental.

Para la efectiva implementación de la hoja de ruta, en la Ilustración 7 se presenta un diagrama resumen con las acciones a considerar por cada una de las partes involucradas.

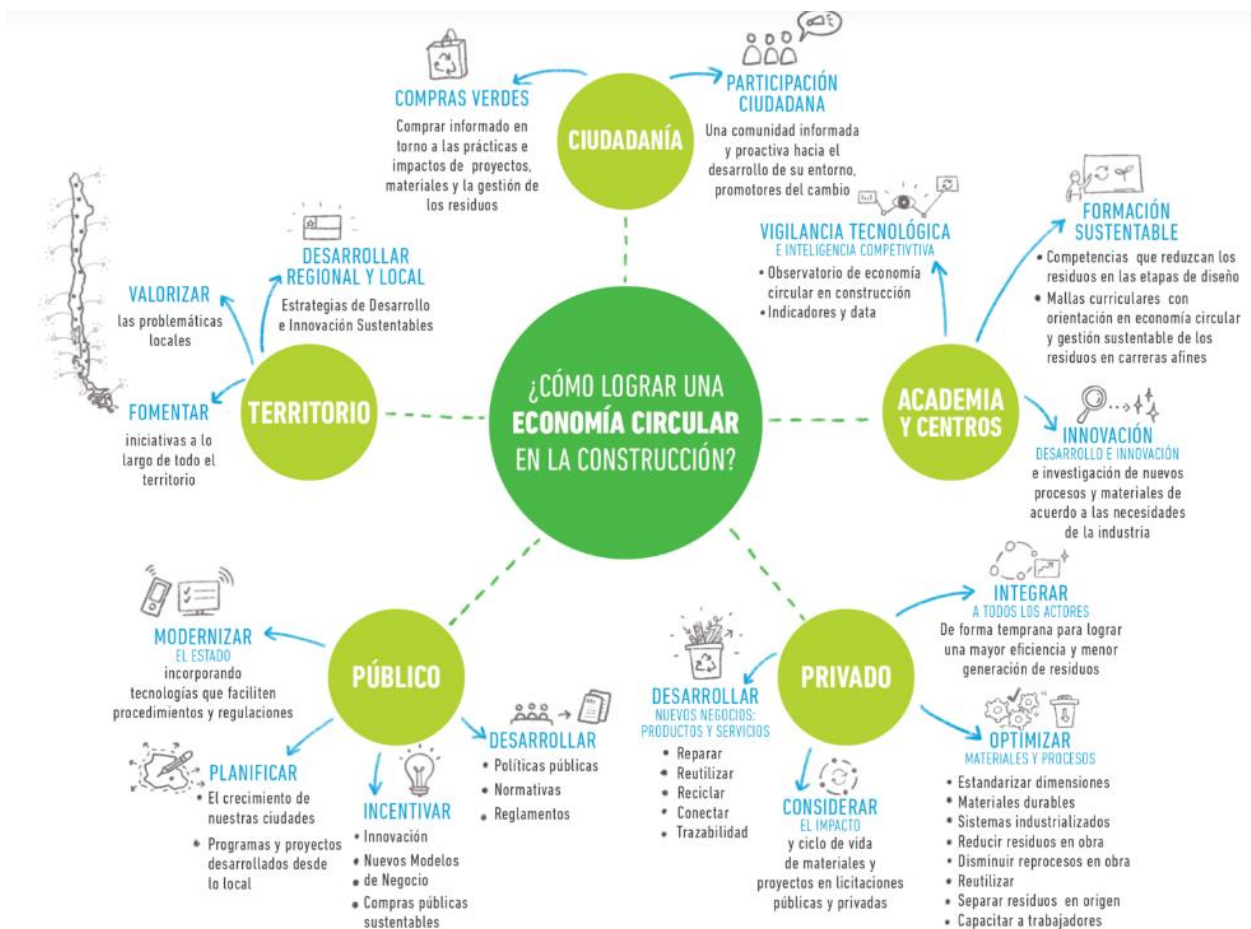


Ilustración 7: Esquema de acciones para implementación de economía circular en la construcción (Recylink, 2023).

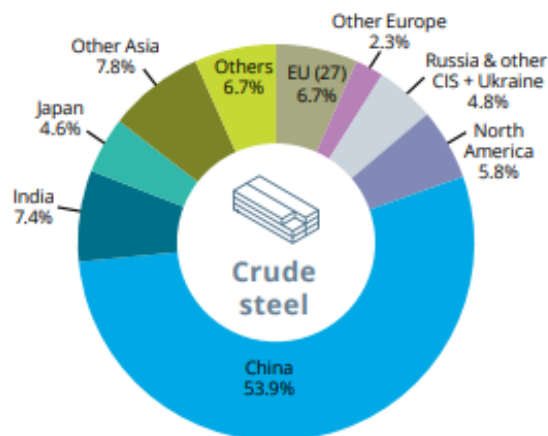
4.3 LA INDUSTRIA SIDERÚRGICA.

La industria siderúrgica es de uso intensivo, tanto en recursos materiales como energéticos. Sus principales emisiones son dióxido de carbono en la atmósfera, además de otros GEI, donde la cuantía de cada producto subyace de su línea de producción (Gervasio, 2014). A escala global es responsable de entre un 7 y 9% de las emisiones contaminantes totales (Wold Steel Association [Woldsteel], 2024)

La World Steel Association (Worldsteel) (2024) indica en su informe anual que el mayor productor de acero a nivel mundial es la República Popular China, abarcando un 53,9% de la producción 2023, mientras que la región Sudamericana representa solo un 2,2% del total, tal como se puede notar en la Ilustración 8.

Crude steel production

World total: 1 892 million tonnes

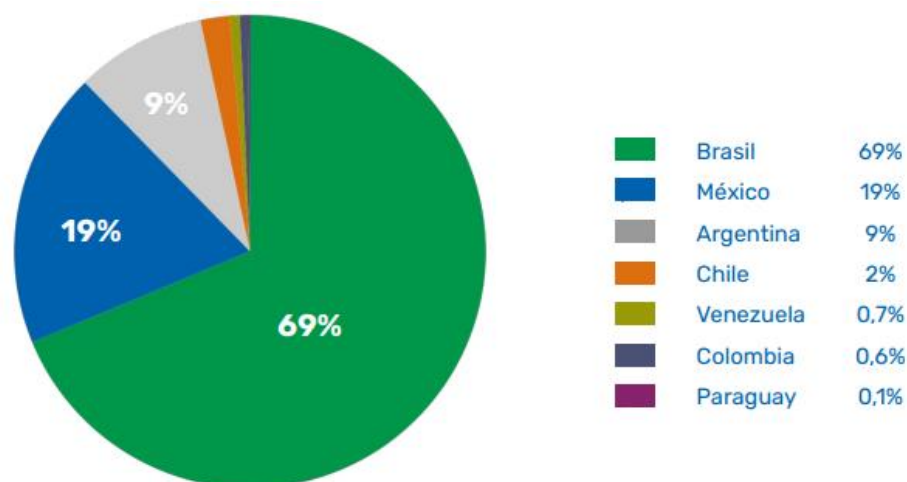


Others comprise:

Africa	1.3%	South America	2.2%
Middle East	2.9%	Australia and New Zealand	0.3%

Ilustración 8: Distribución geográfica de producción global de acero crudo (Worldsteel, 2024).

Dentro de la producción Latinoamericana, según la Ilustración 9, Chile representa solo un 2% del total, y tuvo una variación positiva de un 3,6% en 2023 vs. 2022. Sin embargo, el acero crudo producido en la región de América Latina sufrió una caída en su producción total de un 7,5% en 2023 vs. 2022 (Asociación Latinoamericana del acero [Alacero], 2023).



Fuente: (e) 2023 Estimado en base a los 8 primeros meses.

Ilustración 9: Distribución geográfica de producción Latinoamericana de acero crudo (Alacero, 2023).

En cuanto al sector de la construcción, el acero destinado a este para el año 2023 corresponde aproximadamente a un 52% de la producción total a nivel mundial (Worldsteel, 2024).

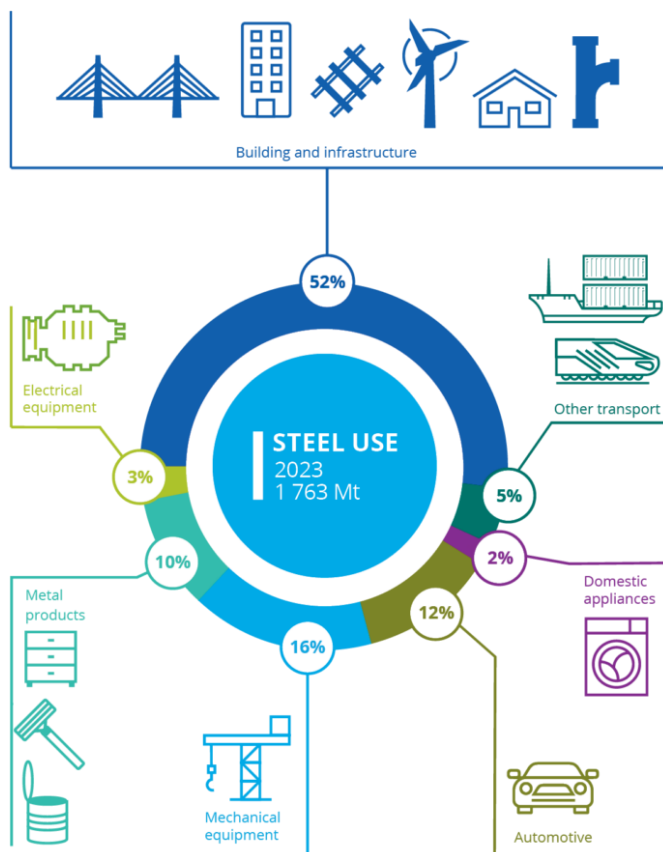


Ilustración 10: Sectores consumidores de acero 2023 a nivel global (Worldsteel, 2024).

Específicamente en América Latina, el acero destinado a construcción e infraestructura es aproximadamente un 48,5% (Alacero, 2023).

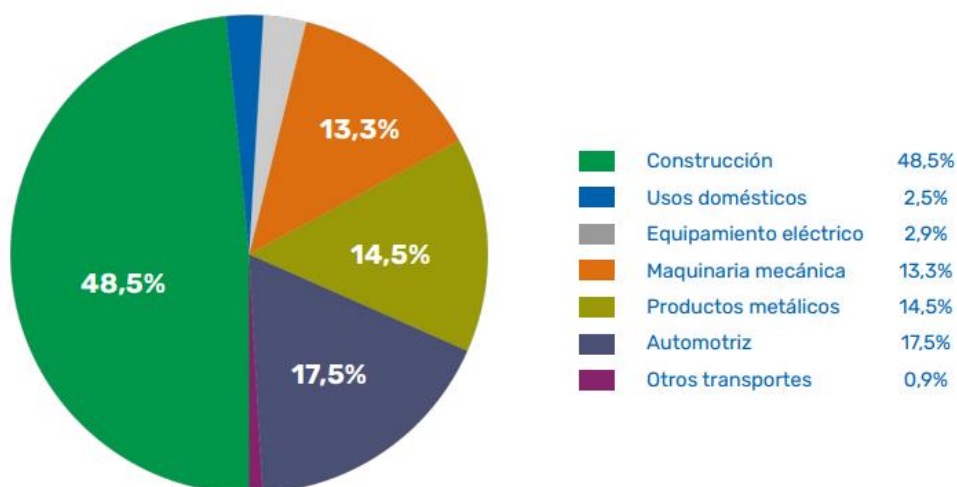


Ilustración 11: Sectores consumidores de acero 2023 en América Latina (Alacero, 2023).

Actualmente existen dos rutas principales en la producción acerera, mediante una economía de producción lineal en alto horno, y mediante una economía circular en horno eléctrico, siendo la segunda la principal participante en el reciclaje de chatarra de acero, con menores gastos, tanto en materias primas como recursos energéticos. (Gervasio, 2014).

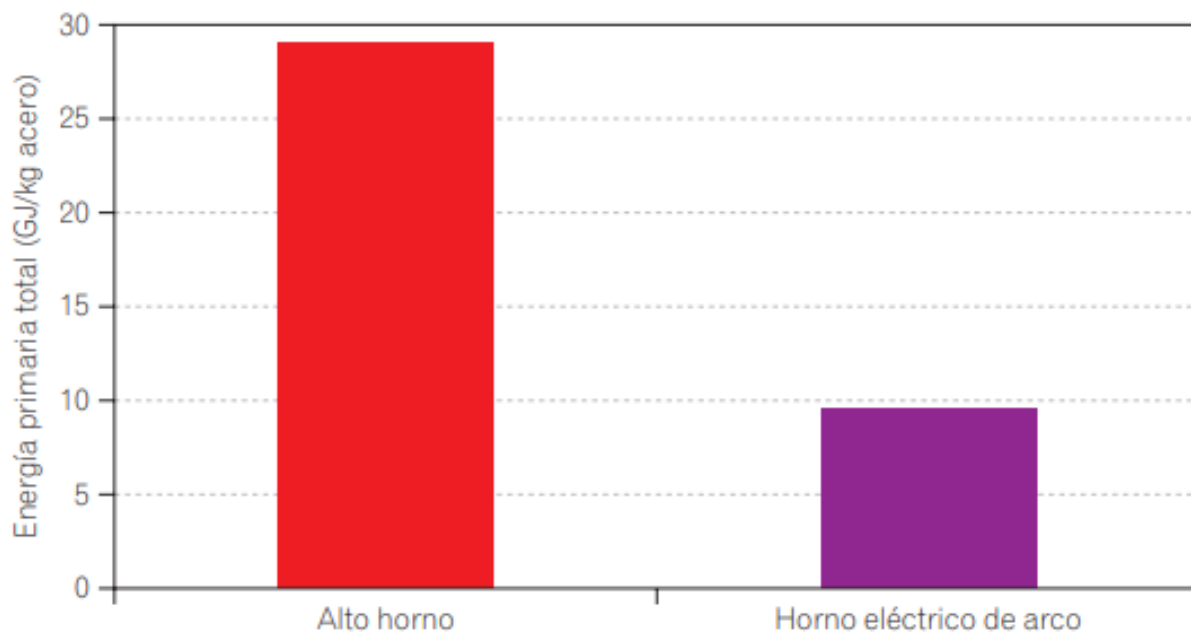


Ilustración 12: Energía consumida por proceso en alto horno y horno eléctrico (Gervasio, 2014).

La implementación de una circularidad de residuos como materia prima para producción es de inmensa contribución al buscar encaminar un futuro sostenible dentro del rubro (Centro de Desarrollo Tecnológico [CDT], 2020).

El principal beneficio del acero como material de construcción sostenible se basa en su potencial y sencillez de reciclaje, ya que es capaz de ser reciclado indefinidamente sin perder sus atributos, favoreciendo su producción a gran escala. Esta característica hace del acero un material ideal para promover la economía circular, ya que el proceso de recirculación de acero reduce considerablemente el gasto en materias primas y energía necesaria para su fabricación (Instituto Chileno del Acero [ICHA], s.f.)

Según indica Alacero (s.f.) y Worldsteel (2024), aproximadamente un 30% del acero del mundo se produce a partir de chatarra ferrosa, es decir, considerando un proceso de producción basado en la circularidad del material.

A continuación se mencionan dos siderúrgicas nacionales, AZA y CAP, donde la primera se encarga de producir acero reciclado en horno eléctrico, y la segunda de producir acero convencional en alto horno. Ambas empresas son principales fabricantes de acero, y son las únicas siderúrgicas nacionales que cuentan con sus respectivas DAP's para barras de acero de refuerzo.

4.4 FABRICACIÓN DE ACERO RECICLADO EN CHILE

La empresa AZA es el principal fabricante de productos de acero a partir de chatarra en Chile, conocido como acero verde, utilizando hornos de arco eléctrico. En el año 2022 establecieron un nuevo modelo de sostenibilidad, el cual gira en torno a tres ejes centrales: 1. Negocio de excelencia, 2. Economía circular, regenerativa y net zero, y 3. Personas y comunidades sostenibles.

Cuentan con diez compromisos públicos a alcanzar en 2025-2030, distribuidos en los tres ejes mencionados. En su reporte de sostenibilidad 2023 (AZA Acero Sostenible [AZA], 2023) declaran haber cumplido ya con tres de las diez metas.

Además, en el mismo documento declaran que durante el año 2023 un total de 502.535 toneladas de chatarra fueron convertidas en acero verde, generando una producción de 365.072 toneladas de productos de acero laminado. En cuanto a intensidad de emisiones de CO₂, se declara 0,24 toneladas de CO₂eq por tonelada de acero producido.

De acuerdo con las fichas de producto, las barras de refuerzo producidas son contenidas en un 97,7% de material reciclado (AZA, 2020). Las DAP por su parte indican para 1 tonelada de barras de refuerzo producida en la planta Colina se genera 286 kg CO₂eq, mientras que en la planta Renca se genera 310 kg CO₂eq. Además, señala que la huella de carbono corresponde a 0,0067 kg CO₂eq/kWh. (EDP, 2022).

4.5 FABRICACIÓN DE ACERO A PARTIR DE MINERAL DE HIERRO Y CHATARRA EN CHILE

El grupo CAP es un holding multinacional dedicado a la industria minera y metalúrgica. Una de sus principales áreas de negocios es CAP Acero, que administra la Compañía Siderúrgica Huachipato (CSH), principal productora nacional de acero. Actualmente se encuentra en el proceso de cierre definitivo, luego de 70 años, el cual culminará a finales de octubre 2024 (Forbes Chile, 2024).

La memoria integrada 2023 establece una estrategia de sostenibilidad y gestión ambiental, social y de gobernanza (ASG), con un total de 20 compromisos asociados y sus respectivas metas al año 2030 (Compañía de Acero del Pacífico [CAP], 2024).

En cuanto a producción, la memoria integrada señala que en el año 2023 se produjeron 714.986 toneladas de acero líquido, y 706.677 toneladas de acero terminado.

De acuerdo con la DAP elaborada por EDP (2023), las barras de acero producidas son una mezcla de arrabio y chatarra, contenidas en un 24% de material reciclado, y el 76% restante de arrabio. También se indica que para 1 tonelada de barras de refuerzo no soldable se genera 2.550 kg CO₂eq, mientras que para barras de refuerzo soldables se genera 2,580 kg CO₂eq.

5 SITUACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN OBRAS PÚBLICAS EN CHILE

5.1 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Los principales ejes de acción corresponden a lineamientos y políticas específicas usualmente orientados a la incorporación de la economía circular en sus proyectos, la mayoría de estas previamente nombradas, tales como la participación en la Hoja de Ruta RDC ECC 2025.

Además, algunas como la Política de Sustentabilidad Ambiental del Ministerio de Obras Públicas 2016²³ por la DGOP, de la cual se encuentra en desarrollo una nueva versión. Tiene como objetivo “establecer los fundamentos, principios y acciones que permitan una gestión sustentable en el desarrollo de la infraestructura pública y gestión del recurso hídrico” (SEMAT, 2016).

También se elaboró el ya mencionado Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022, dentro del cual se establecen una serie de medidas para la concreción del objetivo asociado al segundo eje de acción, entre ellas se destacan:

- Medición y gestión de la HDC en las obras de infraestructura y edificación pública que ejecute el MOP.
- Calcular la HDC en la fase de construcción de obras.

5.2 DIRECCIÓN DE VIALIDAD

Por su parte la Dirección de Vialidad (DV) publicó una actualización del *Manual de Carreteras*²⁴ (MC), edición 2021, de la cual se destaca la incorporación de la normativa y lineamientos para el desarrollo de proyectos viales sustentables.

También se publicará en septiembre 2024 una actualización del MC, de la cual se destaca la incorporación de nuevas especificaciones sobre la gestión de residuos, el monitoreo del agua y el control de emisiones.

También se han realizado modificaciones en requerimientos para contratistas, incluyéndose como requisitos en las Bases de Concurso y Bases de Licitación de las Obras.

Se espera que con el tiempo la implementación de proyectos piloto con requisitos de sustentabilidad basados en lineamientos de ecodiseño y gestión de residuos, y la implementación de buenas prácticas se transformen en un esfuerzo guiado y coordinado

²³ Disponible en: <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/25913>

²⁴ Disponible en: <https://mc.mop.gob.cl/>

hacia un trabajo sistemático que tienda a la generación de proyectos más sustentables (Ibáñez, 2020).

Como ejemplo de buenas prácticas se presentan algunas iniciativas desarrolladas por la DV que implementan medidas de EC:

1. Reciclaje de pavimento en pavimento espumado y mejoramiento de base.
2. Uso de neumáticos en desuso (caucho) en mezclas asfálticas.
3. Uso de barreras metálicas y prefabricadas de hormigón en desuso para la construcción de muros de contención.
4. Reciclaje de cartones y embalajes.
5. Reciclaje de acero mediante rescate y venta de enfierraduras.

Actualmente, según lo señalado por Ibáñez (2023), se están tomando una serie de medidas importantes que encaminan el enfoque de proyectos de vialidad hacia un futuro más sostenible.

Para empezar, en los Estudios de Ingeniería, a finales de 2023 se incorporó un nuevo *Estudio Base* en los Informes Ambientales Territoriales (IAT), su finalidad es la estimación de HDC en la etapa de diseño, incluyendo un ACV. Esta medida permitirá implementar requisitos de las normas *ISO 14025*, *EN 15804*, y, *EN1 5978*.

Al mismo tiempo se encuentran en postulación dos estudios básicos, uno para establecer una metodología de medición de HDC en proyectos viales, y otro para una recopilación del estado del arte de las DAP de los materiales de construcción y elementos utilizados en las obras viales en Chile.

Por último, el Laboratorio Nacional de Vialidad ha iniciado un proceso para medición de HDC de los ensayos que en este se realizan, el objetivo es establecer la contribución de dichas actividades en la HDC de un proyecto. De la misma forma procura medir HDC operacional de sus instalaciones, ubicadas en la comuna de La Florida, para así implementar medidas de mitigación en emisiones de GEI.

Todas estas medidas buscan provocar una influencia en la industria de la construcción en general para fomentar las obras de infraestructura vial reducidas en emisiones de carbono, y a su vez antecedentes locales que permitan estimar HDC de manera más exacta en las mismas.

5.3 DEPARTAMENTO DE PUENTES

Por parte de la Jefatura de Proyectos Plan Puentes, y del Departamento de Puentes de la DV, se ha incursionado también respecto a materia de sustentabilidad en la construcción. Con el objetivo de contribuir a los compromisos nacionales de carbono neutralidad al 2050, la DV ha decidido implementar en sus proyectos atributos relativos

a la reducción de GEI y criterios de economía circular, entre ellos se destaca la participación del Departamento de Puentes.

Existe actualmente en implementación un proyecto piloto desarrollado por el Departamento de Puentes de la DV, que establece requisitos de entrada, considera la reposición de dos puentes ya existentes, Puente Marquesa en Vicuña y Puente Rubens en Natales, para los cuales se solicita la incorporación de material reciclado en su estructura. Para ambos se realizaron las mismas indicaciones.

Se incluyó dentro de las Bases de Licitación un requisito referido a las barras de refuerzo para el hormigón armado y las mallas de armadura, que deben contar con un mínimo porcentual de acero reciclado, y dichos elementos a su vez deben contar con su respectiva DAP. También se debe certificar el origen de todos los elementos metálicos utilizados en el proyecto.

El proyecto se alinea con los principios de ecodiseño, ya que considera la implementación de principios de economía circular desde la etapa de ingeniería conceptual, siendo este planeado con el propósito de aplicar un material en recirculación, para el caso, chatarra de acero reciclada para producción de acero reciclado.

Solo se considera en este proyecto piloto las exigencias de entrada mencionadas, con la finalidad de un posterior estudio de impacto ambiental de esta práctica. Actualmente solo existe una planta en Chile productora de acero reciclado, lo que podría llegar a considerarse confabulación a favor de un monopolio en la industria siderúrgica.

A pesar de esto, se implementa el proyecto con la finalidad de evaluar la incidencia de la circularidad en materiales de construcción para obras públicas, en caso de ser una reducción de impacto favorable y considerable, se espera eventualmente que más manufactureras quisieran innovar en producción de materiales a partir de revaloración de desechos.

Se estipula dentro de la Hoja de Ruta RCD, para la primera meta del Eje 3 al año 2035, que “a nivel nacional el 40% de la oferta de materiales, productos, piezas y componentes para la construcción cuenta con atributos circulares” (Construye2025, 2020), es por esto que se considera este tipo de exigencias en proyectos piloto como motivación para poder encaminar el sector construcción hacia dicha meta.

5.4 PROYECTO PILOTO DE LA DIRECCIÓN DE VIALIDAD

El proyecto piloto abarca dos proyectos de puentes rotulados: “*Reposición Puente Marquesa en ruta D-125, comuna de Vicuña, Región de Coquimbo*” (código SAFI: 371.657), y “*Reposición Puente Rubens y accesos*”, en ruta 9 norte, comuna de Natales, Región de Magallanes y la Antártica Chilena (Código SAFI: 371.194).

En la Hoja de Ruta RCD, en el Eje 3, se tiene como segunda meta al año 2035 que “el 80% de la infraestructura vial pública incorpora un porcentaje de materiales reciclados, áridos, asfalto y hormigón, entre otros” (Construye 2025).

Con relación a dicha meta es que se determinó privilegiar el uso de acero reciclado en la ejecución de obras de ambos puentes indicados, según los siguientes requisitos incluidos en los antecedentes de licitación²⁵, en el apartado de especificaciones ambientales generales (DV, 2023a, 2023b):

- El 80% de acero para las barras de refuerzo sea reciclado.
- Para mallas de armadura prefabricadas, se requiere que estas cumplan con un 65% mínimo de material de origen reciclado.
- Para el resto de los elementos (defensas camineras, señales, soportes, postes, chevrones y otros elementos), se solicitará indicar cuál es el proveedor y el porcentaje de acero reciclado que se utiliza en dichos elementos. En caso de no tener estos datos o que no se utilice acero reciclado, esto se deberá justificar.

Además, dentro del mismo documento se aclaran las condiciones expuestas en la Ilustración 13 para los requisitos mencionados anteriormente.

En caso de que por fuerza mayor, no puedan obtenerse la totalidad de los materiales o productos con acero reciclado, dicho aspecto deberá justificarse en la oferta técnica. Sin embargo, no podrá desestimarse dicho requisito para las barras de refuerzo, las que para todos los efectos deberán contar con esta característica.

Para cumplir lo anterior, deberá contarse con la certificación de los respectivos aceros de origen reciclado y la trazabilidad del producto, lo cual permita verificar origen y procedencia. Se requerirá de la presentación de una ficha técnica que especifique las características de la materia prima o producto. Asimismo, los productos adquiridos deberán contar en la medida de lo posible, con Declaración Ambiental de Producto (DAP), en conformidad a la Norma ISO 14025.

Ilustración 13: Extracto "4.2. Especificaciones Ambientales Generales", Antecedentes de Licitación (DV, 2023).

5.5 GUÍA ESTIMACIÓN HUELLA DE CARBONO PROYECTOS MOP

Actualmente se encuentra en desarrollo una guía para estimación de huella de carbono, la cual servirá de base para uniformizar la metodología de evaluación de impacto de proyectos de ministeriales de obras públicas en todos los sectores que este abarca.

²⁵ Disponibles en:

(Puente Marquesa)

<https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=7z/jT+fHdkFR2ynFl3jxew==>

(Puente Rubens)

<https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?qs=ME1V7FoCT1w059eBUdFlFg==>

Dicho documento se titula “Guía para la estimación de la huella de carbono en proyectos MOP” y está en siendo elaborada por el Departamento de Cambio Climático y Economía Circular en la DGOP.

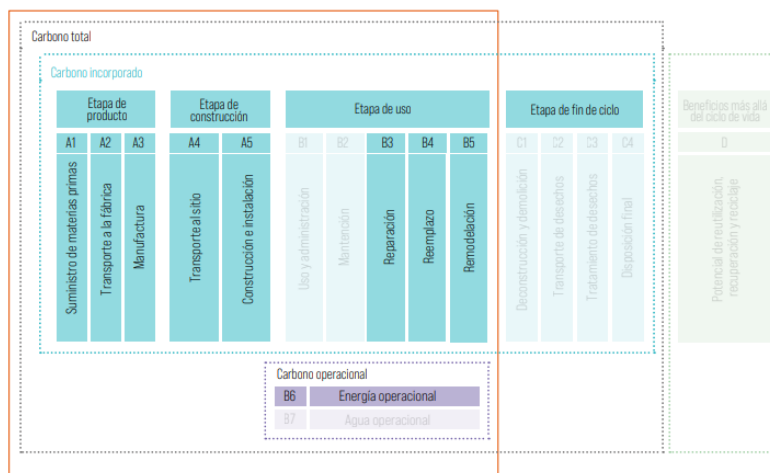
A la fecha²⁶, se dispone del borrador abril 2024, no siendo este su versión final. El documento fue revisado por la jefatura del Departamento de Cambio Climático y Economía Circular, en la división de Infraestructura Sustentable en la DGOP.

El objetivo de la guía es “establecer lineamientos y sentar una base metodológica común para la medición de huella de carbono en proyectos MOP, tanto para la infraestructura, como para la edificación pública, de manera que los proyectos sean comparables entre sí, en términos de sus emisiones” (Alarcón, 2024).

A continuación, se plantean una serie de conceptos y definiciones, recopiladas por Alarcón (2024) en la guía, para considerar en la aplicación de la metodología.

Unidad Funcional: desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia.

Alcance de evaluación: La guía de evaluación de HDC en proyectos MOP posee un alcance *de cuna a puerta* en el ACV, es decir, solo abarca las etapas de producto, construcción y uso. El alcance *de cuna a tumba* también considera la etapa del fin del ciclo de vida, incluyendo el proceso de demolición y gestión de residuos



Alcance de evaluación Casos de Estudio MOP

Ilustración 14: Etapas de ciclo de vida consideradas para el alcance de evaluación de huella de carbono en casos de estudio de proyectos MOP (EBP et al, 2023).

Diagrama de decisión: Primera parte de diagrama para guiar que etapas se deben incluir en la evaluación de HDC según el tipo de proyecto.

²⁶ Julio 2024

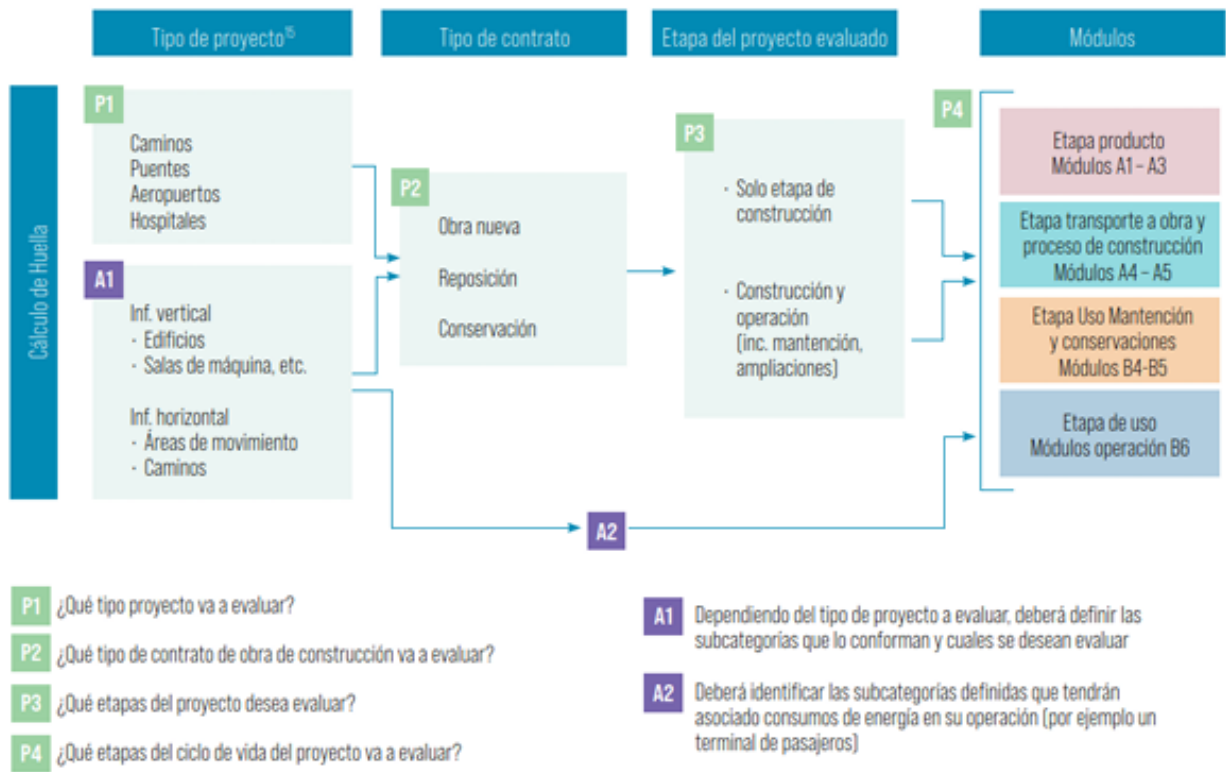


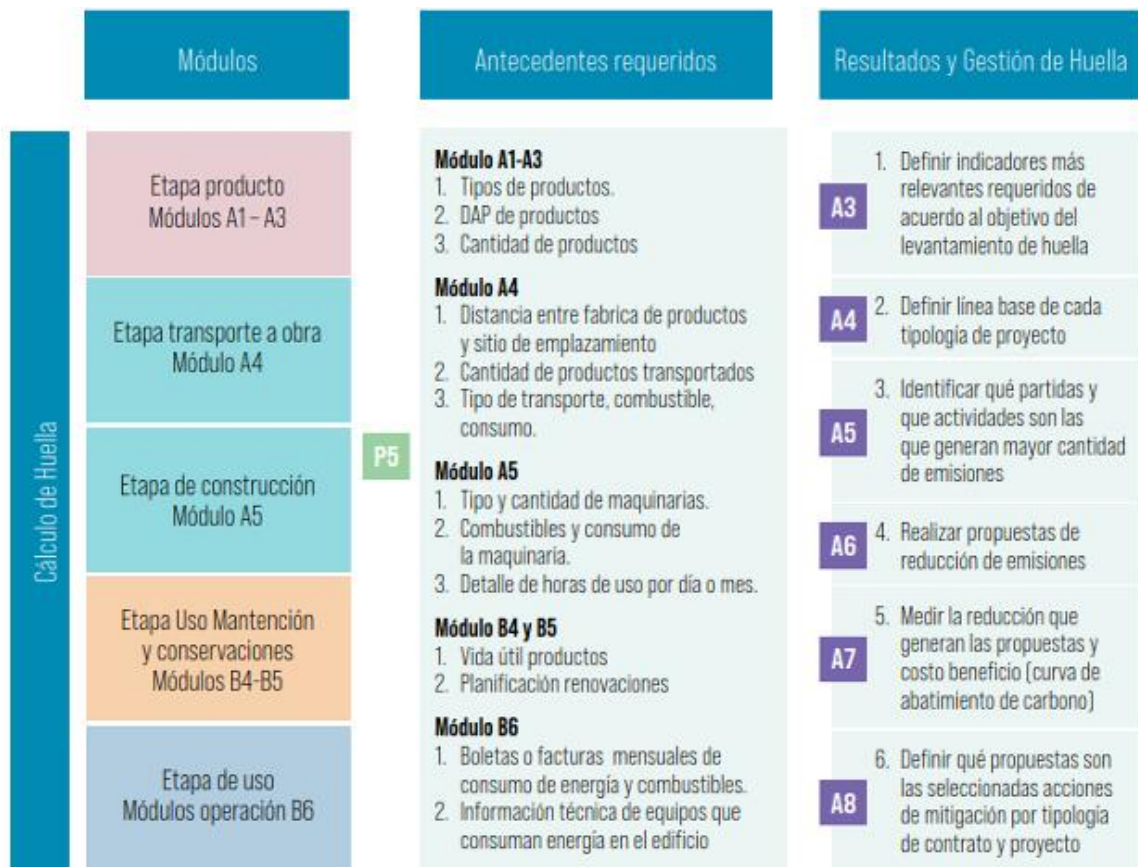
Ilustración 15: Diagrama metodología básica para levantamiento de emisiones en proyectos de infraestructura y edificación pública (Alarcón, 2024)

Categorías y subcategorías: Se define una clasificación de categorías en infraestructura vertical y horizontal, cada una con sus subcategorías correspondientes, con el fin de ordenar la información disponible.

Categorías	Ejemplos Subcategorías
Infraestructura Vertical	Edificaciones (Edificio Administrativo, Torre de control, etc.)
	Superestructura puentes (pilares, fundaciones, etc.)
	Obras Complementarias (cierres perimetrales, casetas, etc.)
Infraestructura Horizontal	Área de movimiento (pista, plataforma, área de maniobra, etc.)
	Caminos (base y subbase, pavimentos, etc.)
	Obras complementarias (alcantarillados, drenajes, etc.)

Ilustración 16: Categorías y subcategorías de infraestructura en proyectos MOP (MOP, 2023).

Antecedentes por etapa: Se definen los siguientes requisitos de levantamiento de información para los distintos módulos a considerar en el análisis.



P5 ¿Qué tipo de información se necesita para cada etapa?

Ilustración 17: Metodología de levantamiento de información para cálculo de huella de carbono en su ciclo completo (Alarcón, 2024).

Emisiones: Se estiman de manera general con la siguiente ecuación.

$$Emisiones = \sum_{i=1}^n (NA \times FE)_i \quad (1)$$

Donde:

NA: nivel de actividad (cantidad, distancia, etc.) para el material/actividad

FE: factor de emisión del material o actividad

Emisiones módulos A1-A3: Huella asociada a materiales mediante análisis conocido como *de cuna a puerta*, determinando los factores de emisión y niveles de actividad.

Donde:

$$[A1 - A3] = \sum_{i=1}^n (\text{Cantidad de material} \times FE)_i \quad (2)$$

[A1-A3]: emisiones totales de la etapa de producto.

FE: factor de emisiones del material.

Emisiones módulo A4: Huella asociada a transporte de materiales hasta el sitio de construcción (A4).

$$[A4] = \sum_{i=1}^n (\text{Distancia a obra} \times \text{cantidad total de viajes} \times FET_{tn})_i \quad (3)$$

Donde:

[A4]: emisiones totales asociadas al transporte.

FET_n: factor de emisiones del transporte.

Elementos para interpretación de datos: Se deben considerar siete elementos a grandes rasgos para confirmar que los datos correspondan a los supuestos realizados.

Elemento	Detalle a considerar
Alcance	Etapas del ciclo de vida y actividades incluidas
Exclusiones	Lo que se dejó fuera del estudio, deliberadamente
Suposiciones	Consideraciones para completar vacíos de información
Criterios de Corte	Criterios para definir "hasta dónde" recolectar datos
Calidad de Datos	Nivel de cercanía entre los datos utilizados y la realidad
Benchmarks	Rango de referencia de la huella de proyectos similares

Ilustración 18: Elementos a considerar para la interpretación (Alarcón, 2024).

6 ANTECEDENTES PARA ANÁLISIS DE PROYECTOS

6.1 CASO DE ESTUDIO 1: PUENTE MARQUESA

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto corresponde a una obra de reposición del puente *Marquesa*, ubicado sobre el Río Elqui en la Comuna de Vicuña, Región de Coquimbo. Considera la construcción del nuevo puente, también una nueva intersección con la ruta 41-CH, y el acceso al poblado de Marquesa por la calle Ex línea férrea en sentido poniente – oriente.

El proyecto fue publicado en mercado público para licitación y adjudicado.

En la Ilustración 19 se puede ver el plano de ubicación del proyecto.

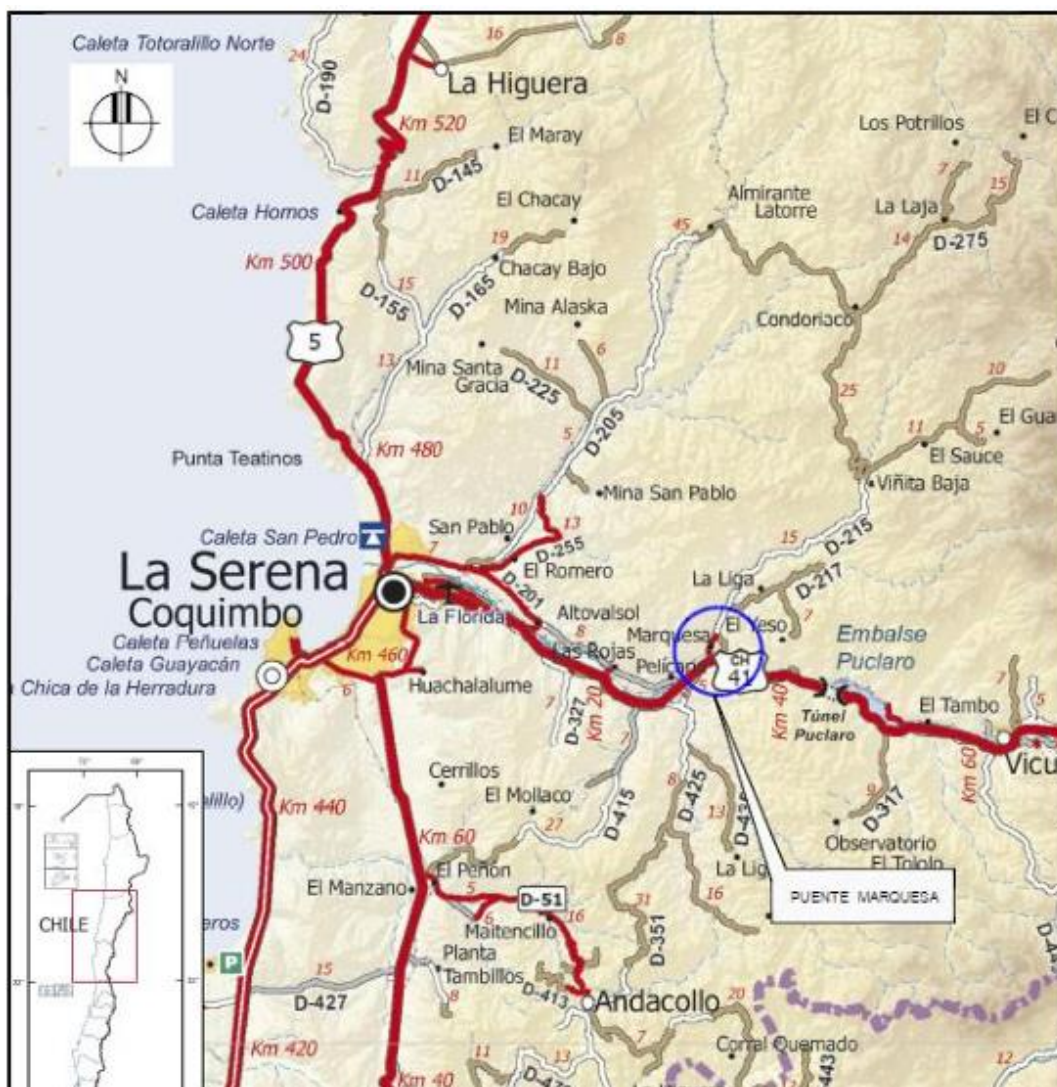


Ilustración 19: Plano de ubicación Puente Marquesa.
Fuente: Bases de licitación del proyecto.

Los datos generales de proyecto son los siguientes:

*Tabla 2: Datos generales proyecto Puente Marquesa.
Fuente: Elaboración propia.*

DATOS GENERALES PROYECTO PUENTE MARQUESA	
Ubicación del proyecto	Ruta D-215, Km 0.621, Comuna de Vicuña, Región de Coquimbo.
Partida evaluada	Estructura puente.
Longitud evaluada	152 metros.
Estado actual²⁷ del proyecto	Revisión de la Contraloría General de la República, en espera de Toma de Razón (V°B°) para dar curso a inicio de obras.

PLANOS DE PROYECTO Y PRESUPUESTO DE OBRA

En la sección ANEXO, en el apartado o se encuentran disponibles los planos de estructura del puente del proyecto, incluyendo vista en planta, perfil longitudinal y perfil transversal.

En el apartado o se encuentra el detalle de presupuesto estimativo, elaborado en el estudio de ingeniería externo, y validado con fecha 21/12/2023 por el jefe Subdepartamento de Obras, Departamento de Puentes.

DEFINICIÓN DE ALCANCE Y OBJETIVOS

Utilizando el diagrama de decisión de la Ilustración 15, se considera que el tipo de proyecto corresponde a un puente, y para el tipo de contrato, si bien el proyecto corresponde a una reposición, no se incluirá en el análisis el puente existente, por lo que se considera como una obra nueva.

En cuanto a los límites se establece:

- **Etapas por considerar:** Las etapas por considerar en el análisis corresponden a los módulos A1-A3 de producto, y el módulo A4 de transporte.
- **Límites físicos:** Se evaluará el proyecto solo en su tramo correspondiente al puente, específicamente la estructura, sin considerar sus obras complementarias.
- **Tipos de datos a utilizar:** se utilizarán datos estimados a partir de los antecedentes de licitación, ya que el proyecto todavía no inicia su etapa de construcción.

²⁷ A la fecha: Julio 2024

- Normativa: Para un proyecto de vialidad corresponde cumplir con las normas que dicta el Manual de Carreteras.
- Criterios de corte: Se determina un criterio de estimación de emisiones del 95% del costo total de materiales que conforman la estructura del puente.

CLASIFICACIÓN Y AGRUPACIÓN DE PARTIDAS

Considerando la estructura del puente para el análisis, se evaluará solo la sección estructura de la partida de presupuesto del proyecto. Esto comprende las secciones de infraestructura y superestructura. De acuerdo con las categorías y subcategorías definidas en la Ilustración 16, se definen el siguiente esquema para el proyecto a evaluar.

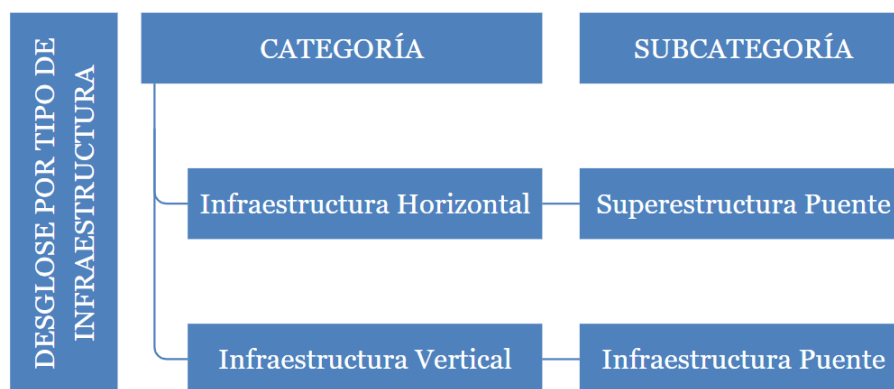


Ilustración 20: Esquema de análisis para la evaluación del proyecto Puente Marquesa.
Fuente: Elaboración propia.

En superestructura se considerarán tablero, vigas longitudinales, vigas transversales y capa de rodadura. En infraestructura se considerarán estribos y pilas.

Para cada subpartida serán consideradas las etapas previamente mencionadas, de modo que el esquema de evaluación del Puente Marquesa queda como se ve en la Ilustración 21.

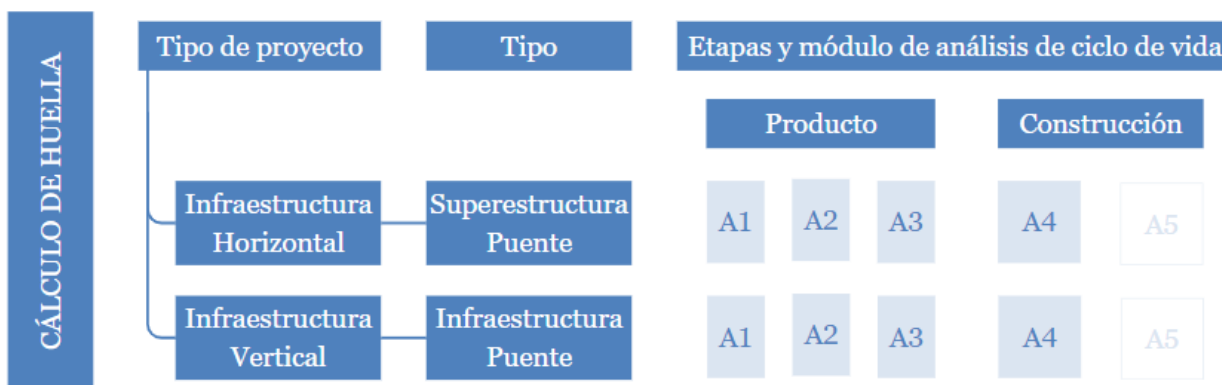


Ilustración 21: Módulos del ciclo de vida evaluados en cada subcategoría del Puente Marquesa.
Fuente: Elaboración propia.

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.

Módulos A1-A3

Para los módulos de producto, se consideran los siguientes datos de emisiones de carbono para distintos materiales, obtenidas de la librería EPD²⁸ sobre Declaraciones Ambientales de Productos. Estos son los únicos materiales de construcción det de producción nacional con DAP disponible, de los que se utilizan para el proyecto.

Tabla 3: Factores de emisión de materiales de construcción de origen en Chile según su DAP.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos EPD (2019, 2022, 2023).

FACTORES DE EMISIÓN A PARTIR DE DAP			
MATERIAL	NOMBRE DAP	NÚMERO REGISTRO DAP	FACTOR EMISIÓN
Acero reciclado para armaduras A630-420H	Barras de refuerzo AZA	S-P-06700	286 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton}\right]$
Acero convencional para armaduras A630-420H	Barra de refuerzo (soldable, no soldable) CSH	S-P-02002	2.550 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton}\right]$
Hormigón G25	Concreto premezclado G025 (10)-20-12-28-B Cementos Bio Bio S.A.	S-P-01722	294 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^3}\right]$

Para el resto de los materiales no se encuentra su respectiva DAP en Chile, por lo que se utiliza la herramienta web EC3: *Calculadora de carbono incorporado en la construcción*²⁹, una de las bases de datos más grandes de factores de emisión de materiales de construcción.

La calculadora se basa en una recopilación de DAP's a nivel global para cada producto o material, de los cuales entrega un rango de datos estadísticos, incluyendo promedio, mínimo alcanzable, y valor conservativo, junto con un diagrama de cajón.

En los criterios de búsqueda se selecciona el producto o material, y especificación geográfica con el fin de acotar la selección de datos para cálculo de estadísticas.

En este caso se priorizará la selección de datos geográficos de la región continental de América, en caso de no encontrar antecedentes suficientes, se recurre a estadísticas globales.

²⁸ Sitio web: <https://www.environdec.com/library>

²⁹ Sitio web: <https://buildingtransparency.org/ec3>

Además, se utilizarán los valores conservadores³⁰ entregados por la herramienta de cálculo, para cerciorar que no exista subestimación de la huella de carbono.

Tabla 4: Factores de emisión de materiales de construcción, estimados mediante calculadora EC3.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos EC.

FACTORES DE EMISIÓN A PARTIR DE CALCULADORA EC3		
MATERIAL	CRITERIO GEOGRÁFICO	FACTOR EMISIÓN CONSERVADOR EC3
Pilotes pre-excavados	Global	657 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^3}\right]$
Concreto asfáltico	América	87,4 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^3}\right]$
Vigas metálicas y arriostramientos	América	1410 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton}\right]$
Pintura elementos metálicos	Global	3,2 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^2}\right]$
Placas de apoyo de neopreno (35 x 35 x 2,5 [cm³])	Global	89,4 $\left[\frac{kgCO_2eq}{unidad}\right]$
Baranda metálica peatonal	Global	49,1 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m}\right]$
Barrera de hormigón tipo F	América	87,9 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m}\right]$

A partir de los diez materiales detallados previamente en las Tabla 3 y Tabla 4, se alcanza un 96% del costo total de los correspondientes a la estructura del puente, considerando precios totales de presupuesto. Con esto datos se finaliza la recopilación de información de factores de emisión.

Las cantidades cubicadas para cada material son obtenidas del presupuesto establecido en los antecedentes de licitación del proyecto, y se encuentran resumidos los necesarios para realizar el análisis de la estructura del puente en la Tabla 5.

³⁰ El valor conservador corresponde al mayor factor de emisión encontrado en la base de datos de DAP's, de acuerdo con el material y región especificados para la búsqueda en la calculadora EC3.

Tabla 5: Cubicaciones materiales a evaluar en estructura Puente Marquesa a partir de presupuesto.
Fuente: Elaboración propia a partir de Presupuesto Estimativo Puente Marquesa.

CUBICACIONES DE MATERIALES PUENTE MARQUESA			
MATERIAL	ÍTEM MC	UNIDAD	CANTIDAD
INFRAESTRUCTURA			
Acero para armaduras A630-420H	503-2	[ton]	132,844
Hormigón G25	501-14	[m³]	1.725
Pilotes pre-excavados	509-1	[m³]	321
SUPERESTRUCTURA			
Concreto asfáltico	411-1	[m³]	85
Hormigón G25	501-14	[m³]	506
Acero para armaduras A630-420H	503-2	[ton]	98,5
Vigas metálicas y arriostramientos	507-1	[ton]	340
Pintura elementos metálicos	511-1	[m²]	3560
Placas de apoyo de neopreno (35 x 35 x 2,5 [cm³])	514-1	[N°]	32
Baranda metálica peatonal	710-2	[m]	325
Barrera de hormigón tipo F	710-3	[m]	325

Módulo A4

Para el transporte de materiales se trabaja con el supuesto que estos son comprados en la capital regional, en centros de distribución locales, considerando que el transporte hasta Coquimbo es efectuado por terceros.

Tabla 6: Datos contemplados para el cálculo de emisiones asociadas a transporte.
Fuente: Elaboración propia.

DATOS PARA ANÁLISIS MÓDULO A4 PUENTE MARQUESA	
Ubicación del proyecto	La Marquesa
Punto de distribución de materiales	Coquimbo
Distancia Coquimbo – La Marquesa	47,5 kilómetros

Para transporte de cargas pesadas se supone el uso de camiones cama baja. De acuerdo con la normativa vigente de peso bruto vehicular, los vehículos de alta productividad no deben exceder las 45 toneladas totales. Con el fin de no subestimar emisiones se tomará en cuenta que las cargas máximas son 30 toneladas de material.

Para transporte en camiones de carga liviana, hasta cinco toneladas, se utilizará el mismo factor de emisión.

Para elementos de menor envergadura, en este caso la pintura, se supone el traslado en un vehículo tipo camioneta pick up o van, considerado vehículo particular.

El factor de emisión de transporte se obtiene de los declarados por el Programa Huella Chile en el informe *Factores de emisión nivel básico 2024*³¹.

Alcance de la huella de carbono	Categoría dentro del alcance	Ítem	Factor de emisión	Unidad Factor de emisión	Fuente de Información
3	Otras emisiones indirectas – Transporte de cargas	Camión diésel rígido promedio	0,1782	kgCO ₂ e/t-km	DEFRA 2023 – Hoja “Freighting goods”
Observación: este factor considera las emisiones asociadas al transporte de cargas en un camión diésel rígido promedio. Se debe multiplicar el factor por los kilómetros recorridos y la masa de la carga transportada en toneladas.					
3	Otras emisiones indirectas – Transporte de personas	Vehículo particular	0,16983	kgCO ₂ e/km	DEFRA 2023 – Hoja “Business travel- land”
Observación: Este factor de emisión se asocia al desplazamiento que se realiza en un vehículo promedio y se debe multiplicar por los kilómetros recorridos entre origen y destino.					

Ilustración 22: Factor de emisión de transporte para camiones (Equipo Huella Chile, 2024).

³¹ Disponible en: <https://huellachile.mma.gob.cl/material-de-apoyo/>

Para la conversión de cubicaciones a peso de material se consideran los siguientes factores para cada caso, obtenidos de especificaciones técnicas de proveedores nacionales:

- Acero: 0,001 [ton/kg]
- Hormigón: 2,4 [ton/m³]
- Placas: 0,045 [kg/cm³]
- Pintura: 0,1 [kg/m²]
- Baranda: 0,022 [ton/m]
- Barrera: 0,63 [ton/m]

En la Tabla 7 se encuentra un cuadro resumen con tipo de transporte, peso de material transportado, y factor de emisión asociado a cada transporte.

Tabla 7: Estimación de viajes para suministro de materiales a obra Puente Marquesa.
Fuente: Elaboración propia.

TRANSPORTE DE MATERIALES PUENTE MARQUESA				
	MATERIAL	TIPO DE TRANSPORTE	PESO DEL MATERIAL [ton]	F.E. TRANSPORTE
INFRA ESTRUCTURA	Hormigón	Camión de carga	4.140,00	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Acero	Camión de carga	132,90	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Pilotes	Camión de carga	770,40	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
SUPERESTRUCTURA	Concreto asfáltico	Camión de carga	87,40	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Hormigón	Camión de carga	1.214,40	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Acero	Camión de carga	98,50	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Vigas	Camión de carga	340,00	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Pintura	Vehículo	0,36	0,1698 $\frac{[kgCO_2eq]}{[km]}$
	Placas de apoyo	Camión de carga	4,41	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Baranda metálica	Camión de carga	7,15	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$
	Barrera de hormigón	Camión de carga	204,75	0,1782 $\frac{[kgCO_2eq]}{[ton-km]}$

6.2 CASO DE ESTUDIO 2: PUENTE RUBENS

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

El proyecto corresponde a una obra de reposición del *Puente Rubens*, ubicado sobre el Río Rubens en la Comuna de Natales, Región de Magallanes y la Antártica Chilena. Considera la construcción del nuevo puente y respectivos accesos, además de obras de saneamiento y drenaje, seguridad vial, iluminación y otras obras asociadas.

El proyecto fue publicado en mercado público para licitación y adjudicado.

En la Ilustración 23 se puede ver el plano de ubicación del proyecto.



Ilustración 23: Plano de ubicación Puente Rubens.
Fuente: Bases de licitación del proyecto.

Los datos generales del proyecto son los siguientes:

*Tabla 8: Datos generales proyecto Puente Rubens.
Fuente: Elaboración propia.*

DATOS GENERALES PROYECTO PUENTE RUBENS	
Ubicación del proyecto	Ruta 9 norte, Km 183.7, Comuna de Puerto Natales, Región de Magallanes y la Antártica Chilena.
Partida evaluada	Estructura puente
Longitud evaluada	105 metros.
Estado actual³² del proyecto	Evaluación de rentabilidad social por parte del MIDESO ³³ .

PLANOS DE PROYECTO Y PRESUPUESTO DE OBRA

En la sección ANEXO, en el apartado o se encuentran disponibles los planos de estructura del puente del proyecto, incluyendo vista en planta, perfil longitudinal y perfil transversal.

En el apartado o se encuentra el detalle de presupuesto estimativo, elaborado en el estudio de ingeniería externo, y validado con fecha 31/07/2023 por el jefe Subdepartamento de Obras, Departamento de Puentes.

DEFINICIÓN DE ALCANCE Y OBJETIVOS

Utilizando el diagrama de decisión de la Ilustración 15, se considera que el tipo de proyecto corresponde a un puente, y para el tipo de contrato, si bien el proyecto corresponde a una reposición, no se incluirá en el análisis el puente existente, por lo que se considera como una obra nueva.

En cuanto a los límites se establece:

- Etapas por considerar: Las etapas por considerar en el análisis corresponden a los módulos A1-A3 de producto, y el módulo A4 de transporte.
- Límites físicos: Se evaluará el proyecto solo en su tramo correspondiente al puente, específicamente la estructura, sin considerar sus obras complementarias.

³² A la fecha: Julio 2024

³³ Se presentó solo una oferta económica y esta superó los umbrales máximos permitidos. Posterior a la evaluación social pasará a revisión de la Contraloría General de la República

- Tipos de datos a utilizar: se utilizarán datos estimados a partir de sus antecedentes de licitación, ya que el proyecto todavía no inicia la etapa de construcción.
- Normativa: Para un proyecto de vialidad corresponde cumplir con las normas que dicta el Manual de Carreteras.
- Criterios de corte: Se determina un criterio de estimación de emisiones del 95% del costo total de materiales que conforman la estructura del puente.

CLASIFICACIÓN Y AGRUPACIÓN DE PARTIDAS

Considerando la estructura del puente para el análisis, se evaluará solo la sección puente de la partida de presupuesto del proyecto. Esto comprende las secciones de infraestructura y superestructura. De acuerdo con las categorías y subcategorías definidas en la Ilustración 16, se definen el siguiente esquema para el proyecto a evaluar.

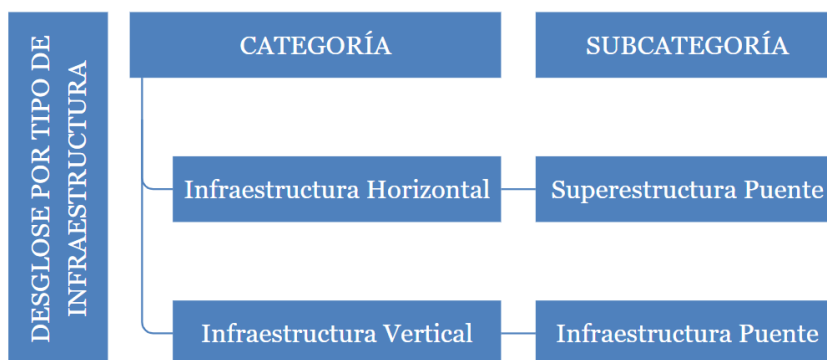


Ilustración 24: Esquema de análisis para la evaluación del proyecto Puente Rubens.
Fuente: Elaboración propia.

En superestructura se considerarán tablero, vigas longitudinales, vigas transversales y capa de rodadura. En infraestructura se considerarán estribos y pilas.

Para cada subpartida serán consideradas las etapas previamente mencionadas, de modo que el esquema de evaluación del Puente Marquesa queda como se ve en la Ilustración 25.

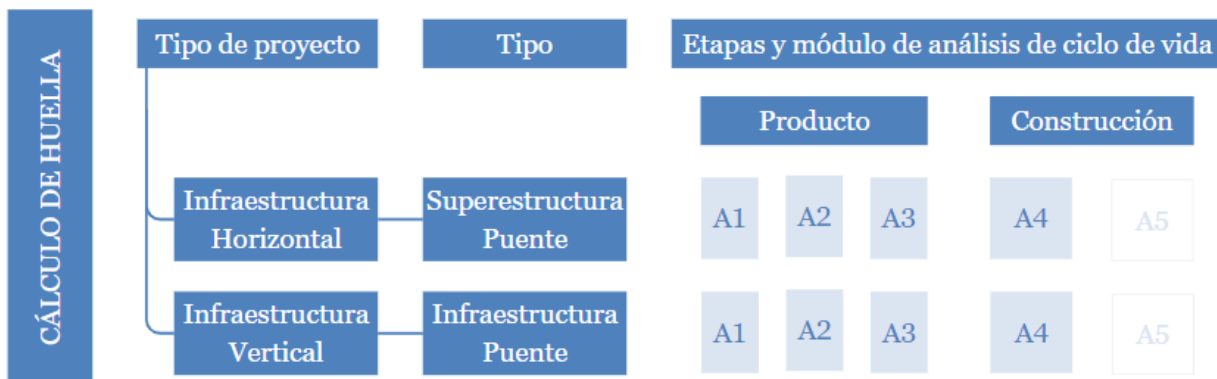


Ilustración 25: Módulos del ciclo de vida evaluados en cada subcategoría del Puente Rubens.
Fuente: Elaboración propia.

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.

Módulos A1-A3

Para los módulos de producto, se consideran los siguientes datos de emisiones de carbono para distintos materiales, obtenidas de la librería EPD³⁴ sobre Declaraciones Ambientales de Productos. Estos son los únicos materiales de construcción de producción nacional con DAP disponible, de los que se utilizan para el proyecto.

Tabla 9: Factores de emisión de materiales de construcción de origen en Chile según su DAP.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos EDP (2019, 2022, 2023).

FACTORES DE EMISIÓN A PARTIR DE DAP			
MATERIAL	NOMBRE DAP	NÚMERO REGISTRO DAP	FACTOR EMISIÓN
Acero reciclado para armaduras A630-420H	Barras de refuerzo AZA	S-P-06700	286 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton}\right]$
Acero convencional para armaduras A630-420H	Barra de refuerzo (soldable, no soldable) CSH	S-P-02002	2.550 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton}\right]$
Hormigón G25	Concreto premezclado G025 (10)-20-12-28-B Cementos Bio Bio S.A.	S-P-01722	294 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^3}\right]$

Para el resto de los materiales no se encuentra su respectiva DAP en Chile, por lo que se utiliza la herramienta web EC3: *Calculadora de carbono incorporado en la construcción*³⁵, una de las bases de datos más grandes de factores de emisión de materiales de construcción.

La calculadora se basa en una recopilación de DAP's a nivel global para cada producto o material, de los cuales entrega un rango de datos estadísticos, incluyendo promedio, mínimo alcanzable, y valor conservativo, junto con un diagrama de cajón.

En los criterios de búsqueda se selecciona el producto o material, y especificación geográfica con el fin de acotar la selección de datos para cálculo de estadísticas.

En este caso se priorizará la selección de datos geográficos de la región continental de América, en caso de no encontrar antecedentes suficientes, se recurre a estadísticas globales.

³⁴ Sitio web: <https://www.environdec.com/library>

³⁵ Sitio web: <https://buildingtransparency.org/ec3>

Además, se utilizarán los valores conservadores³⁶ entregados por la herramienta de cálculo, para cerciorar que no exista subestimación de la huella de carbono.

Tabla 10: Factores de emisión de materiales de construcción, estimados mediante calculadora EC3.
Fuente: Elaboración propia a partir de datos EC3.

FACTORES DE EMISIÓN A PARTIR DE CALCULADORA EC3		
MATERIAL	CRITERIO GEOGRÁFICO	FACTOR EMISIÓN CONSERVADOR EC3
Pilotes pre-excavados	Global	657 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^3}\right]$
Carpeta de hormigón	América	272 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^3}\right]$
Vigas metálicas y arriostramientos	América	1410 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton}\right]$
Pintura elementos metálicos	Global	3,2 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m^2}\right]$
Placas de apoyo de neopreno (45 x 45 x 13 [cm³])	Global	170,8 $\left[\frac{kgCO_2eq}{unidad}\right]$
Placas de apoyo de neopreno (40 x 40 x 15,2 [cm³])	Global	157,8 $\left[\frac{kgCO_2eq}{unidad}\right]$
Baranda metálica peatonal	Global	49,1 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m}\right]$
Barrera de hormigón tipo F	América	87,9 $\left[\frac{kgCO_2eq}{m}\right]$

A partir de los once materiales detallados previamente en la Tabla 9 y Tabla 10, se alcanza un 95% del costo total de los correspondientes a la estructura del puente, considerando precios totales de presupuesto- Con estos datos se finaliza la recopilación de información de factores de emisión.

Las cantidades cubicadas para cada material son obtenidas del presupuesto establecido en los antecedentes de licitación del proyecto, y se encuentran resumidos los necesarios para realizar el análisis de la estructura del puente en la Tabla 11.

³⁶ El valor conservador corresponde al mayor factor de emisión encontrado en la base de datos de DAP's, de acuerdo con el material y región especificados para la búsqueda en la calculadora EC3.

Tabla 11: Cubicaciones materiales a evaluar en estructura Puente Rubens a partir de presupuesto.
Fuente: Elaboración propia a partir de Presupuesto Estimativo Puente Rubens.

CUBICACIONES DE MATERIALES PUENTE RUBENS			
MATERIAL	ÍTEM MC	UNIDAD	CANTIDAD
INFRAESTRUCTURA			
Hormigón G25	501-14	[m ³]	520
Acero para armaduras A630-420H	503-2	[ton]	94,9
Pilotes pre-excavados	509-1	[m ³]	615
SUPERESTRUCTURA			
Carpeta de hormigón	411-2	[m ³]	50
Hormigón G25	501-14	[m ³]	295
Acero para armaduras A630-420H	503-2	[ton]	60,5
Vigas metálicas y arriostramientos	507-1	[ton]	171
Pintura elementos metálicos	511-1	[m ²]	2.340
Placas de apoyo de neopreno (45 x 45 x 13 [cm³])	514-1	[N°]	16
Placas de apoyo de neopreno (40 x 40 x 15,2 [cm³])	514-1	[N°]	8
Baranda metálica peatonal	710-2	[m]	210
Barrera de hormigón tipo F	710-3	[m]	210

Módulo A4

Para el de transporte de materiales, se trabaja con el supuesto que estos son comprados en la capital regional, en centros de distribución locales, considerando que el transporte hasta Punta Arenas es efectuado por terceros.

Tabla 12: Datos contemplados para el cálculo de emisiones asociadas a transporte en Puente Rubens.
Fuente: Elaboración propia.

DATOS PARA ANÁLISIS MÓDULO A4 PUENTE RUBENS	
Ubicación del proyecto	Río Rubens
Punto de distribución de materiales	Punta Arenas
Distancia P.Arenas – Rubens	185 kilómetros

Para transporte de cargas pesadas se supone el uso de camiones cama baja. De acuerdo con la normativa vigente de peso bruto vehicular, los vehículos de alta productividad no deben exceder las 45 toneladas totales. Con el fin de no subestimar emisiones se tomará en cuenta que las cargas máximas son 30 toneladas de material.

Para transporte en camiones de carga liviana, hasta cinco toneladas, se utilizará el mismo factor de emisión.

Para elementos de menor envergadura, en este caso la pintura, se supone el traslado en un vehículo tipo camioneta pick up o van, considerado vehículo particular.

El factor de emisión de transporte se obtiene de los declarados por el Programa Huella Chile en el informe *Factores de emisión nivel básico 2024*.

Alcance de la huella de carbono	Categoría dentro del alcance	Ítem	Factor de emisión	Unidad Factor de emisión	Fuente de Información
3	Otras emisiones indirectas – Transporte de cargas	Camión diésel rígido promedio	0,1782	kgCO ₂ e/t-km	DEFRA 2023 – Hoja “Freighting goods”
Observación: este factor considera las emisiones asociadas al transporte de cargas en un camión diésel rígido promedio. Se debe multiplicar el factor por los kilómetros recorridos y la masa de la carga transportada en toneladas.					
3	Otras emisiones indirectas – Transporte de personas	Vehículo particular	0,16983	kgCO ₂ e/km	DEFRA 2023 – Hoja “Business travel- land”
Observación: Este factor de emisión se asocia al desplazamiento que se realiza en un vehículo promedio y se debe multiplicar por los kilómetros recorridos entre origen y destino.					

Ilustración 26: Factor de emisión de transporte para camiones (Equipo Huella Chile, 2024).

Para la conversión de cubicaciones a peso de material se consideran los siguientes factores para cada caso, obtenidos de especificaciones técnicas de proveedores:

- Acero: 0,001 [ton/kg]
- Hormigón: 2,4 [ton/m³]
- Placas: 0,045 [kg/cm³]
- Pintura: 0,1 [kg/m²]
- Baranda: 0,022 [ton/m]
- Barrera: 0,63 [ton/m]

En la Tabla 13 se encuentra un cuadro resumen con tipo de transporte, peso de material trasportado, y factor de emisión asociado.

Tabla 13: Estimación de viajes para suministro de materiales a obra Puente Rubens.
Fuente: Elaboración propia.

TRANSPORTE DE MATERIALES PUENTE RUBENS				
	MATERIAL	TIPO DE TRANSPORTE	PESO DE MATERIAL [ton]	F.E. TRANSPORTE
INFRA ESTRUCTURA	Hormigón	Camión de carga	1.248,00	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Acero	Camión de carga	94,88	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Pilotes	Camión de carga	1.476,00	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
SUPERESTRUCTURA	Carpeta de hormigón	Camión de carga	209,76	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Hormigón	Camión de carga	708,00	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Acero	Camión de carga	60,50	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Vigas	Camión de carga	171,00	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Pintura	Vehículo	0,23	0,1698 $\left[\frac{kgCO_2eq}{km} \right]$
	Placas de apoyo	Camión de carga	3,30	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Baranda metálica	Camión de carga	4,72	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Barrera de hormigón	Camión de carga	132,0	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$

7 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Para el análisis de huella de carbono se consideran cuatro casos, dos por cada proyecto de puente, donde para el primero de los casos se estudia la aplicación del criterio de utilización de acero reciclado en un 80% del acero de refuerzo, y para el segundo de los casos una situación hipotética donde solo se aplique acero convencional.

Para el acero reciclado se supone el uso de barras de refuerzo producidas por AZA, y para el acero convencional el uso de barras de refuerzo producidas por CAP. Ambos productores de acero nacionales poseen sus DAP correspondientes.

Tabla 14: Casos de estudio para análisis de huella de carbono.

Fuente: Elaboración propia.

CASOS DE ESTUDIO PROYECTO				
CASO	PROYECTO	ALTERNATIVA	ACERO RECICLADO	ACERO CONVENCIONAL
1.a.	Marquesa	Sustentable	80%	20%
1.b.	Marquesa	Tradicional	0%	100%
2.a.	Rubens	Sustentable	80%	20%
2.b.	Rubens	Tradicional	0%	100%

Las cubicaciones de acero de refuerzo A630-420H para cada uno de los casos presentados quedarían como se expone en la Tabla 15.

Tabla 15: Cubicaciones acero de refuerzo según proveedor para cada caso.

Fuente: Elaboración propia.

CUBICACIONES ACERO DE REFUERZO SEGÚN PROVEEDOR				
CASO	INFRAESTRUCTURA		SUPERESTRUCTURA	
	ACERO RECICALDO [ton]	ACERO CONVENCIONAL [ton]	ACERO RECICLADO [ton]	ACERO CONVENCIONAL [ton]
1.a.	106,3	26,6	78,8	19,7
1.b.	0	132,9	0	98,5
2.a.	75,9	19,0	48,4	12,1
2.b.	0	94,9	0	60,5

7.1 PUENTE MARQUESA: RESULTADOS BRUTOS

CASO 1.a.: A partir de los valores definidos de factores de emisión y cubicaciones se obtienen las emisiones en kgCO₂eq y participación en módulos A1-A3 de cada material.

Tabla 16: Emisiones de CO₂eq módulos A1-A3 caso 1.a.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES MÓDULOS A1-A3 CASO 1.a.		
MATERIAL	EMISIONES [kgCO₂eq]	PARTICIPACIÓN
INFRAESTRUCTURA		
Hormigón G25	507.150	32,03%
Acero recic. para armaduras	30.408	1,92%
Acero conv. para armaduras	67.779	4,28%
Pilotes pre-excavados	210.897	13,32%
TOTAL INFRAESTRUCTURA	816.234	51,55%
SUPERSTRUCTURA		
Carpeta de hormigón	7.429	0,47%
Hormigón G25	148.764	9,40%
Acero recic. para armaduras	22.537	1,42%
Acero conv. para armaduras	50.235	3,17%
Vigas metálicas y arriostramientos	479.400	30,28%
Pintura elementos metálicos	11.392	0,72%
Placas de apoyo de neopreno	2.861	0,18%
Baranda metálica peatonal	15.958	1,01%
Barrera de hormigón tipo F	28.568	1,80%
TOTAL SUPERESTRUCTURA	767.143	48,45%

A partir de los valores definidos de factores de emisión de transporte, cubicaciones, distancia y cantidad de viajes se obtienen las emisiones en CO₂eq de cada material.

Tabla 17: Emisiones de CO₂eq módulo A4 caso 1.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES MÓDULO A4 CASO 1.		
MATERIAL	EMISIONES [kgCO₂eq]	PARTICIPACIÓN
INFRAESTRUCTURA		
Hormigón G25	35.043	59,14%
Acero para armaduras	1.125	1,90%
Pilotes pre-excavados	6.521	11,00%
TOTAL INFRAESTRUCTURA	42.689	72,04%
SUPERESTRUCTURA		
Carpeta de hormigón	740	1,25%
Hormigón G25	10.279	17,35%
Acero para armaduras	834	1,41%
Vigas metálicas y arriostramientos	2.878	4,86%
Pintura elementos metálicos	8	0,01%
Placas de apoyo de neopreno	37	0,06%
Baranda metálica peatonal	61	0,10%
Barrera de hormigón tipo F	1.733	2,92%
TOTAL SUPERESTRUCTURA	16.570	27,96%

CASO 1.b.: A partir de los valores definidos de factores de emisión y cubicaciones se obtienen las emisiones en kgCO₂eq y participación en módulos A1-A3 de cada material.

Tabla 18: Emisiones de CO₂eq módulos A1-A3 caso 1.b.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES MÓDULOS A1-A3 CASO 1.b.		
MATERIAL	EMISIONES [kgCO₂eq]	PARTICIPACIÓN
INFRAESTRUCTURA		
Hormigón G25	507.15	25,33%
Acero conv. para armaduras	338.895	16,92%
Pilotes pre-excavados	210.897	10,53%
TOTAL INFRAESTRUCTURA	1.056.942	52,78%
SUPERESTRUCTURA		
Carpeta de hormigón	7.429	0,37%
Hormigón G25	148.764	7,43%
Acero conv. para armaduras	251.175	12,54%
Vigas metálicas y arriostramientos	479.4	23,94%
Pintura elementos metálicos	11.392	0,57%
Placas de apoyo de neopreno	2.8608	0,14%
Baranda metálica peatonal	15.9575	0,80%
Barrera de hormigón tipo F	28.5675	1,43%
TOTAL SUPERESTRUCTURA	945.546	47,22%

Las emisiones asociadas al transporte de materiales a la obra para el caso de alternativa tradicional son las mismas que para la alternativa sustentable, ya que independiente de su origen, la cantidad de material trasladada es la misma.

7.2 PUENTE MARQUESA: RESULTADOS PROCESADOS

Datos agregados por módulo y subcategoría.

Tabla 19: Datos agregados de emisiones Puente Marquesa caso 1.a.
Fuente: Elaboración propia.

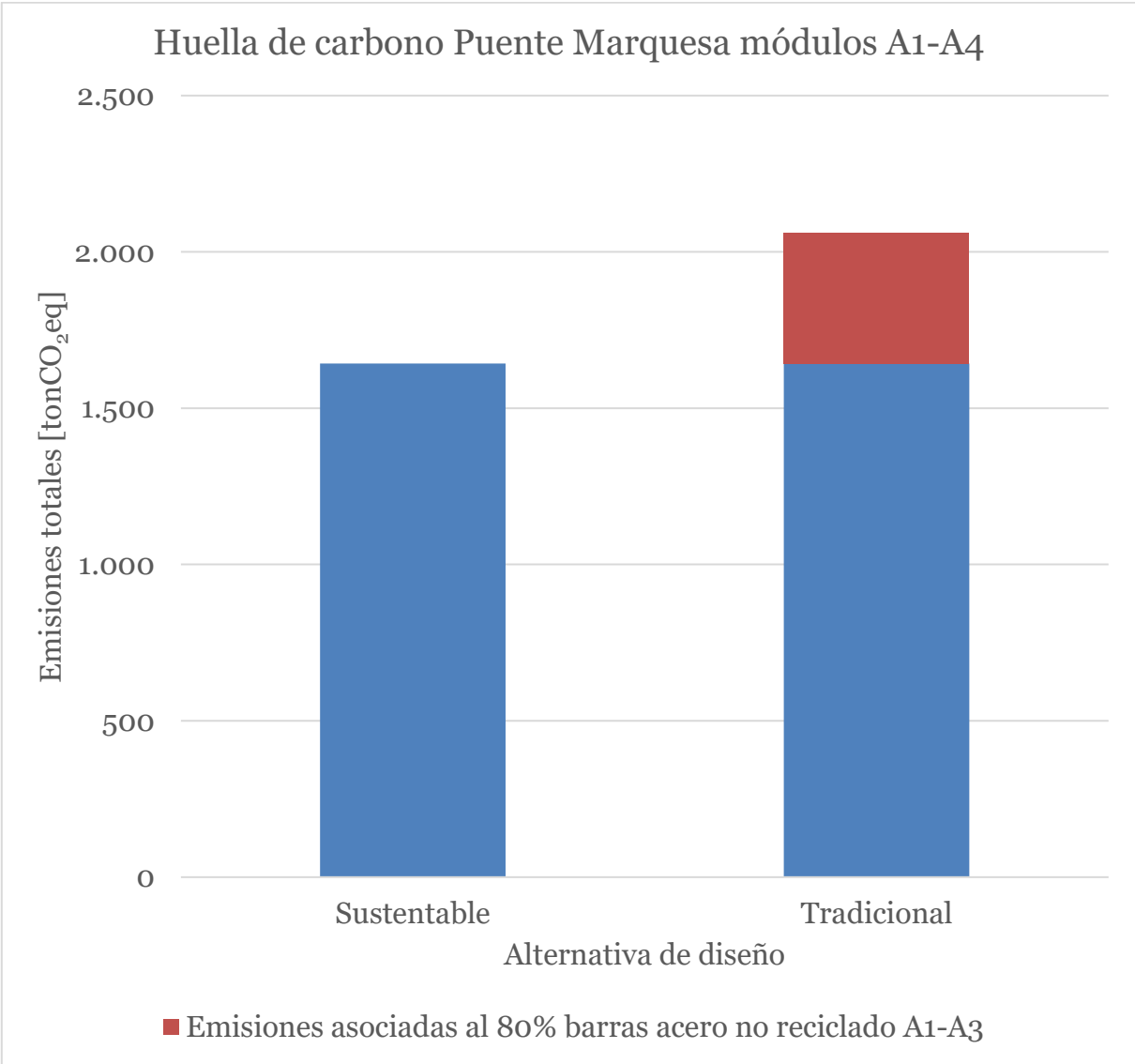
EMISIONES DE CARBONO PUENTE MARQUESA CASO 1.a. [tonCO ₂ eq]				
MÓDULO DEL CICLO DE VIDA	SUBCATEGORÍA		TOTAL	PART. APROX.
	INFRA ESTRUCTURA	SUPER ESTRUCTURA		
A1-A3	816	767	1.583	96%
A4	43	17	59	4%
TOTAL	859	784	EMISIONES TOTALES	
PARTICIPACIÓN APROXIMADA	52%	48%	1.643	

Tabla 20: Datos agregados de emisiones Puente Marquesa caso 1.b.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES DE CARBONO PUENTE MARQUESA CASO 1.b. [tonCO ₂ eq]				
MÓDULO DEL CICLO DE VIDA	SUBCATEGORÍA		TOTAL	PART. APROX.
	INFRA ESTRUCTURA	SUPER ESTRUCTURA		
A1-A3	1057	946	2.002	97%
A4	43	17	59	3%
TOTAL	1.100	962	EMISIONES TOTALES	
PARTICIPACIÓN APROXIMADA	53%	47%	2.062	

Comparación HDC total alternativa de diseño sustentable y tradicional.

Diagrama de columnas donde se presentan las emisiones totales en toneladas de CO₂eq para el Puente Rubens. La alternativa tradicional muestra en rojo la diferencia de emisiones con respecto a la sustentable, correspondiente a las barras de refuerzo (módulos A1-A3), en caso de no aplicar criterio de 80% de acero reciclado.



*Ilustración 27: Huella de carbono según alternativa de diseño en Puente Marquesa
Fuente: Elaboración propia.*

Comparación HDC porcentual diferenciada según materialidad.

Diagrama de columnas 100% apiladas donde se presenta la diferenciación de participación según los principales materiales integrantes de cada componente de la estructura.

Hormigón:

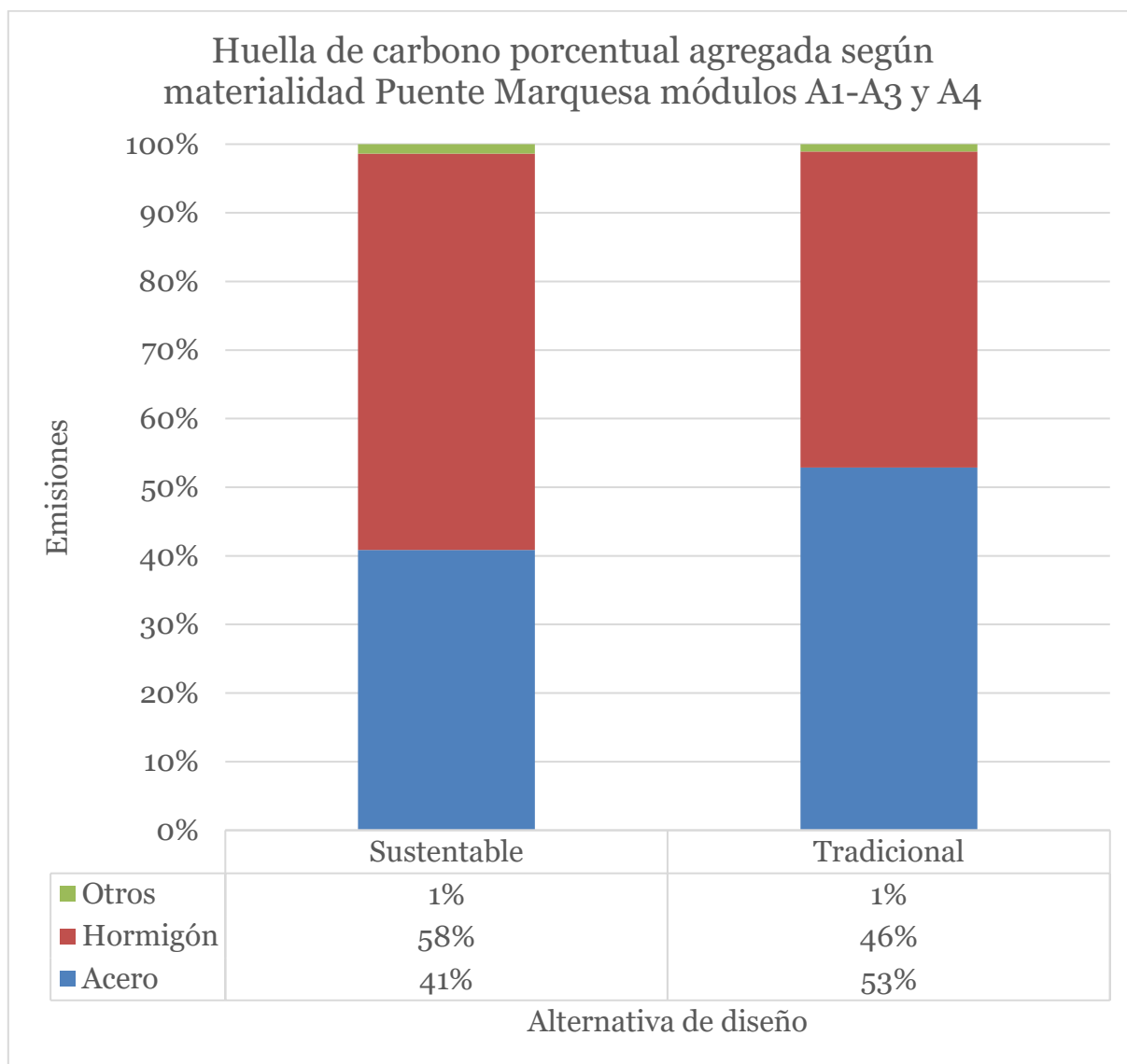
- Hormigón G25
- Pilotes pre-excavados
- Barreras tipo F

Acero:

- Acero para armaduras
- Vigas metálicas y arriostramientos
- Barandas peatonales

Otros:

- Concreto asfáltico
- Pintura
- Placas de apoyo



*Ilustración 28: Participación materialidad en HDC según alternativa de diseño en Puente Marquesa
Fuente: Elaboración propia.*

Comparación HDC porcentual diferenciada según aplicaciones de acero.

Diagrama de columnas 100% apiladas donde se presenta la diferenciación de contribución de acero según su origen en la HDC total asociada a elementos constituidos de acero en el proyecto.

Las categorías reciclado y convencional representan las barras de refuerzo de acero según su origen, de acuerdo con las exigencias de cada tipo de diseño. La categoría otros aceros corresponde al aporte en HDC de las vigas metálicas y arriostramientos, y barandas metálicas peatonales.

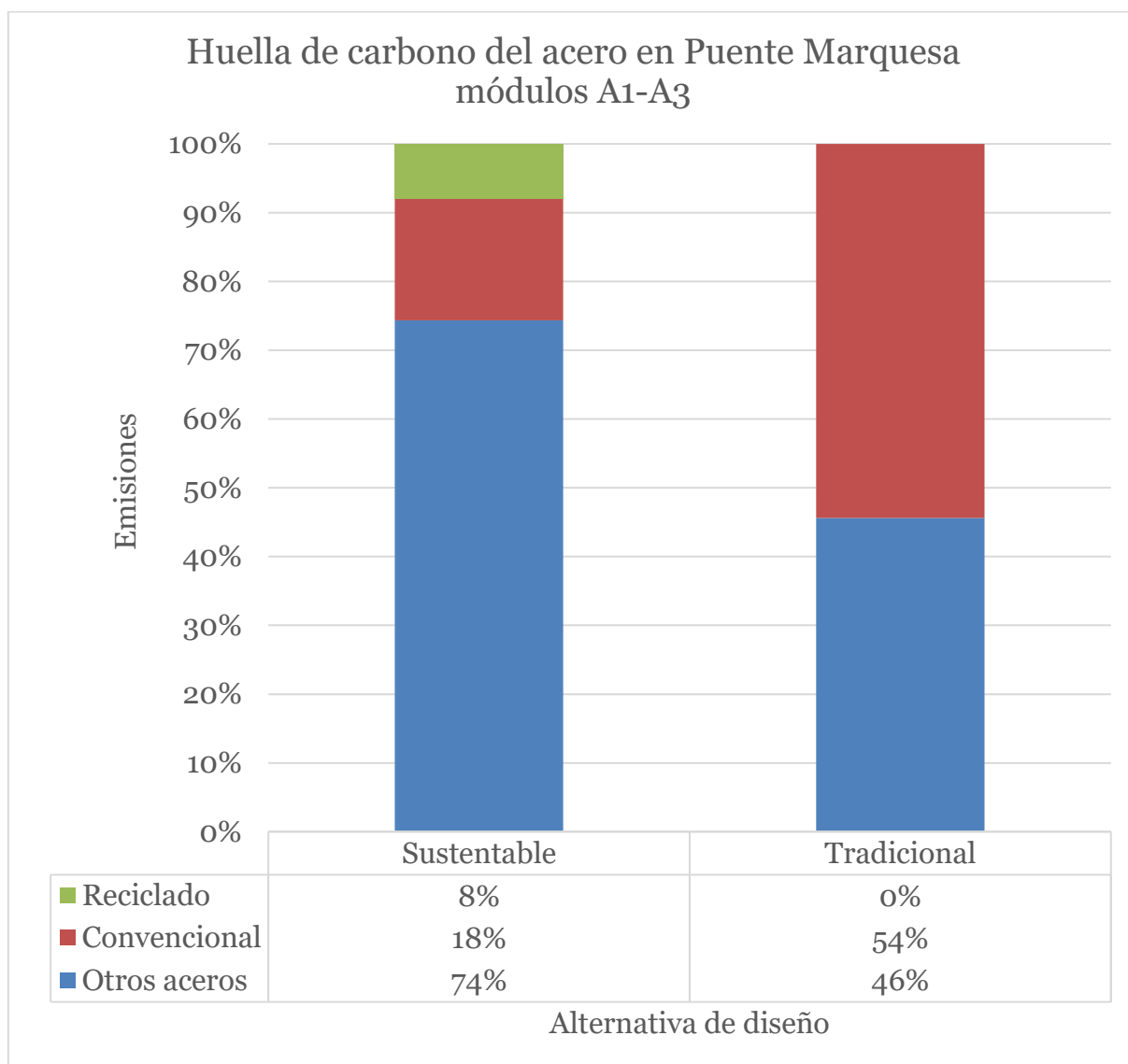


Ilustración 29: Participación acero según origen en HDC para ambas alternativas de diseño en Puente Marquesa.
Fuente Elaboración propia.

Comparación HDC por barras de refuerzo según alternativa de diseño.

Diagrama de columnas donde se presenta las emisiones totales en toneladas de CO₂eq aportadas por las barras de acero de refuerzo en la estructura del proyecto según proveedor, considerando módulos A1-A3 del ciclo de vida.

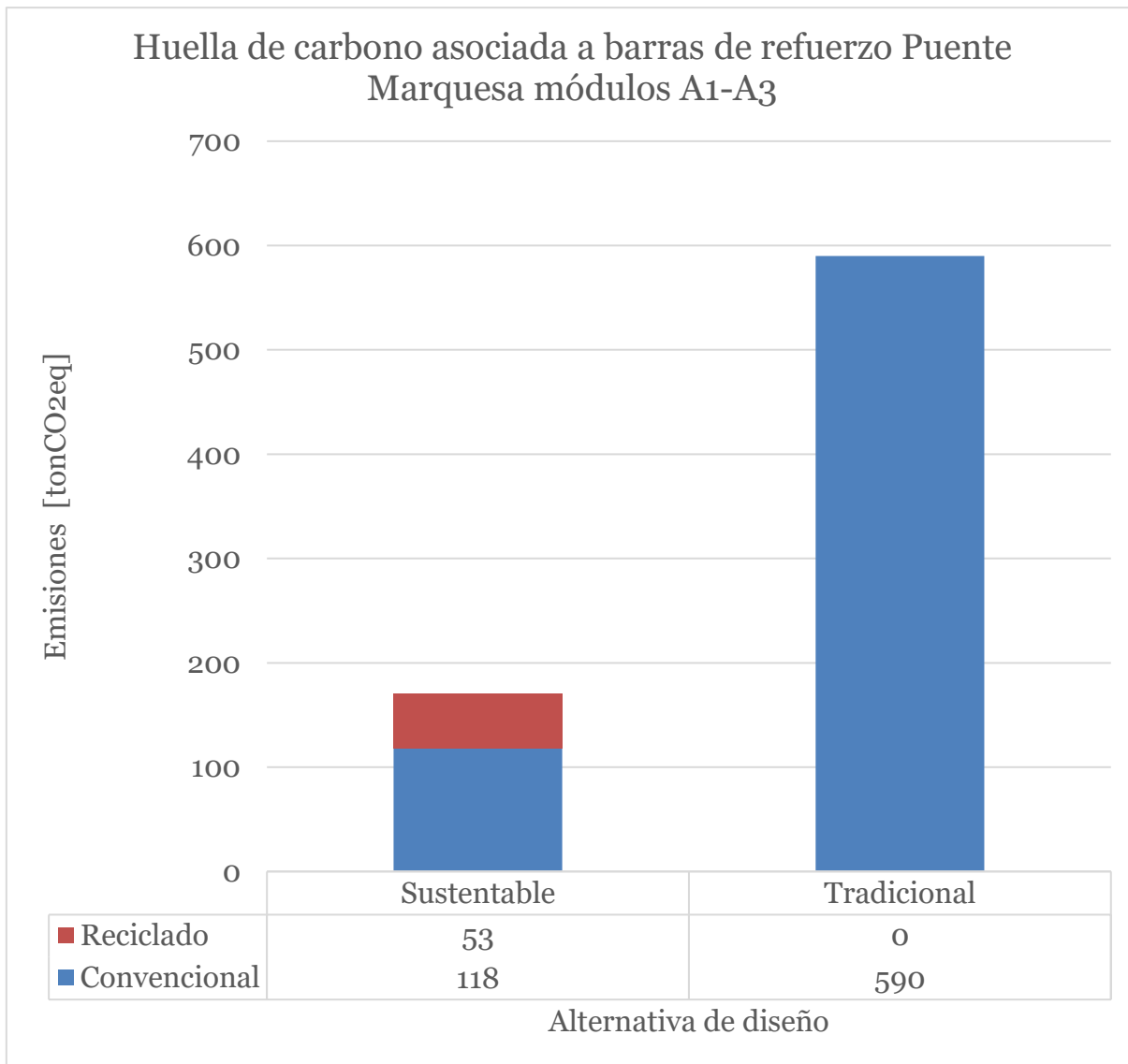


Ilustración 30: Huella de carbono agregada según origen de acero para armaduras en Puente Marquesa.
Fuente: Elaboración propia.

7.3 PUENTE RUBENS: RESULTADOS BRUTOS

CASO 2.a.: A partir de los valores definidos de factores de emisión y cubicaciones se obtienen las emisiones en kgCO₂eq y participación en módulos A1-A3 de cada material.

*Tabla 21: Emisiones de CO₂eq módulos A1-A3 caso 2.a.
Fuente: Elaboración propia.*

EMISIONES MÓDULOS A1-A3 CASO 2.a.		
MATERIAL	EMISIONES [kgCO₂eq]	PARTICIPACIÓN
INFRAESTRUCTURA		
Hormigón G25	152.880	14,64%
Acero recic. para armaduras	21.709	2,08%
Acero conv. para armaduras	48.391	4,63%
Pilotes pre-excavados	404.055	38,70%
TOTAL INFRAESTRUCTURA	627.035	60,05%
SUPERESTRUCTURA		
Carpeta de hormigón	4.370	0,42%
Hormigón G25	86.730	8,31%
Acero recic. para armaduras	13.842	1,33%
Acero conv. para armaduras	30.855	2,95%
Vigas metálicas y arriostramientos	241.110	23,09%
Pintura elementos metálicos	7.488	0,72%
Placas de apoyo de neopreno	3.995	0,38%
Baranda metálica peatonal	10.311	0,99%
Barrera de hormigón tipo F	18.459	1,77%
TOTAL SUPERESTRUCTURA	417.161	39,95%

A partir de los valores definidos de factores de emisión de transporte, cubicaciones, distancia y cantidad de viajes se obtienen las emisiones en CO₂eq de cada material.

Tabla 22: Emisiones de CO₂eq módulo A4 caso 2.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES MÓDULO A4 CASO 2.		
MATERIAL	EMISIONES [kgCO₂eq]	PARTICIPACIÓN
INFRAESTRUCTURA		
Hormigón G25	41.143	30,37%
Acero para armaduras	3.128	2,31%
Pilotes pre-excavados	48.659	35,92%
TOTAL INFRAESTRUCTURA	92.930	68,60%
SUPERESTRUCTURA		
Carpeta de hormigón	6915	5,10%
Hormigón G25	23341	17,23%
Acero para armaduras	1995	1,47%
Vigas metálicas y arriostramientos	5637	4,16%
Pintura elementos metálicos	31	0,02%
Placas de apoyo de neopreno	109	0,08%
Baranda metálica peatonal	152	0,11%
Barrera de hormigón tipo F	4.362	3,22%
TOTAL SUPERESTRUCTURA	42.542	31,40%

CASO 2.b.: A partir de los valores definidos de factores de emisión y cubicaciones se obtienen las emisiones en kgCO₂eq y participación en módulos A1-A3 de cada material.

*Tabla 23: Emisiones de CO₂eq módulos A1-A3 caso 2.b.
Fuente: Elaboración propia.*

EMISIONES MÓDULOS A1-A3 CASO 2.b.		
MATERIAL	EMISIONES [kgCO₂eq]	PARTICIPACIÓN
INFRAESTRUCTURA		
Hormigón G25	152.880	11,53%
Acero conv. para armaduras	241.954	18,25%
Pilotes pre-excavados	404.055	30,48%
TOTAL INFRAESTRUCTURA	798.889	60,26%
SUPERESTRUCTURA		
Carpeta de hormigón	4.370	0,33%
Hormigón G25	86.730	6,54%
Acero conv. para armaduras	154.275	11,64%
Vigas metálicas y arriostramientos	241.110	18,19%
Pintura elementos metálicos	7.488	0,56%
Placas de apoyo de neopreno	3.995	0,31%
Baranda metálica peatonal	10.311	0,78%
Barrera de hormigón tipo F	18459	1,39%
TOTAL SUPERESTRUCTURA	526.738	39,74%

Las emisiones asociadas al transporte de materiales a la obra para el caso de alternativa tradicional son las mismas que para la alternativa sustentable, ya que independiente de su origen, la cantidad de material trasladada es la misma.

7.4 PUENTE RUBENS: RESULTADOS PROCESADOS

Datos agregados por módulo y subcategoría.

Tabla 24: Datos agregados de emisiones Puente Rubens caso 2.a.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES DE CARBONO PUENTE RUBENS CASO 1.a. [tonCO ₂ eq]				
MÓDULO DEL CICLO DE VIDA	SUBCATEGORÍA		TOTAL	PART. APROX.
	INFRA ESTRUCTURA	SUPER ESTRUCTURA		
A1-A3	627	417	1.044	89%
A4	93	43	135	11%
TOTAL	720	460	EMISIONES TOTALES	
PARTICIPACIÓN APROXIMADA	61%	39%	1.180	

Tabla 25: Datos agregados de emisiones Puente Rubens caso 2.b.
Fuente: Elaboración propia.

EMISIONES DE CARBONO PUENTE RUBENS CASO 1.b. [tonCO ₂ eq]				
MÓDULO DEL CICLO DE VIDA	SUBCATEGORÍA		TOTAL	PART. APROX.
	INFRA ESTRUCTURA	SUPER ESTRUCTURA		
A1-A3	799	527	1.326	91%
A4	93	43	135	9%
TOTAL	892	569	EMISIONES TOTALES	
PARTICIPACIÓN APROXIMADA	61%	39%	1.461	

Comparación HDC total alternativa de diseño sustentable y tradicional.

Diagrama de columnas donde se presentan las emisiones totales en toneladas de CO₂eq para el Puente Rubens. La alternativa tradicional muestra en rojo la diferencia de emisiones con respecto a la sustentable, correspondiente a las barras de refuerzo (módulos A1-A3), en caso de no aplicar criterio de 80% de acero reciclado.

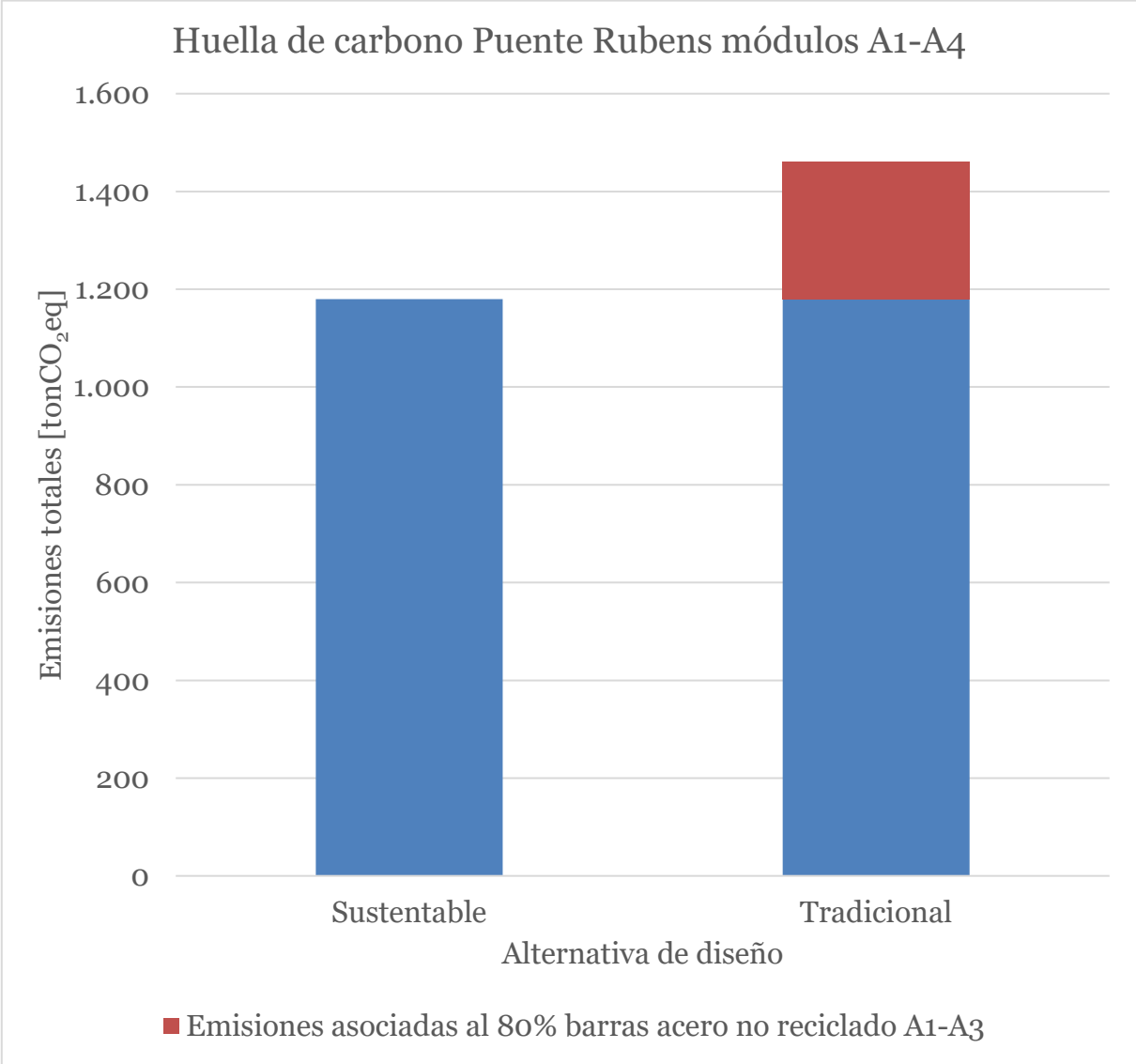


Ilustración 31: Huella de carbono según alternativa de diseño en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.

Comparación HDC porcentual diferenciada según materialidad.

Diagrama de columnas 100% apiladas donde se presenta la diferenciación de participación según los principales materiales integrantes de cada componente de la estructura.

Hormigón:

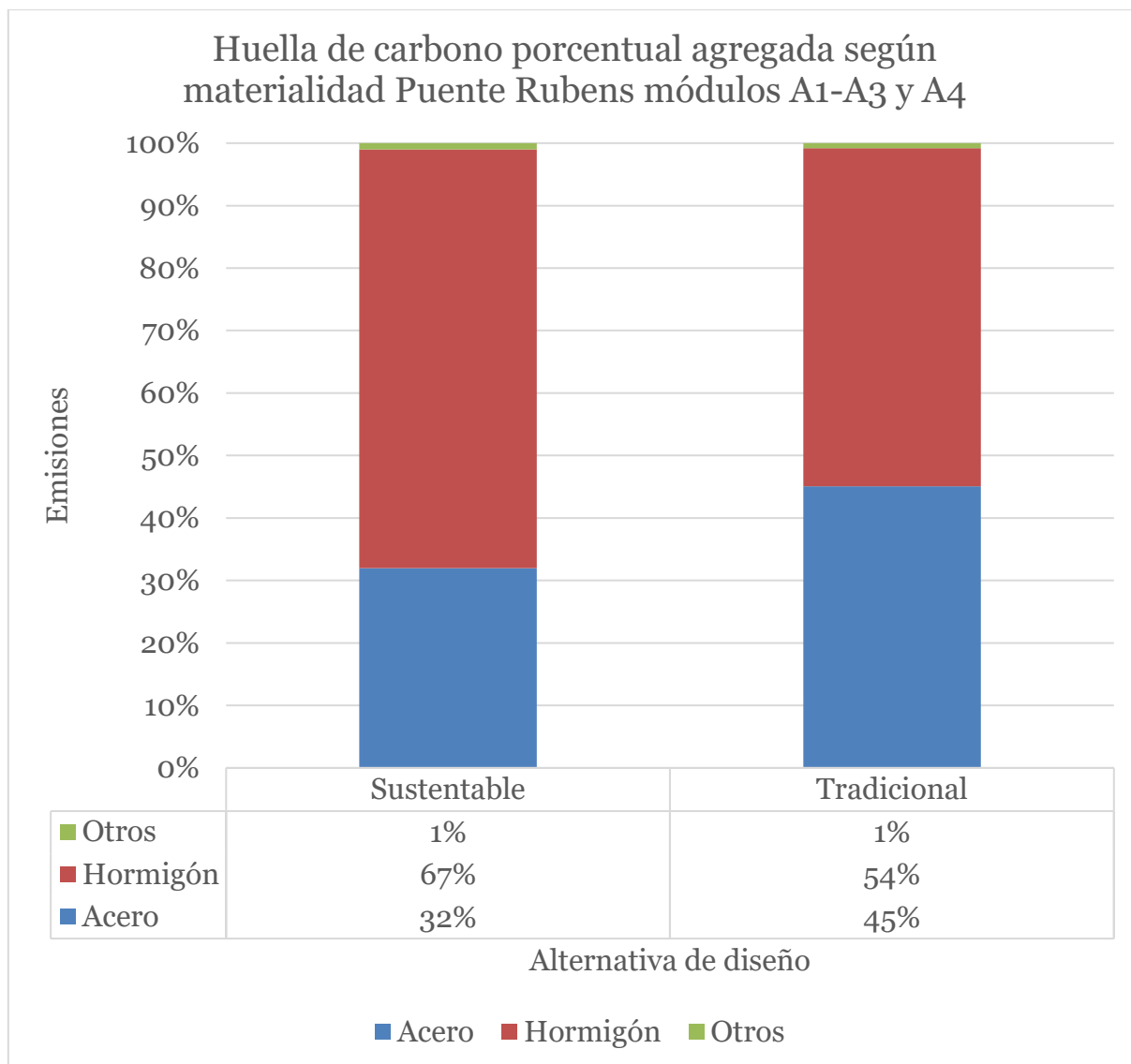
- Hormigón G25
- Pilotes pre-excavados
- Carpeta de hormigón
- Barreras tipo F

Acero:

- Acero para armaduras
- Vigas metálicas y arriostramientos
- Barandas peatonales

Otros:

- Pintura
- Placas de apoyo



*Ilustración 32: Participación materialidad en HDC según alternativa de diseño en Puente Rubens.
Fuente: Elaboración propia.*

Comparación HDC porcentual diferenciada según aplicaciones de acero.

Diagrama de columnas 100% apiladas donde se presenta la diferenciación de contribución de acero según su origen en la HDC total asociada a elementos constituidos de acero en el proyecto.

Las categorías reciclado y convencional representan las barras de refuerzo de acero según su origen, de acuerdo con las exigencias de cada tipo de diseño. La categoría otros aceros corresponde al aporte en HDC de las vigas metálicas y arriostramientos, y barandas metálicas peatonales.

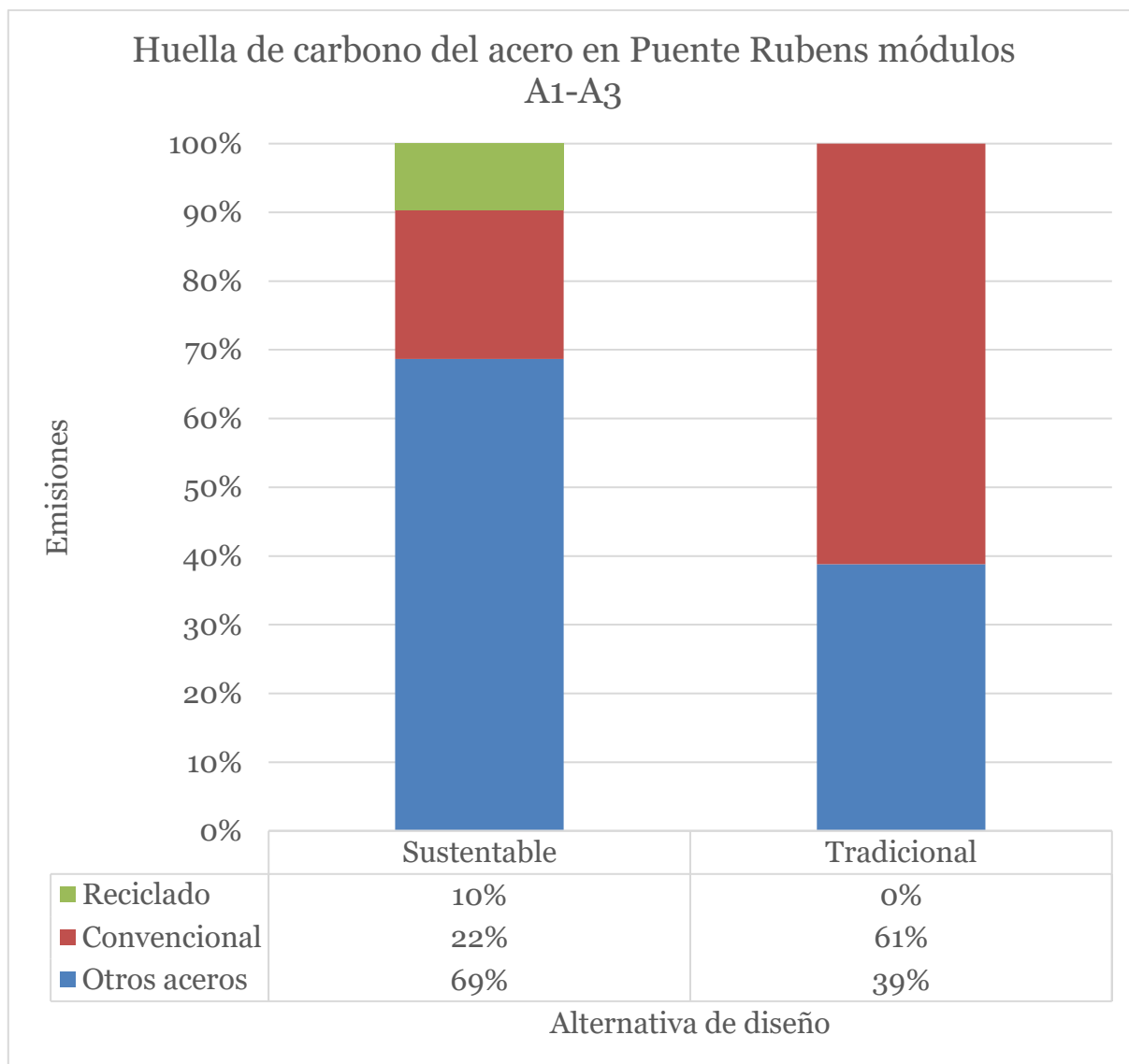


Ilustración 33: Participación acero según origen en HDC para ambas alternativas de diseño en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.

Comparación HDC por barras de refuerzo según alternativa de diseño.

Diagrama de columnas donde se presenta las emisiones totales en toneladas de CO₂eq aportadas por las barras de acero de refuerzo en la estructura del proyecto según proveedor, considerando módulos A1-A3 del ciclo de vida.

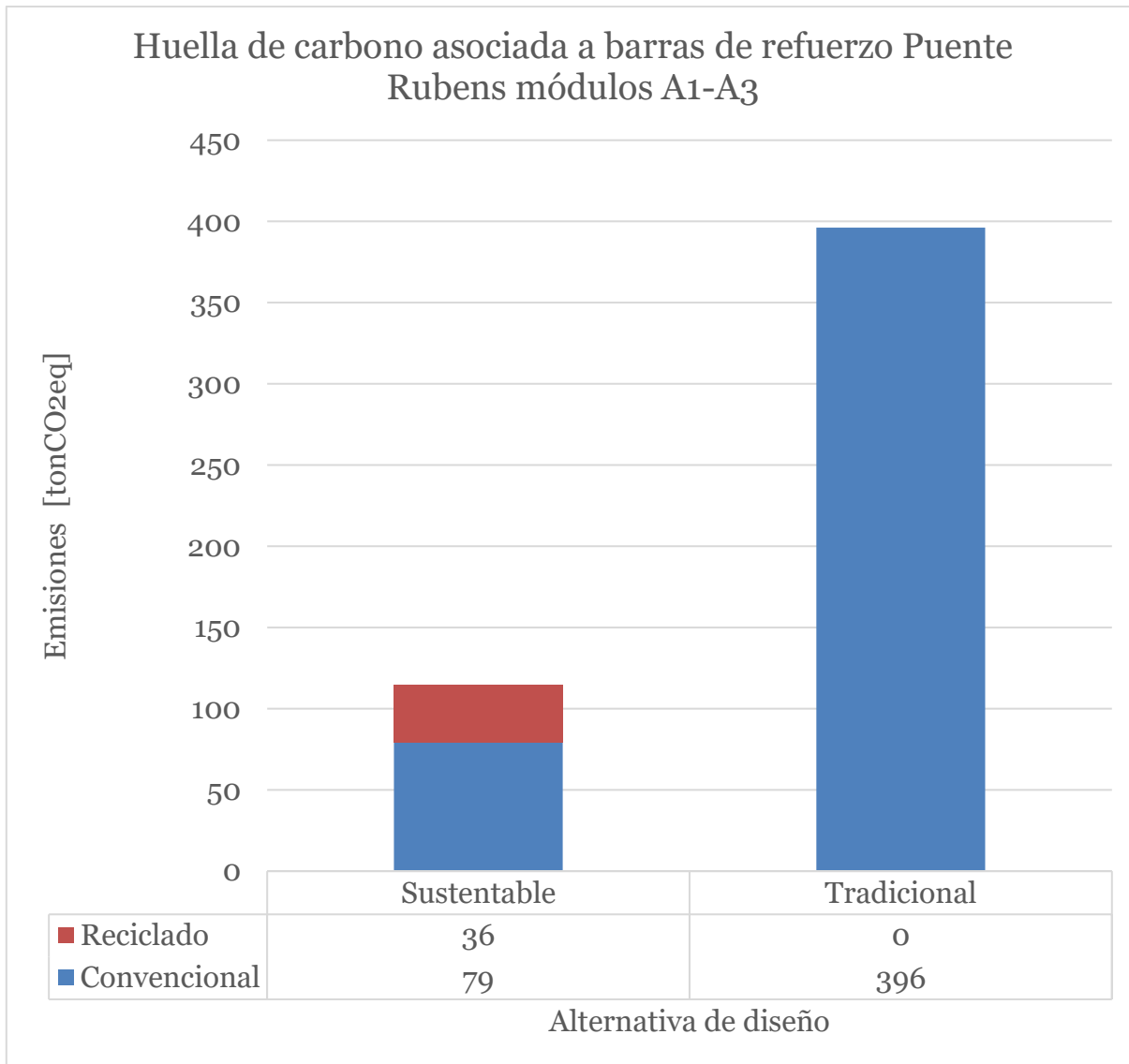
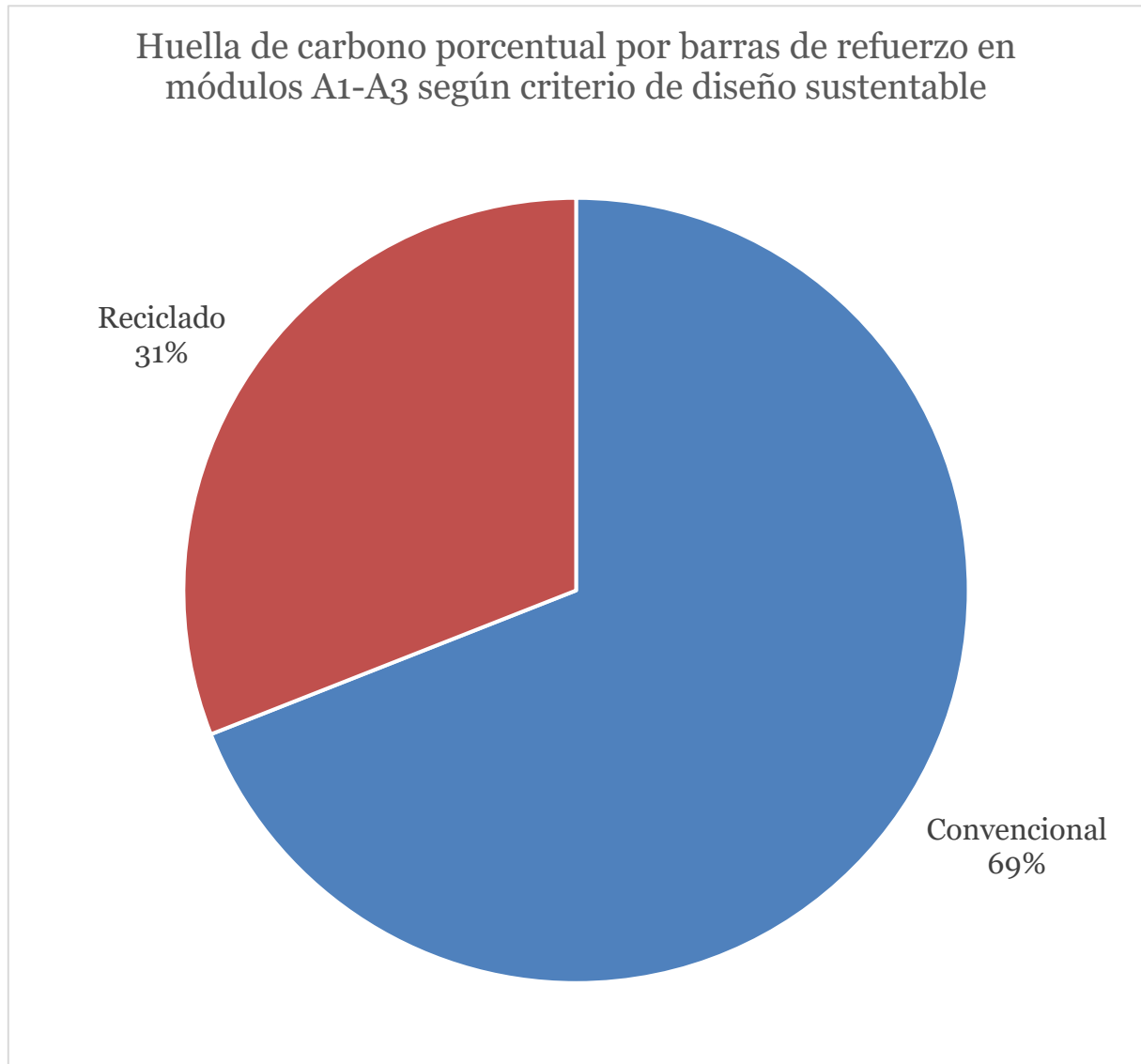


Ilustración 34: Huella de carbono agregada según origen de acero para armaduras en Puente Rubens. Fuente: Elaboración propia.

7.5 RESULTADOS COMPARATIVOS DE PUENTES DEL PROYECTO

Incidencia en HDC de barras de refuerzo según origen en módulos A1-A3.

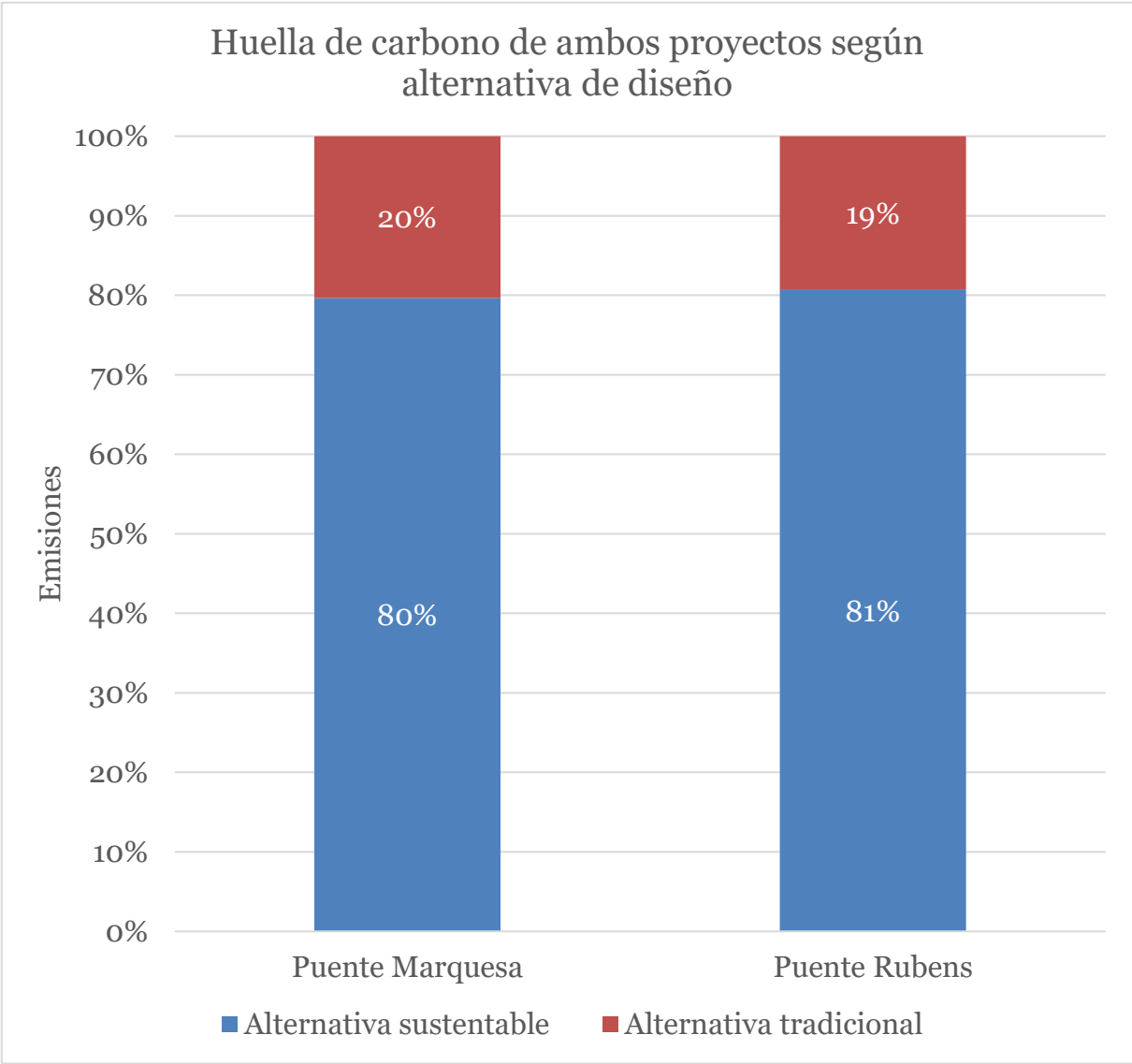
Gráfica circular donde se representa la incidencia de aplicación de 80% de acero reciclado en barras de refuerzo, comparando factores de emisión a partir de DAP consideradas para barras de acero A630-420H de tipo reciclado y convencional.



*Ilustración 35: Porcentaje de incidencia en HDC según factor de emisión para acero reciclado y convencional.
Fuente: Elaboración propia.*

Comparación HDC total según proyecto y alternativa de diseño.

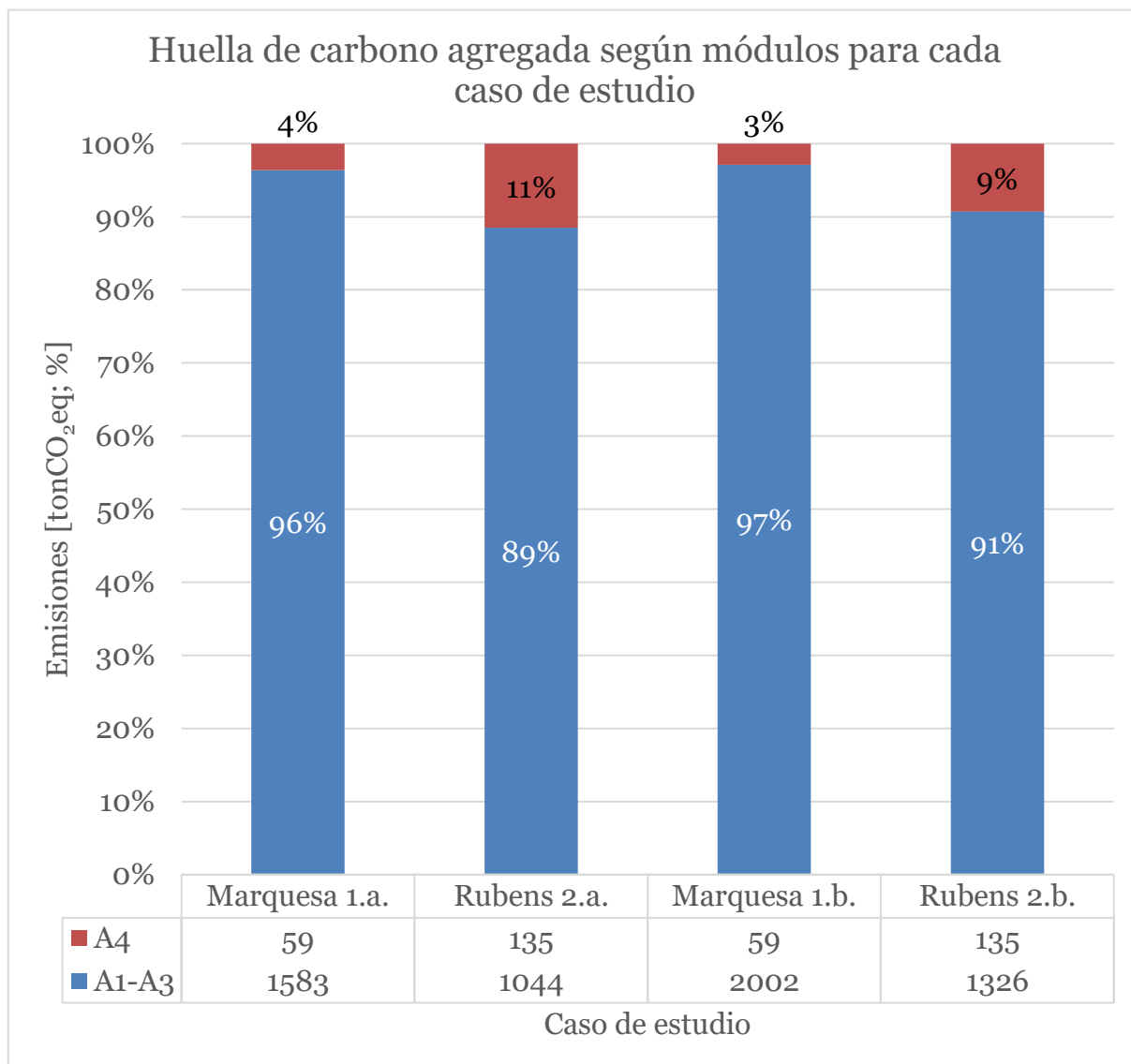
Diagrama de columnas 100% apiladas donde se presentan las emisiones totales del proyecto con alternativa de diseño tradicional a un 100%, y comparación con emisiones de alternativa sustentable.



*Ilustración 36: Huella de carbono porcentual según proyecto y alternativa de diseño.
Fuente: Elaboración propia.*

Comparación HDC porcentual según etapa del ciclo de vida.

Diagrama de columnas 100% apiladas donde se presenta las emisiones totales de cada caso de estudio, agregando HDC según etapa del ciclo de vida (A1-A3: Producción; A4: Construcción). Se comparan ambos proyectos en alternativa sustentable y en alternativa tradicional de diseño.



*Ilustración 37: Huella de carbono porcentual agregada según módulos para cada caso.
Fuente: Elaboración propia.*

Comparación HDC normalizada por unidad de área y agregada por módulos.

Diagrama de columnas donde se presenta las emisiones normalizadas por unidad de área en toneladas de CO₂eq por metro cuadrado de tablero de cada proyecto, agregadas por módulos. Se utilizaron los siguientes datos obtenidos de los planos de proyecto:

Puente Marquesa:

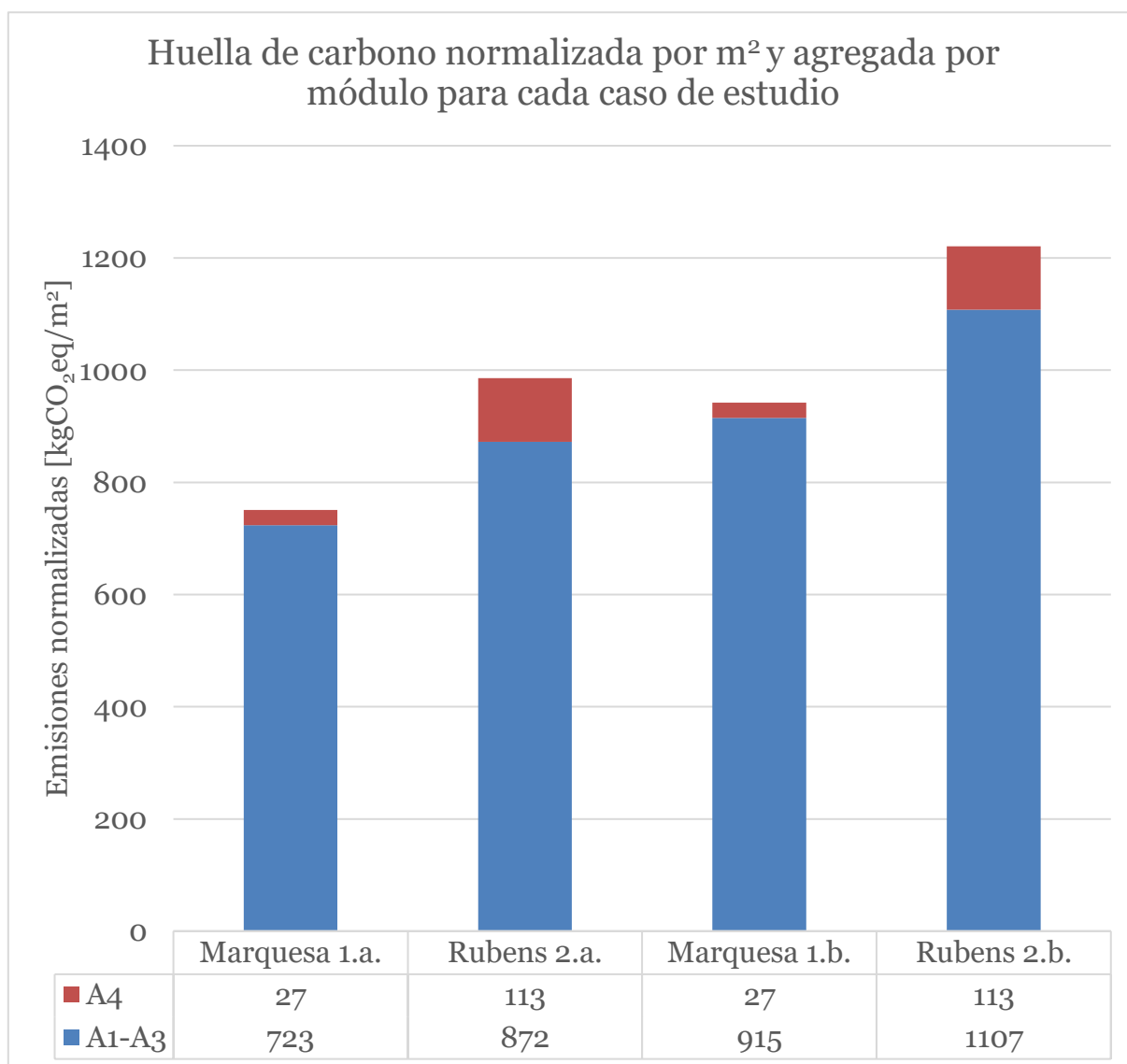
- Ancho tablero: 14,4 [m]
- Longitud tablero: 152 [m]

Área de tablero: 2.189,8 [m²]

Puente Rubens:

- Ancho tablero: 11,4 [m]
- Longitud tablero: 105 [m]

Área de tablero: 1.197,0 [m²]



*Ilustración 38: Huella de carbono normalizada por unidad de área de tablero para cada caso.
Fuente: Elaboración propia.*

8 DISCUSIÓN

Emisiones por componente:

En el caso del Puente Marquesa, la alternativa sustentable (Tabla 16) muestra que el hormigón G25 es el mayor emisor de contaminantes, representando un 41% del total, seguido de las vigas metálicas con un 30% y el acero para armaduras con un 11%. En la alternativa tradicional (Tabla 18), el hormigón G25 sigue siendo el mayor contribuyente con un 33%, seguido del acero para armaduras en segundo lugar con un 29% y luego las vigas metálicas con un 24%.

Para el Puente Rubens, en la alternativa sustentable (Tabla 21) se presenta que los pilotes pre-excavados son los principales emisores, contribuyendo un 39% del total, seguidos por las vigas metálicas y el hormigón G25, ambos con un 23%, y el acero para armaduras con un 11%. En la alternativa tradicional (Tabla 23), los pilotes y el acero para armaduras son los principales aportantes con un 30% cada uno, luego las vigas metálicas y el hormigón G25, ambos con un 18%.

Es posible apreciar a partir de ambos casos que, al pasar de un diseño tradicional a uno sustentable, el acero para armaduras pasa de ser primer o segundo contaminante a cuarto o quinto lugar en la lista.

Emisiones por subcategoría y etapa del ciclo de vida:

En el Puente Marquesa (Tabla 19 y Tabla 20), la infraestructura y la superestructura tienen una participación sobre la huella de carbono total del 52% y 48% respectivamente para el caso 1.a., mientras que en el 1.b. es del 53% y 47%.

Para el Puente Rubens (Tabla 24 y Tabla 25), estos valores son de 61% para infraestructura y 49% superestructura en ambos casos, 2.a. y 2.b., independiente de la alternativa de diseño.

Para los módulos de ciclo de vida, según las mismas tablas de datos anteriores, en el Puente Marquesa un 96% de las emisiones se asocia a la etapa de producción (A1-A3) y un 4% a transporte (A4) en el caso 1.a., y de 97% y 3% en el 1.b respectivamente.

En cuanto al Puente Rubens, estos mismos valores corresponden a 89% y 11% en la primera alternativa de diseño, y de 91% y 9% para la segunda, mostrando una mayor participación por parte del módulo A4.

Emisiones del transporte:

En cuanto al transporte de materiales, para el Puente Marquesa (Tabla 17) la infraestructura representa un 72% de las emisiones, mientras que la superestructura el restante 28%, se justifican estos valores por la mayor cantidad en peso de materiales, principalmente hormigón G25, transportado para la infraestructura.

Para el Puente Rubens (Tabla 22), las emisiones por transporte de la infraestructura representan un 69%, mientras que la superestructura un 31, igualmente los valores son asociados a la mayor cantidad de peso en materiales transportado para la infraestructura, en este caso principalmente de los pilotes.

Cabe destacar que, en términos de magnitud de emisiones en el módulo A4 de ambos puentes, la diferencia entre estas se debe principalmente a la distancia de transporte de materiales desde los puntos de distribución hasta el sitio de obra. La distancia al Puente Rubens es más de tres veces la distancia al Puente Marquesa, medida desde la capital regional correspondiente, así generando una mayor huella de carbono, a pesar de que la cantidad de peso de material transportado sea menor.

Huella de carbono total:

La HDC total estimada del Puente Marquesa para el diseño sustentable es de 1.583 toneladas de CO₂eq, mientras que con un diseño tradicional aumentaría a 2.002 toneladas (Ilustración 27).

Para el Puente Rubens, el diseño sustentable estima un total de 1.180 toneladas de CO₂eq, para diseño tradicional aumentaría a 1.461 toneladas (Ilustración 31).

En ambos proyectos de puente la diferencia en emisiones por diseño reside en el uso acero reciclado o convencional para el 80% de las barras de refuerzo.

Emisiones según materialidad:

Para la alternativa sustentable del Puente Marquesa, los productos de acero contribuyen con un 41% y los de hormigón con un 58% de las emisiones, en cambio en la alternativa tradicional, el acero es el principal emisor con un 53% y el hormigón disminuye a 46% (Ilustración 28).

La situación no es la misma para el Puente Rubens, donde, en ambas alternativas de diseño, el acero es segundo en contribuciones con 32% en el sustentable, y aumentando a 45% en el tradicional. El principal material emisor de contaminantes es el hormigón con un 67% en el caso 1.a., disminuyendo solo hasta un 54% en caso 2.b. (Ilustración 32).

Emisiones del acero:

En la huella del acero del Puente Marquesa (Ilustración 29), la alternativa sustentable reduce las emisiones de acero de armaduras a solo un 25% del total, considerando que en la alternativa tradicional estas representan la mayor parte con un 54% de las emisiones.

Por otro lado, para el Puente Rubens (Ilustración 33), las emisiones del acero de armaduras disminuyen a un 32% para el caso sustentable, comparado a una mayoría en participación de 61% asociado al caso de estudio tradicional.

Emisiones del acero para armaduras:

Bajo el criterio de diseño sustentable para el Puente Marquesa, la producción del acero reciclado a utilizar emite 53 toneladas de CO₂eq y el acero convencional 118, con un total de 171 toneladas en emisiones para la estructura. En caso del diseño tradicional, el total aportado a la HDC por las barras de refuerzo alcanza las 590 toneladas, más de tres veces las emisiones de la alternativa circular (Ilustración 30).

En el diseño sustentable del Puente Rubens, la producción del acero reciclado genera 36 toneladas de CO₂eq y el acero convencional 79, sumando un total 115 toneladas de emisiones en la estructura. Para el diseño tradicional, las barras de refuerzo aportan un total de 396 toneladas a la HDC, también más de tres veces las emisiones de la alternativa circular (Ilustración 34).

Incidencia del acero reciclado en HDC de las barras de refuerzo:

En ambos proyectos, la aplicación del criterio de usar 80% de acero reciclado y 20% de acero convencional para barras de refuerzo influye significativamente en las emisiones totales asociadas al material. Un 31% de las emisiones serán atribuidas al acero reciclado y un 69% al acero de producción lineal (Ilustración 35).

Este dato es independiente de las cubicaciones, y considerando los supuestos que se utilizan como proveedores a AZA y CAP. Se observa que, a pesar de ser la mayor cantidad de material de origen reciclado, se traduce su participación en menos de un tercio de las emisiones contaminantes del acero para armaduras.

Comparación de diseños:

Al comparar los diseños sustentables con los tradicionales para cada puente del proyecto (Ilustración 36), se observa que la primera alternativa, considerando criterios circulares en el acero para armaduras, reduce la huella carbono total de la obra gruesa de la estructura en aproximadamente un 20%, siendo el Puente Marquesa el que muestra mejores resultados en disminución de emisiones.

La diferencia en el porcentaje de reducción de emisiones se explica en la comparación de los cuatro casos de estudio, con su HDC agregada porcentualmente por etapa de ciclo de vida (Ilustración 37). Se observa que en el Puente Marquesa las emisiones por transporte no superan en ningún caso el 5% del total, mientras que en el Puente Rubens alcanzan valores cercanos al 10%.

Como las emisiones de la etapa A4 no varían según origen del acero, y el Puente Rubens posee un porcentaje mayor debido a la distancia de transporte, la influencia del acero reciclado sobre la huella sumada para módulos A1-A3 y A4, se verá reducida en menor cantidad relativa.

Finalmente se normaliza la cantidad de emisiones por unidad de área superficial de la estructura del puente, medida según superficie del tablero (Ilustración 38). Se obtienen los factores de emisiones en kilogramos de CO₂eq por metro cuadrado.

El Puente Rubens tiene un factor de emisión cuatro veces mayor en el módulo A4 y 20% mayor en los módulos A1-A3 que el Puente Marquesa, estadísticas válidas para ambas alternativas de diseño.

Esta diferencia puede atribuirse a la mayor distancia de transporte en el módulo A4 y a la distribución de componentes materiales para los módulos A1-A3. En particular, el Puente Rubens tiene una mayor participación de materiales compuestos principalmente de hormigón, fundamentalmente en los pilotes pre-excavados, que representan poco más de la mitad de los costos materiales considerados en el análisis, y que sus cubicaciones son proporcionalmente más del doble que en el Puente Marquesa.

9 CONCLUSIONES

Sobre los objetivos establecidos, se puede concluir que el objetivo general se ha cumplido satisfactoriamente al evaluar el impacto ambiental del uso del acero reciclado en los puentes del proyecto piloto. La aplicación de la metodología desarrollada por la DGOP permitió realizar un análisis detallado de las etapas de producción y construcción, evidenciando cómo la implementación de acero reciclado contribuye a la reducción la huella de carbono en comparación con el acero convencional

Para los objetivos específicos, primero, en cuanto a la recopilación de datos, se obtuvo información necesaria sobre cantidades de material, procesos de fabricación y transporte, permitiendo un análisis efectivo, aunque sin considerar los procesos constructivos ni las fuentes de energía involucradas. Sin embargo, es importante recalcar que estos datos se basan en supuestos y estimaciones justificadas y no en datos reales de construcción, dado que las obras aun no inician esta etapa.

La aplicación efectiva de la “Guía para la Estimación de Huella de Carbono en Proyectos MOP” permitió determinar de forma precisa las emisiones de CO₂ equivalente. Aunque la guía se encuentra en desarrollo, demostró ser una herramienta útil para proyectos de infraestructura pública.

Se identificaron y clasificaron correctamente los materiales con mayor aporte a la huella de carbono en ambos puentes, especialmente a lo que respecta a las aplicaciones de acero en los módulos A1-A3 y A4. No se evaluaron los procesos asociados a la construcción, por lo que el módulo A5 no se consideró para la completitud de este análisis.

Se identificó que las etapas de mayor contribución a la huella de carbono corresponden a la producción de materiales, módulos A1-A3, con un porcentaje de participación importante, teniendo en cuenta que la comparación se enfocó en las etapas de producto y transporte del ciclo de vida.

Por último, la comparación entre el uso de acero reciclado y convencional reveló diferencias significativas en términos de impacto ambiental. La implementación de acero de producción circular afecta positivamente al contabilizar las emisiones asociadas a los materiales de la obra gruesa de ambos proyectos de puente.

Se observó una reducción del 20% de la HDC total de los proyectos, en unidades de CO₂ equivalente, cuando se aplicó el requisito de 80% de barras de refuerzo producidas con acero reciclado en su diseño. Esta reducción se evidencia más en las asociadas específicamente a barras de refuerzo, que se redujeron en más de dos tercios.

La cuota definida de material reciclado es responsable de solo un 31% de las emisiones del acero para armaduras, mientras que el 20% de acero producido a partir de mineral de hierro emite un 69% de esta HDC, utilizando recursos naturales finitos. Estos datos fueron estudiados según las DAP's consideradas en el análisis.

Comparando ambos proyectos, si bien ambos exigen el mismo requisito en sus especificaciones ambientales, el Puente Rubens presentó una huella de carbono por área superficial entre un 20% y 30% mayor que la del Puente Marquesa. El Puente Rubens precisa una mayor cantidad de materiales en proporción a su área de tablero, generando la diferencia de HDC normalizada.

Respecto a las emisiones asociadas al transporte, se observó que la utilización de acero reciclado no afecta directamente a las emisiones según los supuestos considerados, sino que dependen de la distancia recorrida desde puntos de distribución a obra. Un análisis más completo debería considerar la disponibilidad local de materiales, ya que algunos pueden no contar con puntos de distribución cercanos, aumentando las emisiones en proyectos ubicados en áreas remotas, como es el caso del Puente Rubens.

En cuanto a la calidad de datos utilizados, no es posible verificar con certeza el origen de los materiales que se utilizarán en la construcción de los puentes, ya que las obras no han comenzado esta etapa a la fecha.

Los resultados se basan en supuestos sobre el uso de acero reciclado AZA, acero convencional CAP, y hormigón Cementos BIOBIO, que son los proveedores nacionales que poseen factores de emisión a partir de DAP's. En caso de utilizar otros proveedores, los resultados pueden variar.

Es importante señalar que la empresa CAP produce acero a partir de mineral de hierro e incorporando una parte de chatarra, por lo que si se adquieren barras de refuerzo convencionales de otro proveedor posean un mayor factor de emisión de CO₂eq. Se debe considerar que CAP enfrenta el cierre definitivo de las operaciones de la Siderúrgica Huachipato para octubre 2024.

Los factores de emisión para el resto de los materiales fueron obtenidos de la calculadora EC3, a partir de su base de datos de DAP's. Aunque son representativos, estos factores podrían distar de la realidad de materiales a utilizar en la construcción de ambos proyectos, ya que se basan en estadísticas obtenidas a nivel regional y global.

De acuerdo con las limitaciones del mercado, no es factible exigir un 100% de acero reciclado en las barras de refuerzo, ya que AZA es el único productor en Chile y no se quiere fomentar un monopolio. La compra de acero reciclado a compañías internacionales puede llegar a ser incoherente con los principios de circularidad, debido a las mayores distancias de transporte y las emisiones adicionales que generaría. Para su uso se debería comparar emisiones de acero reciclado importado y acero convencional nacional.

Un enfoque integral de sustentabilidad podría considerar la incorporación de acero reciclado en otros componentes del proyecto, como señaléticas, postes, barandas y vigas metálicas, entre otras aplicaciones.

También, dentro de las practicas sostenibles, existen alternativas como el reciclaje de desechos de pavimento para mejoramiento de bases en caminos, o el uso de hormigones con áridos reciclados que reemplacen parcialmente los áridos naturales. Asimismo, la revalorización de desechos de demolición de los puentes antiguos, como el reciclaje de vigas, barras y otros elementos de acero en desuso, así como los pavimento y hormigones para prácticas recién mencionadas.

A modo de cierre, es fundamental destacar que este trabajo ha demostrado la efectividad de aplicar principios de economía circular en la construcción de obras públicas. Particularmente mediante la exigencia de acero reciclado, implementando la sostenibilidad a partir del diseño del proyecto, más allá de solo el manejo de residuos.

El éxito de este estudio remarca la importancia de seguir investigando y aplicando estos principios en futuras obras públicas, fomentando una construcción más responsable con el medio ambiente y que minimice los impactos negativos. Así, se sienta un precedente para el desarrollo de proyectos que no solo sean viables de una perspectiva técnica y económica, sino también ambiental, alineándose con las metas globales de sostenibilidad que los objetivos de desarrollo sostenible buscan alcanzar en un futuro no tan lejano.

10 FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Para mejorar y complementar el estudio, es recomendable realizar un análisis que incluya ciertas partidas del módulo de construcción e instalación (A5) de la obra gruesa de los puentes. Este análisis debería considerar toda la maquinaria a utilizar, evaluando su rendimiento, horas de trabajo y factor de emisión del diésel, en actividades como el movimiento de tierras, alzado de moldajes, entre otras.

Además, considerando el análisis completo de la etapa de construcción (módulos A4-A5), es posible contabilizar y segregar la huella de carbono en categorías más específicas, como instalaciones provisionales, obras previas, terminaciones, etc., no limitándose únicamente a la obra gruesa de la estructura.

En este tipo de proyectos, también es viable estimar las emisiones vinculadas al módulo B4 de obras de reemplazo. Estas emisiones, relacionadas con la etapa de uso, podrían ser proyectadas para el periodo de vida útil de la estructura, tomando como referencia proyectos de características similares.

En cuanto a la expansión del estudio, debería considerarse un análisis que abarque la totalidad del proyecto, no solo la estructura de los puentes. Esto englobaría partidas asociadas a caminos, defensas fluviales, iluminación, entre otros elementos del proyecto.

Al extender el análisis de huella de carbono, es importante mencionar que la reducción de impacto ambiental por el criterio de uso de acero reciclado no será tan relevante en un análisis global. En otras partidas de proyecto no se aplica este requisito, lo que mantiene su huella de carbono independiente del tipo de diseño estructural.

Un enfoque valioso para este estudio sería volver a desarrollarlo durante la etapa efectiva de construcción de los puentes. Esto permitiría comparar la huella de carbono de la obra gruesa estimada a partir del diseño con la real producida durante la construcción, implementando datos auténticos para el análisis en lugar de supuestos.

Las posibilidades de expandir tanto el alcance del estudio como la aplicación de prácticas sostenibles en proyectos similares son amplias. Es esencial considerar un enfoque integral que involucre diversas estrategias sostenibles, no limitándose al uso del acero reciclado para armaduras, sino también abordando también otros materiales y procesos constructivos.

11 BIBLIOGRAFÍA

1. Acuña, H., Easton, P., Ramos, C., Torres, C. (2019) *El sector de la Construcción ante el Desafío Climático Global*. Gerencia de estudios Cámara Chilena de la Construcción. https://cchc.cl/uploads/archivos/archivos/Fundamenta_45.pdf
2. AENOR Chile. (2024). Declaraciones ambientales de producto. <https://www.aenorchile.com/certificacion/certificacion-de-producto/declaraciones-ambientales-de-producto>
3. Alarcón, M. (2024). *Guía para la estimación de huella de carbono en proyectos MOP*. (Borrador). Dirección General de Obras Públicas.
4. Asociación Latinoamericana del Acero (Alacero). (s.f.). *La fuerza del acero en la vida cotidiana*. <https://www.alacero.org/aco>
5. Asociación Latinoamericana del Acero (Alacero). (2023). *América Latina en cifras 2022/2023*. https://cms.alacero.org/uploads/ALACERO_LATAM_Cifras_Noviembre_2023_ESP_5bbf3194d3.pdf
6. AZA Acero Sostenible (AZA). (2020). *Ficha de producto*. <https://www.aza.cl/2024/wp-content/uploads/2021/01/Barras-de-refuerzo-para-hormigon-armado-CES.pdf>
7. AZA Acero Sostenible (AZA). (2024). *Reporte de sostenibilidad 2023*. <https://www.aza.cl/2024/wp-content/uploads/2024/05/Reporte-Sostenibilidad-AZA-2023.pdf>
8. Chang, Y; Ries, R.J; Wang, Y. (2011). The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment, and society based on I-O LCA. *Energy Policy Journal, Volumen 39, Artículo 10, 6321-6330*. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.033>
9. Centro de Desarrollo Tecnológico (CDT). (2020). *Introducción a la Economía Circular en Construcción: Diagnóstico y Oportunidades en Chile*. Estrategia economía circular en la construcción. Cámara Chilena de la Construcción (CChC), Instituto de la Construcción y Construye2025 (CORFO). <https://construye2025.cl/2022/07/20/introduccion-a-la-economia-circular-en-la-construccion-diagnostico-y-oportunidades-en-chile/>
10. Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). (2018). *Economía circular en el sector de la construcción*. Grupo de trabajo GT-6, Congreso Nacional de Medio Ambiente 2018, Fundación CONAMA. https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/130254/CONAMA_Economia%20circular_2018.pdf

11. Compañía de Acero del Pacífico (CAP). (2024). *Memoria Integrada 2023*. https://www.cap.cl/cap/site/artic/20240425/asocfile/20240425191542/memoria_integrada_grupo_cap_2023.pdf
12. Construye2025. (2023). *MMA impulsa siete normas técnicas para la economía circular en construcción*. <https://construye2025.cl/2023/03/31/mma-impulsa-siete-normas-tecnicas-para-la-economia-circular-en-construccion/>
13. Construye2025, Corporación de Fomento de la producción (CORFO), Ministerio del Medio Ambiente (MMA), Ministerio de Obras Públicas (MOP), Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). (2020). *Hoja de Ruta RCD Economía Circular en Construcción 2035*. http://construye2025.cl/rcd/wp-content/uploads/2020/08/HDR-PAGINA_RCD_200825.pdf
14. Dirección de Vialidad (DV). (2023). *Antecedentes de licitación para contrato de obras públicas dirección de vialidad*. <https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?q=7z/jT+fHdkFR2ynFl3jxew==>
15. Dirección de Vialidad (DV). (2023). *Antecedentes de licitación para contrato de obras públicas dirección de vialidad. Proyecto: “Reposición Puente Marquesa en ruta d-125, comuna de vicuña, región de coquimbo”*. <https://www.mercadopublico.cl/Procurement/Modules/RFB/DetailsAcquisition.aspx?q=ME1V7FoCT1w059eBUdFlFg==>
16. EBP Chile SpA, E3 Ingeniería, Ministerio de Obras Públicas. (2023). *Análisis de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Proyectos Aeroportuarios y de Conectividad: Resumen Ejecutivo*.
17. Ellen MacArthur Foundation. (s.f.). *What is a circular economy?* Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
18. Enshassi, A; Kochendoerfer, B; Rizq, E. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción RIC, Volumen 29, Artículo 3, 234-254*. <https://www.scielo.cl/pdf/ric/v29n3/arto2.pdf>
19. Equipo Huella Chile. (2024). *Factores de emisión para el cálculo de la huella de carbono: Nivel básico*. Programa Huella Chile, División de CAMBIO Climático, Ministerio de Medio Ambiente. https://huellachile.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2024/07/HuellaChile-DCC-Factores-de-emision-nivel-basico_0624.pdf
20. EPD Latin America (EDP). (2015a). *El International EPD System*. <https://www.epd-americalatina.com/international-epd-system>

21. EPD Latin America (EDP). (2015b). *Reglas de Categoría de Productos*. <https://www.epd-americalatina.com/pcr>
22. EPD Latin America (EPD). (2019). *Environmental Product Declaration in accordance with ISO14025 y EN15804 for: Ready-Mix Concrete G025 (10)-20-12-28-B Cementos Bio Bio S.A.* <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/9fb9c0c5-da4f-465a-aca7-35f3e8c2be9b/Data>
23. EPD Latin America (EPD). (2022). *Declaración Ambiental de Producto de acuerdo con ISO 14025 y EN15804:2012+A2:2019 para: Barras de refuerzo de AZA Acero Sostenible*. <https://www.aza.cl/2024/wp-content/uploads/2023/01/DAP-Barras-de-Refuerzo-S-P-06700.pdf>
24. EPD Latin America (EPD). (2023). *Declaración Ambiental de Producto de acuerdo con ISO 14025 y EN15804:2012+A2:2019 para: Barras de refuerzo (barras de hormigón soldables, no soldables y de alta resistencia) de Compañía Siderúrgica Huachipato*. https://www.siderurgicahuachipato.cl/cap_acero/site/artic/20200826/asocfile/20200826102901/dap_barra_refuerzo_de_acero_espa_ol.pdf
25. Eurofins Environment Testing Spain. (2024). *Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve*. <https://www.eurofins-environment.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida-que-es/>
26. Forbes Chile. (2024). *Siderúrgica Huachipato apaga su alto horno e inicia su cierre definitivo*. <https://forbes.cl/actualidad/2024-09-16/siderurgica-huachipato-apaga-su-alto-horno-e-inicia-su-cierre-definitivo>
27. Gallardo R. (2024). *Greenwashing: Cuando lo ecológico es solo una fachada utilizada por las empresas*. Prensa Uchile. <https://uchile.cl/u214806>
28. Gervasio, H. (2014). *La sustentabilidad del acero y las estructuras metálicas*. Instituto Chileno del Acero (ICHA). <https://icha.cl/wp-content/uploads/2014/12/LA-Sustentabilidad-del-Acero-y-Las-Estructuras-Met%C3%A1licas.pdf>
29. Gobierno de Chile. (2020). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile: Actualización 2020*. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/08/NDC_2020_Espanol_PDF_web.pdf
30. Greenpeace México. (2020). *Huella de carbono: aprende a calcular tu impacto ambiental*. <https://www.greenpeace.org/mexico/blog/9386/huella-de-carbono/#huella-de-carbono>

31. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emissions pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.*
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
32. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://www.ipcc.ch/report/synthesis/)
33. Ibáñez, P. (2020). Economía circular y proyectos viales en Chile: un camino que se comienza a recorrer. *Revista de Obras Públicas, N°54, Octubre – Noviembre – Diciembre 2020, 6-11.* <https://revistaobraspublicas.cl/revista-obras-publicas/wp-content/uploads/2022/08/N54-Revista-OOPP.pdf>
34. Ibáñez, P. (2023). *Reducción de Emisiones GEI en la Infraestructura Vial: El nuevo paradigma a transitar.* (Manuscrito presentado para su publicación). Departamento de Medio Ambiente y Territorio, Dirección de Vialidad.
35. Instituto Chileno del Acero (ICHA). (s.f.). *El Acero, un producto amigable con el medio ambiente.* <https://icha.cl/el-acero/>
36. Lëvanen, J., Lyytinen, T., y Gatica, S. (2018). Modelling the Interplay Between Institutions and Circular Economy Business Models: A case Study of Battery Recycling in Finland and Chile. *Ecological Economics, Volumen 154, 373-382.* <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.08.018>
37. Li, X; Zhang, Z. (2010). An LCA-based environmental impact assessment model for construction processes. *Building and Environment Journal, Volumen 45, Artículo 3, 766-775.* <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.buildenv.2009.08.010>
38. Lippiatt B. (1999). Selecting cost-effective green building products: BEES approach. *Journal of Construction Engineering and Management, Volumen Nov/Dec 1999, 448-455.* https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860018
39. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (s.f.a). *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC). División de Cambio Climático.* <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/contribucion-determinada-ndc/descripcion-del-instrumento/>

40. Ministerio de Medio Ambiente. (s.f.b.). *Hoja de Ruta*. Oficina de Economía Circular. <https://economiecircular.mma.gob.cl/hoja-de-ruta/>
41. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2019). *Huella Chile: Programa de gestión del carbono*. <https://huellachile.mma.gob.cl/>
42. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2021). *Huella de Carbono*. <https://mma.gob.cl/cambio-climatico/cc-02-7-huella-de-carbono/>
43. Ministerio de Medio Ambiente (MMA)., Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (MINECON)., Corporación de Fomento de la Producción (CORFO). y Agencia de Sustentabilidad y Cambio Climático (ASCC). (2021). *Hoja de Ruta para un Chile Circular*. Gobierno de Chile. Santiago, Chile. <https://economiecircular.mma.gob.cl/hoja-de-ruta/>
44. Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2023). *Análisis de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en proyectos aeroportuarios y de conectividad*.
45. Naciones Unidas (ONU). (s.f.a). *La Agenda para el Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/development-agenda/>
46. Naciones Unidas (ONU). (s.f.b). *¿En qué consiste el desarrollo sostenible?* <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2023/08/what-is-sustainable-development/>
47. Naciones Unidas (ONU). (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023 [Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2023: Edición especial]*. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales (DAES), Naciones Unidas. United Nations Publications. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf
48. Prieto-Sandoval, V., Jaca, C., y Ormazabal, M. (2018). Towards a consensus on the circular economy. *Journal of Cleaner Production, Volumen 179, 605-615*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.224>
49. Ramkumar, S., Kraanen, F., Plomp, R., Edgerton, B., Walrecht, A., Baer, I. y Hirisch, P. (2018). *Linear risks*. Circular Economy, PPGM, KPMC, EBRD, y WBSCD. <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/nl/pdf/2021/services/linear-risks.pdf>
50. Recylink. (2023). *Conoce la Hoja de Ruta de la Construcción*. <https://recylink.com/educacion/conoce-la-hoja-de-ruta-de-la-construccion/>

51. Rodríguez, F; Fernández, G. (2010). Ingeniería sostenible: nuevos objetivos en los proyectos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción (RIC)*, Volumen 25, Artículo 2, 147-160. Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://revistaingenieriaconstruccion.uc.cl/index.php/ric/article/view/19027/15647>
52. Romero, B. (2003). El análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental. *Tendencias tecnológicas, boletín IIE, julio-septiembre 2003*, 91-97. https://www.ucipfg.com/Repositorio/MAES/MAES-07/BLOQUE-ACADEMICO/Unidad-3/lecturas/ACV_GA.pdf
53. Salvatierra, R. (2019). *Economía Circular: Desafíos del modelo en Chile*. <https://repositorio.udd.cl/server/api/core/bitstreams/e4558a9c-ea25-404e-a58e-87f4ae6cfoba/content>
54. Santurde, L., Castro, R. (2021). La aportación de la Economía Circular a los ODS frente a limitaciones del Sistema Lineal. *Revista Iberoamericana de Economía Solidaria e Innovación Socioecológica*, Volumen 4, 149-170. <https://doi.org/10.33776/riesise.v4i1.5185>
55. Schröder, P., Albajadejo, M., Ribas, P., MacEwen, M., y Tilkanen, J. (2020). *La economía circular en America Latina y el Caribe: Oportunidades para fomentar la resiliencia*. Real Instituto de Asuntos Internacionales Chatham House. [https://www.catedrasostenibilidadadaege.org.do/Portals/o/OpenContent/Files/468/La economía circular en America Latina y el Caribe compressed-2.pdf](https://www.catedrasostenibilidadadaege.org.do/Portals/o/OpenContent/Files/468/La%20economia%20circular%20en%20America%20Latina%20y%20el%20Caribe%20compressed-2.pdf)
56. Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT). (2016). *Política de sustentabilidad ambiental del Ministerio de Obras Públicas*. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/25913>
57. Secretaría Ejecutiva de Medio Ambiente y Territorio (SEMAT). (2017). *Plan de Adaptación y Mitigación de los Servicios de Infraestructura al Cambio Climático 2017-2022*. <https://dgop.mop.gob.cl/Documents/PlanAccionMop.pdf>
58. Stahel, W. (2016). The Circular Economy. *Nature*, Volumen 531, 435-438. <https://www.nature.com/articles/531435a>
59. Vera, J. (2019). *La contaminación atmosférica por las actividades de la industria de la construcción en Colombia*. Universidad de Antioquia. https://www.researchgate.net/profile/Javier-Vera-Solano/publication/336749294_Air_pollution_from_construction_industry_activities_in_Colombia/links/5db0b5fc299bf11d4c022e9/Air-pollution-from-construction-industry-activities-in-Colombia.pdf

60. Wiche, P., Rodríguez, B., Granato, D. (2020). *Estado del arte de Huella de Carbono para Edificaciones: Resumen para Tomadores de Decisiones*. Instituto de la Construcción, segunda edición. <https://ecoed.cl/wp-content/uploads/2020/12/Producto-4-Resumen-para-tomadores-de-decisiones-2da-edicion.pdf>
61. World Economic Forum, Ellen MacArthur Foundation, y McKinsey & Company. (2016). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*. Ellen MacArthur Foundation. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/the-new-plastics-economy-rethinking-the-future-of-plastics>
62. World Green Building Council (WorldGBC). (2019). Reducción de las emisiones de carbono: Acción coordinada del sector de la edificación y la construcción para hacer frente a las emisiones de carbono incorporado – Resumen Ejecutivo. https://worldgbc.s3.eu-west-2.amazonaws.com/wp-content/uploads/2022/09/01102803/SPANISH_WorldGBC_Bringing-Embodied-Carbon-Upfront_Executive-Summary_compressed.pdf
63. World Steel Association (Worldsteel). (2024). *2024 World Steel in Figures*. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2024.pdf>

12 ANEXOS

ANEXO A: ANÁLISIS COMPLEMENTARIOS

A continuación, se presentan dos análisis complementarios al estudio desarrollado a lo largo del trabajo. Ambos análisis se estructuran con una breve descripción de su enfoque, junto con sus respectivos resultados y conclusiones. El desarrollo de ambos análisis es independiente, y se realiza solo en base a la alternativa de diseño sustentable.

Debido a las características de ambos análisis, no se consideran parte del cuerpo principal del trabajo y son excluidos de las conclusiones generales. Por lo tanto, se han establecido como anexo, representando vías alternativas de exploración.

ANEXO A.1: ANÁLISIS DE TRANSPORTE ALTERNATIVO

Para otro análisis comparativo de emisiones de carbono entre acero reciclado y acero en base a mineral de hierro y chatarra, se considera la posibilidad de que el primero presente menor facilidad de adquisición.

Se toma como supuesto que el acero reciclado será trasladado desde la planta de producción en Santiago hasta obra, y el acero convencional se transportará desde la capital regional.

De acuerdo con las vías de traslado de materiales, se considera para el Puente Marquesa que el traslado será vía terrestre desde Santiago hasta Coquimbo, y luego desde Coquimbo hasta la obra, junto con el material de producción convencional, también por vía terrestre.

En el caso del Puente Rubens, el transporte del acero reciclado será vía terrestre desde Santiago a Puerto Montt, luego vía marítima desde Puerto Montt a Puerto Natales, y finalmente vía terrestre desde Puerto Natales a obra. El material de acero convencional mantiene el supuesto de traslado terrestre desde Punta Arenas hasta la obra.

Para el cálculo de emisiones de transporte se utiliza el factor de emisión para carga marítima de la Ilustración 39. Las cantidades de material trasladado son las mismas que se encuentran en la Tabla 15, y el factor de emisión de camiones de carga es el mismo previamente utilizado.

Alcance de la huella de carbono	Categoría dentro del alcance	Ítem	Factor de emisión	Unidad Factor de emisión	Fuente de información
3	Otras emisiones indirectas – Transporte de cargas	Barco de carga promedio	0,0161	kgCO ₂ e/t-km	DEFRA 2023 – Hoja “Freighting goods”

Ilustración 39: Factor de emisión de transporte para barcos (Equipo Huella Chile, 2024).

Las distancias utilizadas fueron obtenidas de las rutas de transporte de carga, correspondiente a la Ruta 5 Norte, Ruta 5 Sur, y la ruta marítima Puerto Montt – Puerto Natales definida por Google Earth Pro. Estas distancias obtenidas se encuentran tabuladas por tramo en la Tabla 26: Datos para cálculo de emisiones por transporte alternativo.

Fuente: Elaboración propia. Tabla 26, además de la vía de transporte y factor de emisión asociado a cada uno.

*Tabla 26: Datos para cálculo de emisiones por transporte alternativo.
Fuente: Elaboración propia.*

DATOS PARA TRANSPORTE DE MATERIALES				
PUENTE	TRAMO	DISTANCIA [KM]	VÍA DE TRANSPORTE	F.E. TRANSPORTE
MARQUESA	Santiago Coquimbo	461,8	Terrestre	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Coquimbo La Marquesa	47,5	Terrestre	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
PUENTE RUBENS	Santiago Puerto Montt	1.033,1	Terrestre	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Puerto Montt Puerto Natales	1.465,0	Marítima	0,0161 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Puerto Natales Rubens	62,6	Terrestre	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$
	Punta Arenas Rubens	185,0	Terrestre	0,1782 $\left[\frac{kgCO_2eq}{ton-km} \right]$

RESULTADOS

En la Tabla 27 se observan los resultados obtenidos de emisiones, en toneladas de dióxido de carbono equivalente, para el transporte de material hasta la obra según tipo de acero, correspondiente al módulo A4 del análisis del ciclo de vida. Se calcula solo el módulo A4, ya que las emisiones de los módulos A1-A3 se mantendrán iguales que las estudiadas previamente.

*Tabla 27: Emisiones asociadas al módulo A4 para alternativa de transporte de material reciclado.
Fuente: Elaboración propia.*

EMISIONES DE CARBONO DE BARRRAS DE REFUERZO EN MÓDULO A4, PARA ALTERNATIVA DE TRANPORTE A OBRA DE MATERIAL.				
PUENTE		TIPO DE ACERO		TOTAL
		RECICLADO	CONVENCIONAL	
MARQUESA	EMISIONES [tonCO₂eq]	16,8	0,4	17,2
	PARTICIPACIÓN APROXIMADA	98%	2%	
RUBENS	EMISIONES [tonCO₂eq]	27,2	1,0	28,2
	PARTICIPACIÓN APROXIMADA	96%	4%	

En cuanto a las emisiones por transporte ya estudiadas, la metodología utilizada previamente posee una incidencia de 80% de participación en emisiones por parte del acero reciclado, y un 20% por parte del acero convencional, válido para ambos puentes.

Esto ya que se considera la misma distancia de traslado, y solo influye el peso de material trasladado, correspondiente a los porcentajes de requisito de material reciclado para el proyecto.

A continuación, en la Ilustración 40, se presenta un gráfico de columnas 100% apiladas, que compara la incidencia del tipo de acero de refuerzo en sus emisiones totales (A1-A3 y A4). Se compara la metodología previamente utilizada en el trabajo (estudio), con la alternativa propuesta en esta sección (alternativa), para cada uno de los puentes.

Porcentaje de participación en emisiones por barras de acero de refuerzo, según tipo de acero, para cada alternativa de traslado de material, módulos A1-A3 y A4.

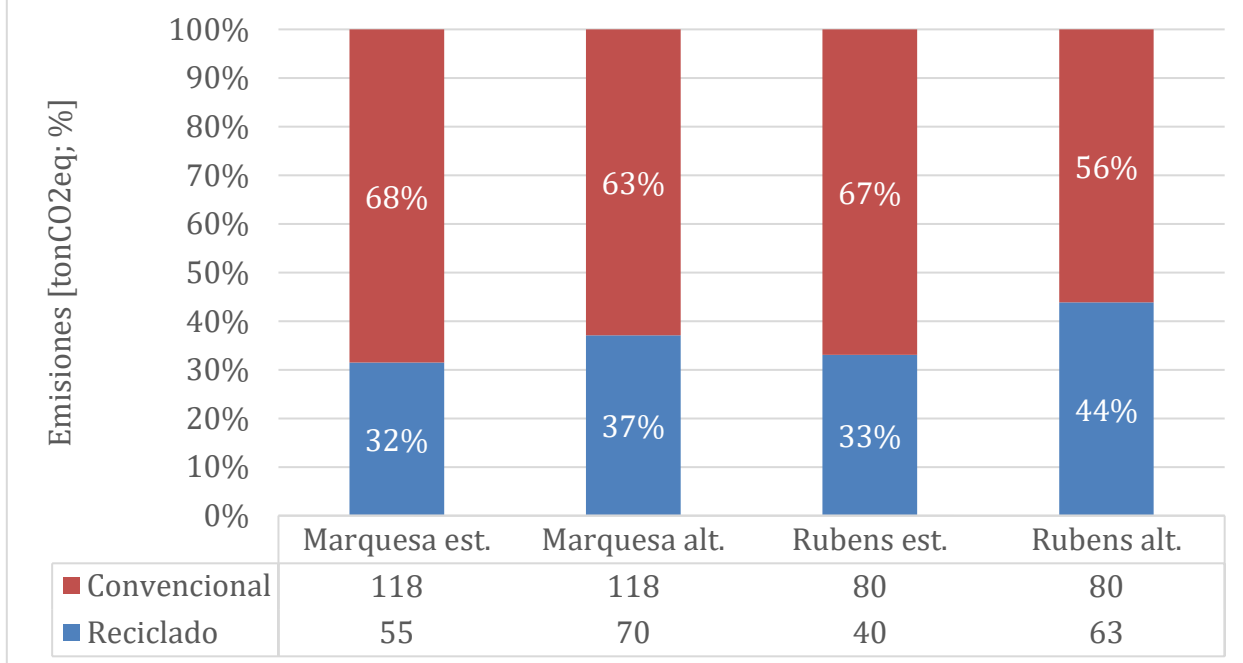


Ilustración 40: Emisiones módulos A1-A3 y A4 según origen de acero de barras de refuerzo, por metodología de estudio de transporte de material.

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 28 se presentan las emisiones totales de módulos A1-A3 y A4 en toneladas de CO₂eq, considerando la alternativa de transporte planteada. Además se observa la diferencia asociada a dicha alternativa con respecto al estudio previo, y su porcentaje correspondiente sobre el total de contaminantes de cada proyecto.

Tabla 28: Emisiones totales módulos A1-A3 y A4 para alternativa de transporte.

Fuente: Elaboración propia.

DIFERENCIA DE EMISIONES TOTALES MÓDULOS A1-A3 Y A4 CON RESPECTO AL ESTUDIO, POR ALTERNATIVA EN TRANSPORTE DE ACERO RECICLADO.			
PUENTE	EMISIONES TOTALES ALTERNATIVA [tonCO₂eq]	DIFERENCIA DE EMISIONES C/R A ESTUDIO [tonCO₂eq]	PORCENTAJE DE AUMENTO C/R A ESTUDIO
MARQUESA	1.658	15	0,9%
RUBENS	1.203	23	1,9%

DISCUSIÓN

Del gráfico se observa que la suposición de trasladar el acero reciclado desde la capital nacional hasta las obras genera un aumento en las emisiones asociadas al transporte, ya que las emisiones de producción del material siguen siendo las mismas.

Segregando únicamente el módulo A4, se evidencia cómo las emisiones por traslado de acero reciclado aumentan desde un 80% de participación hasta casi la totalidad: 98% para el Puente Marquesa y 96% para el Puente Rubens.

Además, al considerar el total de emisiones de los módulos A1-A3 y A4, se observa un incremento considerable en las emisiones del acero reciclado, pasando de un 32% a un 37% en el Puente Marquesa, y de un 33% a un 44% en el Puente Rubens.

El Puente Rubens se ve más afectado debido a que las distancias de traslado desde la capital nacional a la regional son mayores. A pesar de incluir un tramo marítimo extenso, que se asocia a un factor de emisión aproximado de solo un 10% del factor de emisión por transporte terrestre.

A pesar de este aumento en las emisiones asociadas al transporte de acero reciclado, sigue siendo posible afirmar que solo el 20% del acero para barras de refuerzo, correspondiente a una producción convencional, genera la mayor parte de las emisiones contaminantes, manteniéndose aún por sobre la mitad, hasta cercano a los dos tercios de participación.

La opción de utilizar acero de producción circular sigue siendo la menos contaminante, incluso en el peor de los casos, donde alcanza un 44% de participación. Cabe destacar que este porcentaje corresponde al 80% del total del material para armaduras. Una vez más se reafirma que el 20% de las barras de acero no reciclado son las principales emisoras de contaminantes, independientemente de la alternativa de transporte, ya que se asocia a su etapa de producción.

Finalmente, es importante destacar que, según los datos de la Tabla 28, esta alternativa de transporte para el acero reciclado efectivamente conlleva un aumento aproximado de un 1% para el Puente Marquesa y un 2% para el Puente Rubens, debido a la envergadura de los proyectos y a la cantidad de materiales que no se vinculan con los requisitos de circularidad.

Este análisis, aunque presenta una alternativa viable para el transporte de acero reciclado, no fue incluido en el cuerpo principal del informe debido a su carácter exploratorio y a la introducción de variables no contempladas en el análisis original. A pesar del aumento en las emisiones por transporte, el uso de acero reciclado sigue siendo la opción menos contaminante.

ANEXO A.2: ANÁLISIS ESTIMATIVO MÓDULO A5

Como complemento al trabajo desarrollado, se incorpora un análisis netamente estimativo sobre las emisiones asociadas al módulo A5 de ambos proyectos, correspondientes a la etapa de construcción.

Este análisis no fue incluido en el cuerpo principal del informe debido a la gran cantidad de variables no controlables, ya que los puentes aún no han comenzado su fase de construcción, y solo se ha trabajado con los datos disponibles a partir de los antecedentes de licitación de ambos proyectos.

Para estimar las emisiones del módulo A5, es necesario considerar los consumos de combustible asociados a los métodos constructivos, así como la operación de instalación de faena, el traslado de trabajadores, entre otros factores. Estos datos son difíciles de estimar con precisión debido a las condiciones bajo las que se están estudiando ambos proyectos, lo que puede afectar la exactitud de los resultados.

En vista de lo anterior, las estimaciones se basarán en un estudio de envergadura similar, realizado por una empresa consultora para la DGOP, titulado “Análisis de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en proyectos aeroportuarios y de conectividad”.

Se hará uso del análisis realizado para el proyecto “Reposición Puente Quillagua en Ruta 5”, ya que es la obra más similar a los proyectos estudiados. Este puente, ubicado en la Región de Antofagasta, se encuentra a 100 kilómetros de la capital regional, con una extensión de evaluación de 115 metros, y obtuvo un resultado agregado de emisiones totales de 1.551 toneladas de CO₂eq.

Los datos de este informe fueron obtenidos “en base a la información disponible” (EBP Chile SpA et al., 2023), y se encuentran en la Ilustración 41. Para realizar una equivalencia con los puentes en estudio, se calculará las emisiones parametrizadas según área superficial del tablero, que en el caso del Puente Quillagua es de 1.380 metros cuadrados, según indica el informe.

Módulo del ciclo de vida	Subcategoría				% participación
	Infraestructura	Superestructura	Obras complementarias	Terminaciones puentes	
A1-A3	663.381	667.135	120	76.351	91
A4	66.462	28.696	28	6.342	7
A5	16.108	0	610	0	1
B4	1.476	15.101	0	8.954	2
Total [kgCO ₂ eq]	747.427	710.931	758	91.647	1.550.764
% participación	48	46	0	6	

Ilustración 41: Datos agregados de emisiones del Puente Quillagua (EBP Chile SpA et al., 2023).

Se trabajará entonces para las emisiones del módulo A5, considerando super e infra estructura, un valor parametrizado de 11,67 [kgCO₂eq/m²].

RESULTADOS

En la Tabla 29 se presentan los datos obtenidos de emisiones estimadas para el módulo A5 en cada uno de los puentes estudiados. También el nuevo cálculo de emisiones totales, considerando las etapas de producción A1-A3 y las etapas de construcción A4-A5.

Tabla 29: Emisiones estimadas para el módulo A5 en ambos puentes.
Fuente: Elaboración propia

EMISIONES ESTIMADAS MÓDULO A5 Y TOTALES PARA CADA PUENTE			
PUENTE	ÁREA SUPERFICIAL DE TABLERO [m ²]	EMISIONES MÓDULO A5 [tonCO ₂ eq]	EMISIONES TOTALES PROYECTO [tonCO ₂ eq]
MARQUESA	2.189	25,6	1.668
RUBENS	1.197	14,0	2.075

En la Ilustración 42 se presentan los datos de emisiones totales en columnas 100% apiladas para cada puente, agregados por módulo del ciclo de vida, distinguiendo entre producción (A1-A3), transporte al sitio (A4), y construcción e instalación (A5).

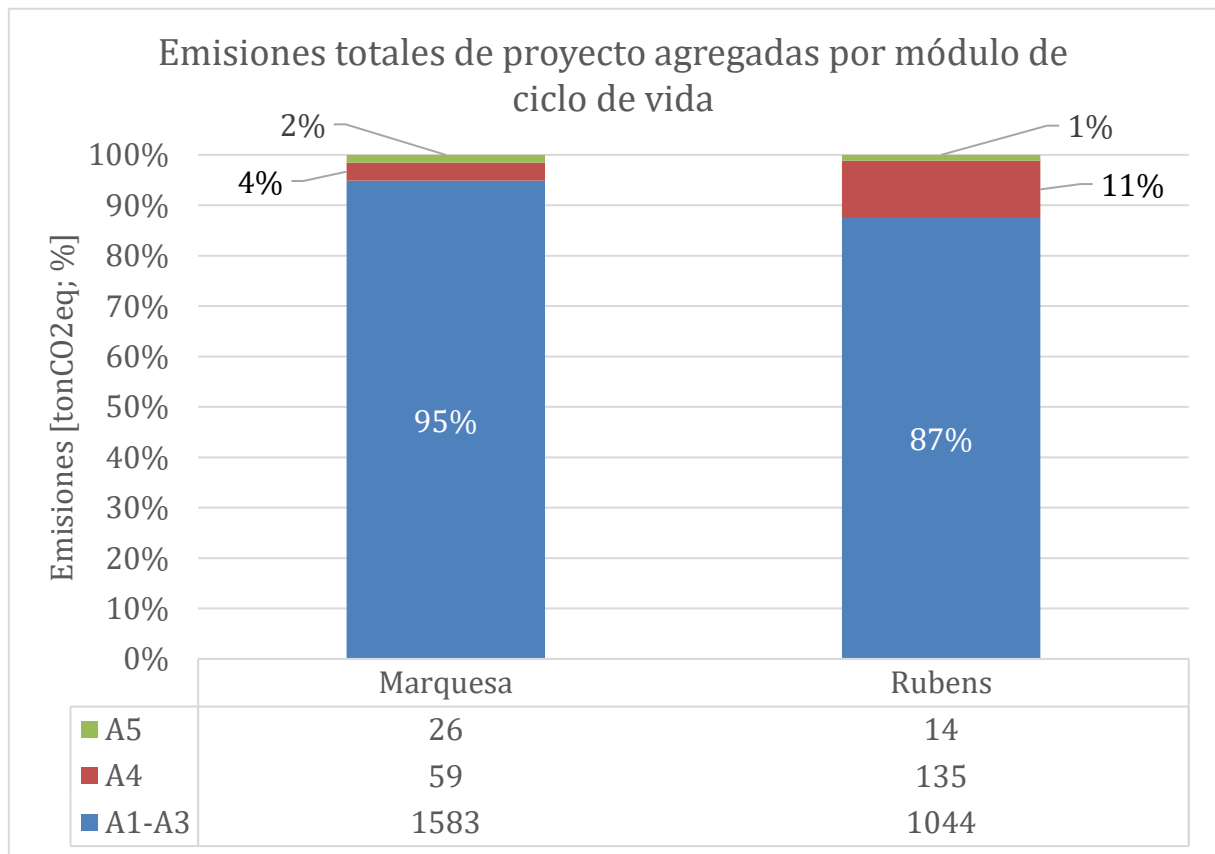


Ilustración 42: Emisiones totales de cada puente considerando etapas de producción y construcción.
Fuente: Elaboración propia

DISCUSIÓN

Estos datos son meramente estimativos, basados en proyecciones realizadas para un proyecto de características y magnitud de emisiones similares. Aunque no corresponden a datos reales de los puentes en estudio, no deberían distar significativamente de la realidad.

El valor parametrizado utilizado para calcular las emisiones del módulo de construcción debería ser similarmente preciso para ambos puentes, dado que la distancia entre la capital regional y el Puente Quillagua se encuentra dentro del rango de las distancias entre la capital regional y la obra para ambos puentes.

En cuanto a las emisiones asociadas al módulo A5, como se observa en el gráfico, estas representan una proporción mínima de los contaminantes generados en cada proyecto, con un 2% para el Puente Marquesa y un 1% para el Puente Rubens.

La mayor parte de las emisiones en el análisis de ciclo de vida sigue correspondiendo a la etapa de producción de materiales, que incluye el suministro de materias primas, el transporte a la fábrica y la manufactura.

Debido a la baja confiabilidad de los datos utilizados en este análisis, se ha decidido excluirlo del cuerpo principal del trabajo de investigación, reconociendo su carácter exploratorio para este caso, pero no desestimable como una vía válida para futuras investigaciones con mayor completitud de datos.

ANEXO B: PUENTE MARQUESA

ANEXO B.1: PLANOS ESTRUCTURA PUENTE MARQUESA

Plano vista en planta

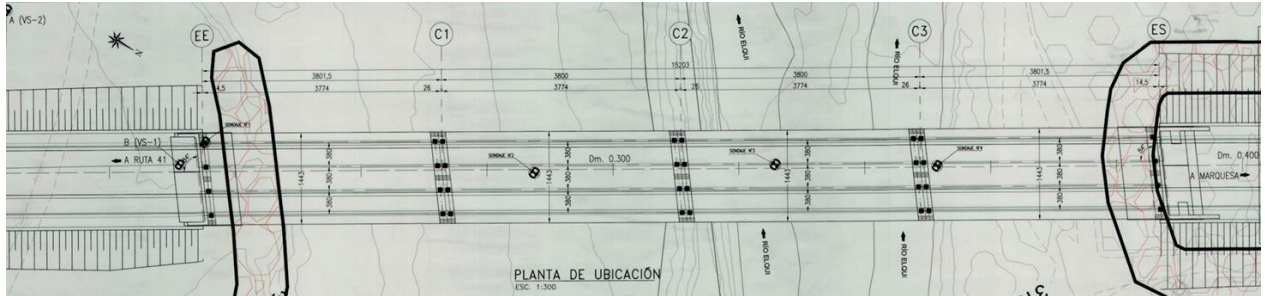


Ilustración 43: Plano vista en planta Puente Marquesa.
Fuente: Antecedentes de licitación.

Plano perfil longitudinal

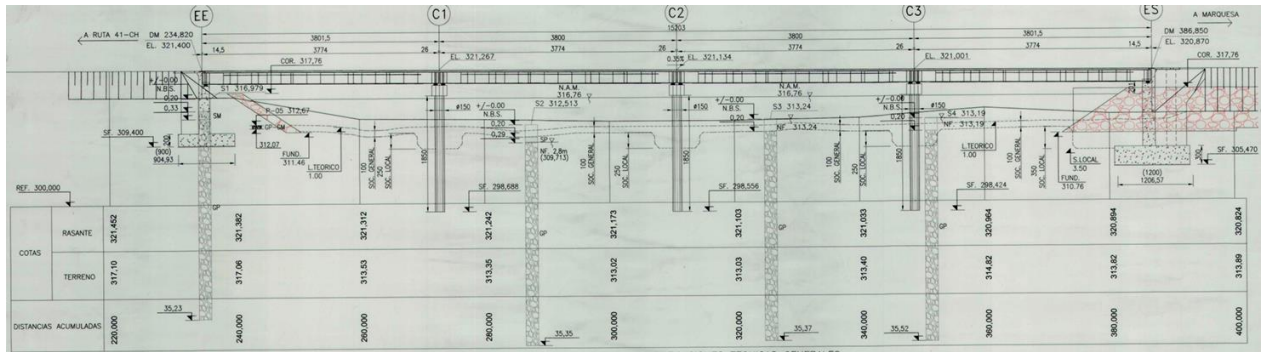


Ilustración 44: Plano perfil longitudinal Puente Marquesa.
Fuente: Antecedentes de licitación.

Plano perfil transversal

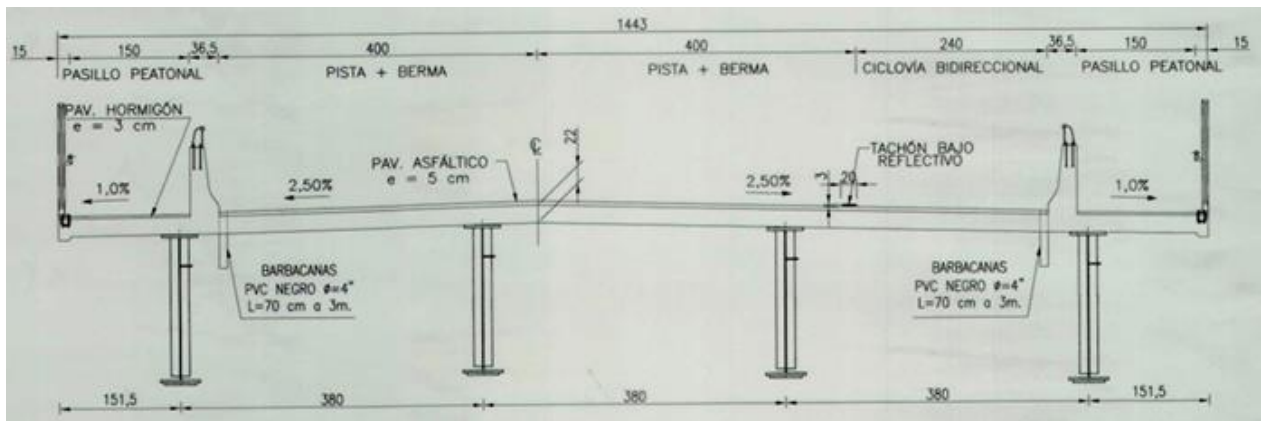


Ilustración 45: Plano sección transversal típica tablero Puente Marquesa.
Fuente: Antecedentes de licitación.

ANEXO B.2: PRESUPUESTO ESTIMATIVO PUENTE MARQUESA.

Se presenta un extracto del presupuesto estimativo total del proyecto, detallando estructura del puente, y subtotal valor proforma.

PRESUPUESTO ESTIMATIVO					
				Codigo	:GID-PEST-R-01
PROYECTO : REPOSICIÓN PUENTE MARQUESA EN RUTA D-215, REGIÓN DE COQUIMBO				Rev. Contenido	:01
CAMINO : PUENTE MARQUESA				Fecha	: 17.02.2023
TRAMO : RUTA 41CH - MARQUESA				QM	:7.5.1
				Responsable	:E.S
ITEM	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNITARIO \$	TOTAL (\$)
C.	ESTRUCTURA				
I	Infraestructura				
202-5	Excavación a Máquina	m3	4,561	10,261	46,801,273
202-6	Excavación a Mano en Seco en Puentes y Estructuras	m3	484	35,448	17,156,704
202-7	Excavación Directa con Agotamiento en Puentes y Estructuras	m3	2,190	44,776	98,059,632
206-2	Relleno Estructural Permeable	m3	2,025	26,119	52,891,754
501-2	Hormigón G10	m3	31	279,851	8,675,367
501-14	Hormigón G25/SM	m3	1,725	419,776	724,113,292
503-2	Acero para Armaduras A630-420H	kg	132,844	3,265	433,725,439
504-1	Moldajes	m2	3,703	69,963	259,071,645
509-1	Pilotes Preexcavados (in situ)	m3	321	2,332,088	748,600,215
II	Estructura				
411-1	Capa de Concreto Asfáltico para Puentes	m3	85	401,119	34,095,125
411-2	Capa de Hormigón para Puentes	m3	7	401,119	2,807,834
412-1	Impermeabilización de Tableros	m2	1,600	18,657	29,850,725
501-14	Hormigón G25/SM	m3	506	419,776	212,406,566
503-2	Acero para Armaduras A630-420H	kg	98,000	3,265	319,962,460
503-2(A)	Acero para Armaduras A630-420H Soldable	kg	500	3,731	1,865,670
504-1	Moldajes	m2	2,480	69,963	173,507,340
507-1	Suministro y Transporte de Vigas Metálicas y Arriostramientos	t	340	3,731,341	1,268,655,817
507-2	Lanzamiento y Colocación de Vigas Metálicas y Arriostramientos	N°	16	13,992,527	223,880,438
511-1	Pintura de Vigas Metálicas y Arriostramientos	m2	3,560	13,993	49,813,398
512-1	Juntas Elastoméricas en Tableros de Puente	m	56	932,835	52,238,769
513-2	Anclajes Antisísmicos, Tableros de Ancho Mayor a 10 m	N°	64	699,626	44,776,088
514-1	Suministro y Colocación de Placas de Apoyo de Neopreno	N°	32	7,462,681	238,805,801
514-1a	Suministro y Colocación de Placas de Neopreno Laterales (Topes Laterales)	N°	32	466,418	14,925,363
615-1	Barbacanas de Desagüe	Gl	1	6,529,846	6,529,846
710-2	Baranda Metálica Peatonal Galvanizada	m	325	279,851	90,951,428
710-3b	Barreras de Hormigón F con Pasamanos	m	325	233,209	75,792,857
515-1	Losas de Acceso	m3	43	373,134	16,044,765
C.	TOTAL ESTRUCTURA				\$ 5,246,005,608
TOTAL COSTO NETO					\$ 11,017,284,627
IVA 19%					\$ 2,093,284,079
VALORES PROFORMA					
Red Se ca					
101-14	Traslado de postación	Gl	1	48,134,294	48,134,294
SS-1	Telecomunicaciones Movistar	Gl	1	11,260,253	11,260,253
SS-2	Telecomunicaciones CLARO	Gl	1	10,336,746	10,336,746
SUB TOTAL VALOR PROFORMA					\$ 69,731,294
					\$ 13,180,300,000


DAVID EDUARDO CORTESCORTES
 JEFE (S) DEPTO. DE PUENTES
 DIRECCIÓN DE VIALIDAD
 Dirección de Vialidad
 21/12/2023

*Ilustración 46: Detalle presupuesto estructura y costo total.
Fuente: Antecedentes de licitación.*

ANEXO C: PUENTE RUBENS

ANEXO C.1: PLANOS ESTRUCTURA PUENTE RUBENS

Plano vista en planta

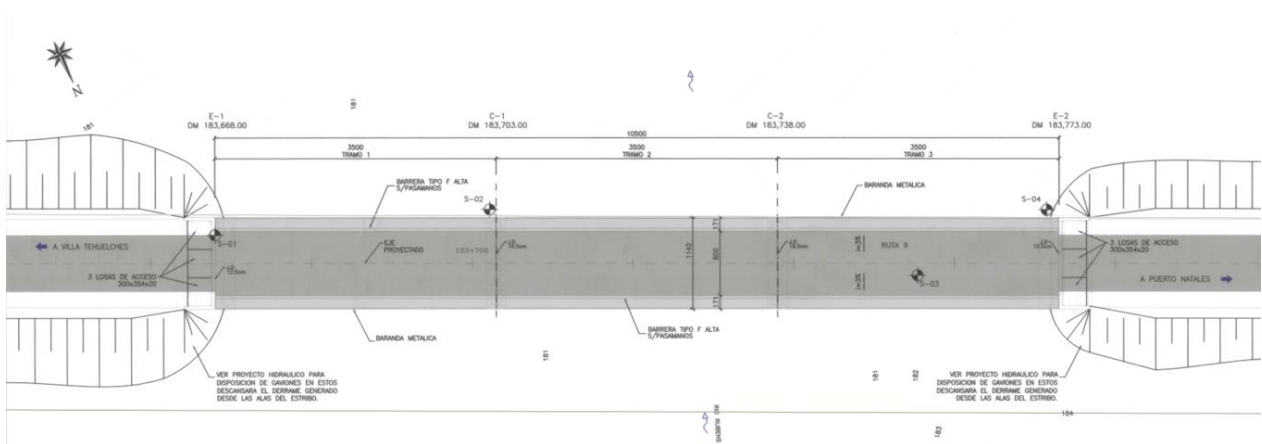
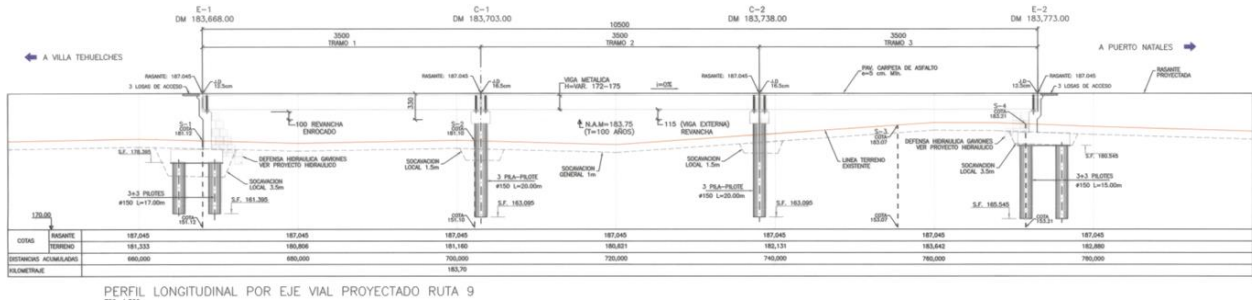


Ilustración 47: Plano vista en planta Puente Rubens.
Fuente: Antecedentes de licitación.

Plano perfil longitudinal



PERFIL LONGITUDINAL POR EJE VIAL PROYECTADO RUTA 9

Ilustración 48: Plano perfil longitudinal Puente Rubens.
Fuente: Antecedentes de licitación.

Plano perfil transversal

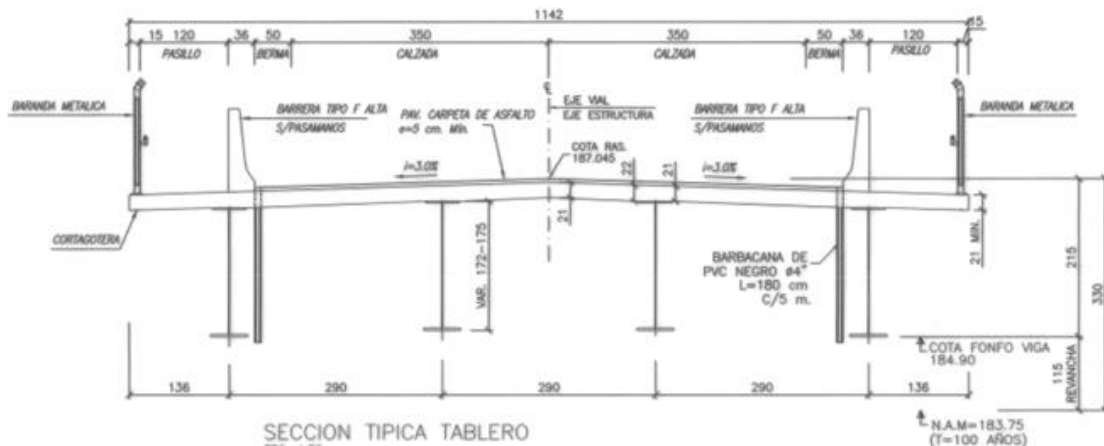


Ilustración 49: Plano sección transversal típica tablero Puente Rubens.
Fuente: Antecedentes de licitación.

ANEXO C.2: PRESUPUESTO ESTIMATIVO PUENTE RUBENS

Se presenta un extracto del presupuesto estimativo total del proyecto, detallando estructura del puente, y subtotal valor proforma.

PRESUPUESTO ESTIMATIVO

ESTUDIO : RUTA 9
SECTOR : PUENTE RUBENS Y ACCESOS
TRAMO : Km 181.668 a Km 185.773,005

ITEM	DESIGNACION	UNIDAD	CANTIDAD	P. UNIT.	TOTAL (\$)
B. PUENTES					
I Infraestructura					
202-5	Excavación a máquina en puentes y estructuras	m3	1.084	25.000	27.100.000
202-6	Excavación a mano en seco en puentes y estructuras	m3	200	45.000	9.000.000
202-7	Excavación directa con agotamiento en puentes y estructuras	m3	1.360	72.000	97.920.000
206-2	Relleno estructural permeable	m3	105	48.000	5.040.000
412-2	Impermeabilización de muros y estribos	m2	350	24.000	8.400.000
501-1	Hormigón G05	m3	14	600.000	8.400.000
501-14	Hormigón G25/sm	m3	520	700.000	364.000.000
503-2	Acero para armaduras a63-42h	Kg	94.884	5.000	474.420.000
504-1	Moldajes	m2	650	130.000	84.500.000
509-1	Pilotes pre-excavados	m3	615	7.000.000	4.305.000.000
515-1	Losa de acceso	m3	14	975.000	13.650.000
1,001	Preparación de pilotes para ensayo de integridad pit	N°	6	6.000.000	36.000.000
II Superestructura					
411-2	Carpeta de hormigón para puentes	m3	50	850.000	42.500.000
501-14	Hormigón G25/SM	m3	295	700.000	206.500.000
503-2	Acero para armaduras a63-42h	Kg	56.500	5.000	282.500.000
503-2A	Acero para armaduras a63-42hs / soldable	Kg	4.000	5.500	22.000.000
504-1	Moldajes	m2	1.550	130.000	201.500.000
507-1	Suministro y transporte de vigas metálicas y arriostramientos	TON	171	6.000.000	1.026.000.000
507-2	Lanzamiento y colocación de vigas metálicas y arriostramientos	N°	12	18.000.000	216.000.000
511-1	Pintura de vigas metálicas y arriostramientos	m2	2.340	80.000	187.200.000
512-1	Junta elastomérica en tableros de puente	m	32	4.800.000	153.600.000
513-2	Sum. y col. de anclajes antisísmicos. tableros ancho mayor a 10m	N°	36	1.300.000	46.800.000
514-1A	Sum. y col. de placas de neopreno 450 x 450 x 130 mm	N°	16	13.000.000	208.000.000
514-1B	Sum. y col. de placas de neopreno 400 x 400 x 152 mm	N°	8	12.000.000	96.000.000
514-1C	Sum. y col. de placas de neopreno laterales y/o topes laterales	N°	64	1.250.000	80.000.000
615-1	Barbacanas de desagüe	GL	1	10.000.000	10.000.000
710-2	Baranda metálica peatonal galvanizada	m	210	380.000	79.800.000
710-3	Barreras de hormigón en puentes	m	210	580.000	121.800.000
III Otros					
101-15	Desarme y/o demolición de puentes existentes	GI	1	130.000.000	130.000.000
B. SUB TOTAL PUENTE					\$ 8.543.630.000

TOTAL NETO	\$ 15.416.965.620
IVA(%)	\$ 2.929.223.468

E. VALORES PROFORMA					
101-14	Traslado de Postación	GI	1	16.000.000	16.000.000
903-1	Refuerzo Gasoducto	GI	1	50.000.000	50.000.000
E. SUB TOTAL VALORES PROFORMA					\$ 66.000.000

TOTAL	\$ 18.412.189.088
--------------	--------------------------


David Cortes C
 JEFE (S) DEPTO DE PUENTES
 MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS DIRE
 Dirección de Vialidad
 2023-07-31 12:09

*Ilustración 50: Detalle presupuesto estructura y costo total Puente Rubens.
Fuente: Antecedentes de licitación.*