



ESTUDIOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN AMÉRICA LATINA

Simulaciones del precio social del carbono en el sector de la infraestructura en países seleccionados de América Latina

Sebastián Vicuña
Carlos Marín
Andrés Pica
Antonio Rivera



NACIONES UNIDAS

CEPAL



Financiado por
la Unión Europea

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

Simulaciones del precio social del carbono en el sector de la infraestructura en países seleccionados de América Latina

Sebastián Vicuña
Carlos Marín
Andrés Pica
Antonio Rivera



NACIONES UNIDAS



Financiado por
la Unión Europea

Este documento fue preparado por Sebastián Vicuña, Carlos Marín, Andrés Pica y Antonio Rivera, Consultores de la Unidad de Economía del Cambio Climático, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa EUROCLIMA+, con financiamiento de la Unión Europea. La coordinación técnica y supervisión del documento estuvieron a cargo de Joseluis Samaniego y Jimmy Ferrer Carbonell, de la División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos de la CEPAL.

Ni la Unión Europea ni ninguna persona que actúe en su nombre es responsable del uso que pueda hacerse de la información contenida en la publicación. Los puntos de vista expresados en este estudio son de los autores y no reflejan necesariamente los puntos de vista de la Unión Europea.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir con las de las Naciones Unidas o las de los países que representan.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2022/126
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.21-00973

Esta publicación debe citarse como: S. Vicuña, "Simulaciones del precio social del carbono en el sector de la infraestructura en países seleccionados de América Latina", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/126), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Índice	3
Resumen	9
Introducción	17
I. Objetivo.....	19
II. Análisis del ciclo de vida de un camino.....	21
A. Introducción al ciclo de vida de un camino o carretera.....	21
1. Fase de producción de materiales.....	22
2. Fase de construcción	23
3. Fase de uso.....	23
4. Fase de mantenimiento/conservación	23
5. Fin de la vida útil.....	23
B. Metodología general para el cálculo de emisiones de CO ₂	23
1. Inventario del ciclo de vida.....	24
C. Cálculo de las emisiones de CO ₂ para proyectos representativos.....	27
1. ACV Proyecto: Carretera Arica-Tambo Quemado (Chile).....	27
2. ACV Proyecto: Carretera Alto Chiza-Cuya (Chile)	35
3. ACV Proyecto: Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa – La Venta (Honduras)	40
III. Evaluación social de un camino	55
A. Evaluación social Proyecto: Carretera Arica-Tambo Quemado (Chile).....	55
B. Evaluación social Proyecto: Carretera Alto Chiza-Cuya (Chile)	57
C. Evaluación social Proyecto: Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa – La Venta (Honduras)	59
IV. Análisis de alternativas para disminuir las emisiones de CO₂ asociadas a un camino.....	61
A. Análisis comparativo de alternativas de tecnologías de asfalto	61

1.	Análisis de ciclo de vida	61
2.	Evaluación social	69
B.	Análisis comparativo distintas soluciones de pavimentación	70
1.	Análisis de ciclo de vida	70
2.	Evaluación social	80
V.	Conclusiones	81
	Bibliografía	83
	Anexos	87
	Anexo 1	88
	Anexo 2	89
	Anexo 3	90
	Anexo 4	91
	Cuadros	
Cuadro 1	Costos y beneficios sociales CO ₂ según fases	12
Cuadro 2	Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios	12
Cuadro 3	Consideraciones para la definición del ciclo de vida de un camino y el cálculo de las emisiones de CO ₂	23
Cuadro 4	Factores de emisión para materiales utilizados en caminos	24
Cuadro 5	Inventario de maquinaria para el ciclo de vida de un camino	25
Cuadro 6	Procedimientos de construcción de un camino o carretera	26
Cuadro 7	Ítems y procedimientos de mantenimiento o conservación de caminos	26
Cuadro 8	Estructura del pavimento de los tramos 1 y 2 del proyecto	27
Cuadro 9	Cantidades de obra del proyecto Arica – Tambo Quemado	28
Cuadro 10	Tránsito medio diario anual (vehículos/día)	32
Cuadro 11	Ponderadores por tipo de vehículo	33
Cuadro 12	Rendimientos de combustibles según tipo de vehículo	33
Cuadro 13	Factores de emisión de combustibles	33
Cuadro 14	Factores de emisión por tipo de vehículo	34
Cuadro 15	Estructura del pavimento del proyecto	35
Cuadro 16	Cantidades de obra del proyecto Alto Chiza - Cuya	36
Cuadro 17	Tránsito medio diario anual (vehículos/día)	39
Cuadro 18	Descripción de los tramos Carretera CA5 Sur	40
Cuadro 19	Cantidades de obra del Tramo 1: Tegucigalpa (Germania) – Desvío Aldea de Santa Rosa	41
Cuadro 20	Cantidades de obra del Tramo 2: Desvío Aldea de Santa Rosa - Cerro de Hula	44
Cuadro 21	Sub-tramos del proyecto La Venta del Sur – Cerro Hula	47
Cuadro 22	Cantidades de obra por kilómetro de proyecto – Tramo 1	47
Cuadro 23	Cantidades de obra por kilómetro de proyecto – Tramo 2	50
Cuadro 24	Tránsito medio diario anual (vehículos/día) Tramo Tegucigalpa- Cerro de Hula	53
Cuadro 25	Tránsito medio diario anual (vehículos/día) Tramo Cerro de Hula- La Venta	53
Cuadro 26	Precio social del carbono para Chile (USD/tCO ₂)	55
Cuadro 27	Costos sociales de CO ₂ fases de Producción de materiales, Construcción y Beneficios sociales de CO ₂ fase de Uso	56
Cuadro 28	Comparación de VAC para distintos escenarios	56
Cuadro 29	Indicadores de rentabilidad proyecto Alto Chiza- Cuya	57

Cuadro 30	Costos sociales CO ₂ fases de Producción de materiales, Construcción y Beneficios sociales de CO ₂ fase de Uso.....	57
Cuadro 31	Precios sociales de los costos de operación.....	58
Cuadro 32	Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios.....	58
Cuadro 33	Indicadores de rentabilidad Pavimentación Concreto Hidráulico	59
Cuadro 34	Costos sociales de CO ₂ fases de Producción de materiales, Construcción y Beneficios sociales de CO ₂ fase de Uso	59
Cuadro 35	Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios.....	60
Cuadro 36	Estructura del pavimento del proyecto Carretera Lo Orozco-Quilpué.....	62
Cuadro 37	Cantidades de obra del proyecto Lo Orozco - Quilpué	62
Cuadro 38	Tránsito medio diario anual (vehículos/día).....	67
Cuadro 39	Indicadores de rentabilidad proyecto Lo Orozco-Quilpué.....	70
Cuadro 40	Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios.....	70
Cuadro 41	Período de diseño de los pavimentos.....	71
Cuadro 41	Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 1: Tegucigalpa (Germania) Desvío Aldea de Santa Rosa para la alternativa en asfalto	71
Cuadro 42	Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 1: Tegucigalpa (Germania) Desvío Aldea de Santa Rosa para la alternativa en concreto	72
Cuadro 44	Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 2: Desvío Aldea de Santa Rosa Cerro de Hula para la alternativa en asfalto.....	73
Cuadro 45	Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 2: Desvío Aldea de Santa Rosa Cerro de Hula para la alternativa en concreto	74
Cuadro 46	Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 3: Cerro de Hula – La Venta del Sur para la alternativa en asfalto	75
Cuadro 47	Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 3: Cerro de Hula – La Venta del Sur para la alternativa en concreto	76
Cuadro 48	Emisiones de CO ₂ asociadas a la fase de uso según tipo de pavimentación.....	78
Cuadro 49	Indicadores de rentabilidad Pavimentación Concreto Hidráulico	80
Cuadro 50	Indicadores de rentabilidad alternativa de Concreto.....	80
Cuadro 51	Indicadores de rentabilidad alternativa de Asfalto	80
Cuadro A1	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ inferior.....	88
Cuadro A2	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ central	88
Cuadro A3	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ superior	88
Cuadro A4	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ inferior.....	89
Cuadro A5	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ central	89
Cuadro A6	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ superior	89
Cuadro A7	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ inferior.....	90
Cuadro A8	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ central	90
Cuadro A9	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ superior	90
Cuadro A10	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ inferior.....	91
Cuadro A11	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ central	91
Cuadro A12	Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO ₂ superior	91
Gráficos		
Gráfico 1	Emisiones de CO ₂ eq por km para Proyecto Alto Chiza- Cuya según fases.....	10
Gráfico 2	Emisiones de CO ₂ eq por km para HMA y WMix, según fase Proyecto Lo Orozco- Quilpué	13
Gráfico 3	Emisiones de CO ₂ para asfalto y concreto según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta, Asfalto.....	14

Gráfico 4	Emisiones de CO ₂ eq según etapas del ciclo de vida para el tramo 1 Proyecto Arica– Tambo Quemado.....	28
Gráfico 5	Emisiones de CO ₂ eq según procedimientos de construcción para el tramo 1 Proyecto Arica– Tambo Quemado.....	29
Gráfico 6	Emisiones totales de CO ₂ eq según etapas del ciclo de vida para el tramo 2 Proyecto Arica– Tambo Quemado.....	30
Gráfico 7	Emisiones de CO ₂ eq según procedimientos de construcción para el tramo 2 Proyecto Arica– Tambo Quemado.....	31
Gráfico 8	Emisiones de CO ₂ eq por km para Proyecto Arica- Tambo quemado según fases.....	34
Gráfico 9	Emisiones totales de CO ₂ eq según etapas del ciclo de vida Proyecto Alto Chiza – Cuya.....	36
Gráfico 10	Emisiones totales de CO ₂ eq según procedimientos de construcción Proyecto Alto Chiza – Cuya.....	37
Gráfico 11	Emisiones de CO ₂ eq por km para Proyecto Alto Chiza- Cuya según fases.....	39
Gráfico 12	Emisiones de CO ₂ eq según etapas del ciclo de vida Tramo 1 Proyecto Tegucigalpa- La Venta (Tegucigalpa - Desvío Aldea Santa Rosa).....	42
Gráfico 13	Emisiones de CO ₂ eq según procedimientos de construcción Tramo 1 Proyecto Tegucigalpa- La Venta (Tegucigalpa - Desvío Aldea Santa Rosa).....	43
Gráfico 14	Emisiones de CO ₂ eq según Etapas del Ciclo de Vida Tramo 2 Proyecto Tegucigalpa La Venta (Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula).....	45
Gráfico 15	Emisiones de CO ₂ eq según procedimientos de construcción Tramo 2 Proyecto Tegucigalpa.....	46
Gráfico 16	Emisiones de CO ₂ eq según etapas del ciclo de vida Tramo 3 – Subtramo 1 Proyecto Tegucigalpa- La Venta.....	48
Gráfico 17	Emisiones de CO ₂ eq según procedimientos de construcción Tramo 3 – Subtramo 1 Proyecto Tegucigalpa – La Venta.....	49
Gráfico 18	Emisiones de CO ₂ eq según etapas del ciclo de vida Tramo 3 – Subtramo 2 Proyecto Tegucigalpa- La Venta.....	51
Gráfico 19	Emisiones de CO ₂ eq según procedimientos de construcción Tramo 3 – Subtramo 2 Proyecto Tegucigalpa- La Venta.....	52
Gráfico 20	Emisiones de CO ₂ eq por km según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta.....	53
Gráfico 21	Emisiones totales de CO ₂ eq según ciclo de vida para estructura con mezcla asfáltica en caliente.....	63
Gráfico 22	Emisiones totales de CO ₂ eq según procedimientos de construcción para estructura con mezcla asfáltica en caliente (HMA) proyecto Lo Orozco – Quilpué.....	64
Gráfico 23	Emisiones totales de CO ₂ eq según las etapas del ciclo de vida para estructura con mezcla asfáltica tibia (WMix).....	65
Gráfico 24	Emisiones totales de CO ₂ eq según procedimientos de construcción para estructura con mezcla asfáltica tibia (WMix).....	66
Gráfico 25	Emisiones de CO ₂ eq por km para HMA y WMix, según fase Proyecto Lo Orozco- Quilpué.....	68
Gráfico 26	Emisiones de CO ₂ eq por km porcentuales para HMA y WMix, según fase Proyecto Lo Orozco- Quilpué.....	68
Gráfico 27	Emisiones de CO ₂ eq por km según etapa del ciclo de vida para el tramo 1.....	72
Gráfico 28	Emisiones de CO ₂ eq por km según las fases de construcción para el tramo 1.....	73
Gráfico 29	Emisiones de CO ₂ eq por km según etapa del ciclo de vida para el tramo 2.....	74
Gráfico 30	Emisiones de CO ₂ eq por km según las fases de construcción para el tramo 2.....	75
Gráfico 31	Emisiones de CO ₂ eq por km según etapa del ciclo de vida para el tramo 3.....	76
Gráfico 32	Emisiones de CO ₂ eq por km según las fases de construcción para el tramo 3.....	77
Gráfico 33	Emisiones de CO ₂ eq por km para los tres tramos y cada tipo de pavimento.....	77

Gráfico 34	Emisiones de CO ₂ para asfalto y concreto según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta, Asfalto.....	78
Gráfico 35	Emisiones de CO ₂ porcentuales para asfalto y concreto según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta, Asfalto.....	79
Diagramas		
Diagrama 1	Ciclo de vida de un Camino pavimentado	10
Diagrama 2	Ciclo de vida de un Camino pavimentado	22
Diagrama 3	Sección transversal tipo para el tramo Dm 17.500 – Dm 43.900	47
Diagrama 4	Sección transversal tipo para el tramo Dm 17.500 – Dm 43.900	50

Resumen

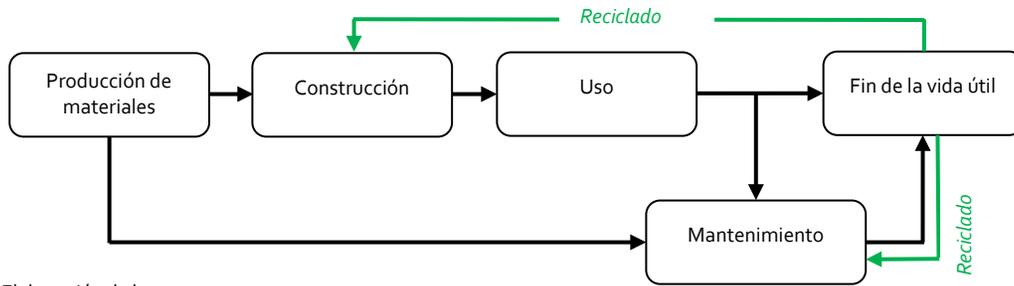
El cambio climático es resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que son generadas fundamentalmente por actividades antropogénicas que se emiten a la atmósfera como una consecuencia colateral de diferentes actividades económicas y estilos de vida. Tomando en consideración sus causas y efectos, el cambio climático es uno de los grandes retos al que se enfrenta la humanidad en el presente siglo.

La comunidad internacional a través del Acuerdo de París se comprometió a trabajar por mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C y en este contexto, los países presentaron a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático sus metas de reducción de emisiones de GEI mediante sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs, por su sigla en inglés). Los países de América Latina y el Caribe se han unido a este compromiso y, por lo tanto, al igual que los países del resto del mundo requieren avanzar hacia un cambio estructural con patrones de producción y de consumo que sean más sostenibles y compatibles con la meta climática.

En este escenario, resulta importante poder contar con un estudio en el que se presenten los resultados de simulaciones con distintos precios social del carbono sobre una tipología de proyectos de inversión en el sector infraestructura y las actividades relacionadas con las obras civiles en países seleccionados. En este sentido, este estudio busca realizar simulaciones con distintos escenarios de precios del carbono para el sector infraestructura de caminos en Chile y Honduras y determinar cuál sería su impacto sobre una tipología de proyectos de inversión en este sector. Con este estudio también se pretende incentivar la generación de propuestas de políticas públicas frente al cambio climático que permitan contribuir al cumplimiento de las metas planteadas en sus NDCs.

Un concepto fundamental para comenzar este estudio es el análisis de ciclo de vida (ACV), técnica utilizada para cuantificar los impactos medio ambientales durante las distintas etapas del ciclo de vida de un camino o carretera, incluyendo la adquisición de material, la producción en planta, el transporte, la construcción, el mantenimiento, el uso y el fin de la vida útil (Chen & Wang, 2018). De acuerdo con la información analizada, se propone el ciclo de vida de un camino o carretera como lo muestra el Diagrama 1 y que es el marco general conceptual de esta publicación.

Diagrama 1
Ciclo de vida de un Camino pavimentado



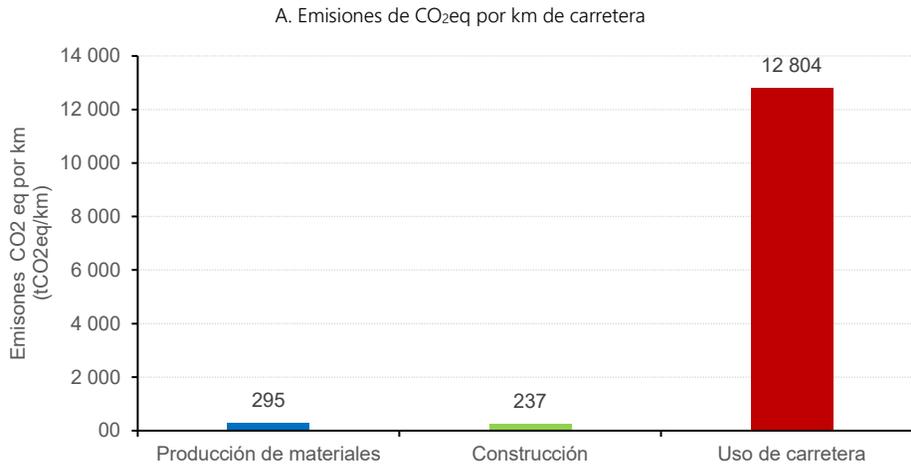
Fuente: Elaboración de los autores.

Una vez definido el ciclo de vida del camino es necesario formular el inventario del ciclo de vida, pues con este será posible estimar las emisiones de GEI. Para construir el inventario del ciclo de vida es esencial obtener la información de ubicaciones de los proyectos tipo, de los factores de emisión tanto de los materiales, la maquinaria y los procesos de construcción y mantenimiento del camino y la información de evaluación social del proyecto. Esta información es relevante para calcular los supuestos de flujos estimados, ahorros de combustible, apoyar en la toma de decisiones cuando se comparan alternativas, entre otros elementos.

En resumen, en el presente estudio se propone un marco conceptual para el cálculo de las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un camino, describiendo las distintas etapas y ajustándolo a la realidad de los países bajo estudio, pero estas metodologías son extrapolables para otros países de la región de Latinoamérica y el Caribe.

Se realizaron 3 experiencias prácticas donde se construyeron análisis de ciclo de vida para las fases de producción de materiales, construcción y uso del camino. Los resultados obtenidos en todos los casos de estudio nos dieron resultados similares, a modo de ejemplo en este resumen ejecutivo, presentamos los resultados obtenidos en el proyecto "Reposición Pavimento y Construcción 3era pista Ruta 5, Sector Alto Chiza – Cuya, Provincia de Tamarugal, Región de Tarapacá, Chile", el que consiste en la reposición de la carpeta asfáltica y tiene una longitud efectiva de 18 km. En el gráfico 1 se muestran las emisiones por kilómetro de carretera para las fases del proyecto.

Gráfico 1
Emisiones de CO₂eq por km para Proyecto Alto Chiza- Cuya según fases



Fuente: Elaboración de los autores.



Fuente: Elaboración de los autores.

A través de este gráfico es posible concluir que la fase de uso origina la mayor cantidad de emisiones de GEI, equivaliendo al 96%. Esto no sucede exactamente de la misma forma para caminos de concreto. Según Hultqvist (2010) y Vashisth & Kumar (2018) un camión completamente cargado consume un 6,7% menos de combustible y un automóvil de pasajeros consume un 1,1% menos de combustible en un camino de pavimento de concreto en comparación con la sección de pavimento de asfalto, en contrapartida las emisiones de las fases de producción de materiales y construcción son mayores para concreto. Pero en términos relativos sigue siendo la fase de uso la que domina las emisiones de CO₂.

Del análisis de las 3 experiencias prácticas es posible concluir que la mayor parte de las emisiones suelen estar asociadas a la fase de uso (entre 97% para el camino de concreto y 96-98% para los caminos de asfalto), teniendo poco peso relativo las emisiones de la fase de producción de materiales (3% para el camino de concreto y 1-2% para los caminos de asfalto) y la de construcción (menos de 1% para el camino de concreto y 1-2% para los caminos de asfalto). Evidentemente la fase de uso podría variar, dependiendo de los flujos de transporte proyectados para el camino en específico, por lo que la variabilidad de esta etapa es alta. Sin embargo, la variabilidad para las fases de producción de materiales y construcción, dependen principalmente de la materialidad del camino.

Luego de determinar las emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida del proyecto, se evaluó cómo afectan los costos y beneficios sociales de CO₂ sobre la rentabilidad de cada proyecto, este análisis se conoce como la evaluación social. Se analizaron las mismas 3 experiencias prácticas, y se evaluaron 3 escenarios según precio social del CO₂: precio inferior de 20,2, precio central de 32,5 y precio superior de 43,2 USD/t CO₂ (Subsecretaría de Evaluación Social, 2017), debido a que es el único país de los 5 estudiados que tiene un valor de referencia oficial.

Siguiendo con el análisis del proyecto "Reposición Pavimento y Construcción 3era pista Ruta 5, Sector Alto Chiza – Cuya, Provincia de Tamarugal, Región de Tarapacá, Chile", se tiene que el proyecto como tal, sin incluir los precios de CO₂, y utilizando una tasa de descuento del 6%, tiene un VAN de 10,75 MM USD y una TIR de 9,5%. Se valorizaron las emisiones de GEI asociadas a las fases de producción de materiales y construcción y se obtuvieron los siguientes costos sociales. Este costo se considera únicamente en el año de construcción, es decir, cuando ocurre la inversión. Luego, se valorizó la

reducción de emisiones asociada al ahorro de combustible del tráfico vehicular en la carretera y se obtuvieron los beneficios sociales anuales que se consideran durante los 20 años de vida útil del proyecto. En el cuadro 1 se presentan dichos valores.

Cuadro 1
Costos y beneficios sociales CO₂ según fases
(En dólares)

	Costos sociales CO ₂ Fases de Producción de materiales y Construcción	Beneficios sociales CO ₂ Fase de Uso
Precio CO ₂ inferior	\$0,10 MM	\$0,90 MM
Precio CO ₂ central	\$0,16 MM	\$1,44 MM
Precio CO ₂ superior	\$0,22 MM	\$1,91 MM

Fuente: Elaboración de los autores.

Como se aprecia en el cuadro 1, por cada tonelada emitida en la fase de inversión, se evitan nueve toneladas en la fase de uso (esta relación varía dependiendo del proyecto, pero de los casos analizados la relación fue entre 4 y 9 veces), por lo que el impacto neto es positivo desde una perspectiva ambiental. Finalmente, a modo de resumen se comparan los indicadores de rentabilidad tras incorporar la evaluación social.

Cuadro 2
Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios

	VAN (MM USD)	Cambio porcentual en el VAN frente a proyecto sin precio social CO ₂ (en porcentajes)	TIR (%)	Cambio absoluto en la TIR frente a proyecto sin precio social CO ₂ (en porcentajes)
Proyecto sin Precio social CO ₂	10,48	-	9,7	-
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	11,31	8	10,0	0,3
Proyecto con Precio social CO ₂ central	11,82	13	10,2	0,5
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	12,26	17	10,3	0,6

Fuente: Elaboración de los autores.

Del Cuadro se concluye que el impacto de los costos y beneficios sociales es significativo en la rentabilidad del proyecto pues el VAN y la TIR aumentan, lo que lo hace más atractivo socialmente, esto pese a que hay costos sociales asociados a la inversión, estos son compensados a lo largo de la operación, producto de los ahorros de combustible. En este sentido, el mayor incentivo es que los costos operacionales sociales disminuyen haciendo el proyecto, lo que se traduce en menores emisiones por el uso de la carretera rehabilitada.

Como resultado del análisis de evaluación social se obtuvo que, los proyectos que realizaron una evaluación por medio de un análisis de costo-beneficio, pese al incremento en los costos asociadas a la inversión, los emisiones evitadas en la fase de uso, generaron un incremento en los ahorros sociales, lo que implicó mejoras en los VAN (8%-17% mayor para un proyecto y 6%-13% en el otro) y TIR (0,6%-1,3% mayor para un proyecto y 0,3%-0,6% en el otro) de ambos proyectos, esto ocurrió para todos los escenarios de precio social del carbono, siendo más beneficiosos los escenarios de alto precio al carbono. En el caso del proyecto que había sido evaluado por la metodología de costo efectividad, en este caso

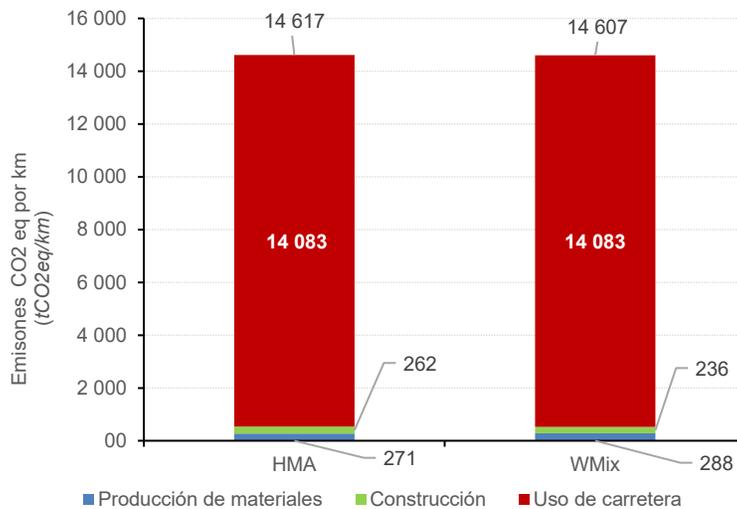
los resultados son equivalentes a los que utilizan metodología de costo-beneficio, implicando una mejora en el VAC, disminuyendo su valor (entre 2,8% y 6,1% dependiendo del PSC).

El siguiente análisis consistió en evaluar alternativas para disminuir las emisiones de GEI asociadas a un camino. En el primer caso se analizó la posibilidad de utilizar 2 formas de construcción con asfalto: mezcla caliente (técnica tradicional, a la que se le llamó HMA) y mezcla tibia (técnica de menores emisiones, a la que se le llamó WMix). Esta comparación se realizó para el proyecto “Mejoramiento Ruta F.50, sector Orozco – Quilpué, Provincia de Valparaíso, Región de Valparaíso, Chile”.

Al utilizar una mezcla asfáltica tibia se reducen las emisiones GEI para las fases de producción de materiales y construcción, esta reducción se justifica principalmente por el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, producto que la fabricación de una mezcla tibia emite un 45% menos de CO₂eq comparado con una mezcla asfáltica en caliente. Las tecnologías deben seguir avanzando en la búsqueda de aditivos más eficientes que permitan reducir en mayor proporción las temperaturas tanto de mezclado como de compactación de las mezclas asfálticas. De esta forma, es posible conseguir una mayor reducción de las emisiones al requerir menores temperaturas en planta, además de promover un ahorro energético al utilizar menor cantidad de combustible.

Complementariamente, según la Asociación europea de pavimento de asfalto (EAPA, por sus siglas en inglés) se ha demostrado con casos de estudio en Alemania y Noruega que el rendimiento de ambas alternativas es similar, por lo que las emisiones asociadas a la fase de uso no deberían cambiar según la alternativa de asfalto. En el gráfico 2 se muestran las emisiones de GEI por kilómetro de proyecto para cada alternativa.

Gráfico 2
Emisiones de CO₂eq por km para HMA y WMix, según fase Proyecto Lo Orozco- Quilpué
(En emisiones de CO₂eq por km de carretera)



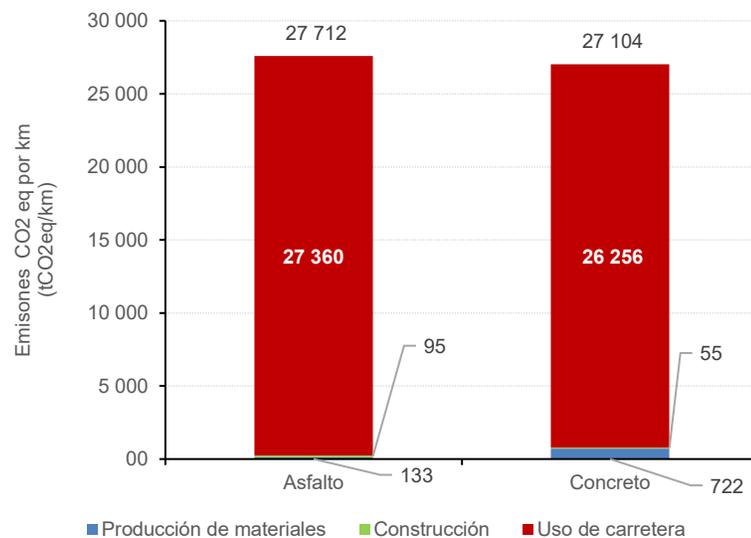
Fuente: Elaboración de los autores.

Se concluye que la fase de uso es la que más aporta a las emisiones. Sin embargo, dentro de las posibilidades para bajar la huella de carbono, se debe tener foco en las fases de producción de materiales y construcción, en donde la alternativa de WMix es la que menos emite, alcanzando las 523 tCO₂eq/km, mientras que la alternativa de HMA alcanza las 534 tCO₂eq/km, es decir, la alternativa de

WMix produce 2% menos de emisiones. Por lo tanto, se debería preferir frente a la alternativa comúnmente utilizada de HMA. Sin embargo, dado que el grueso de las emisiones se produce en la fase de uso y que no hay diferencias en la eficiencia de los vehículos entre estas tecnologías, el impacto en las 3 fases es solo de un 0,1%.

En el segundo caso se analizó las emisiones de CO₂ en las 3 fases para un proyecto de camino, evaluando las alternativas de usar concreto o asfalto. Este ejercicio resulta particularmente interesante dado que el concreto tiene mayores emisiones en la fase de construcción del camino, pero es más durable (lo que implica menos mantenciones) y permite una eficiencia media mayores de los vehículos que usarán ese camino en la fase de uso. Esta comparación se realizó para el proyecto "Ampliación y mejoramiento de la carretera CA-5 Sur Tegucigalpa (Germania) – Valle de Hula". En el gráfico 3 se muestran las emisiones de GEI por kilómetro para ambas alternativas.

Gráfico 3
Emisiones de CO₂ para asfalto y concreto según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta, Asfalto
(En emisiones de CO₂ por km carretera)



Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados estiman que en la etapa de construcción un pavimento de asfalto emite entre un 20% y un 33% de las emisiones que emite un pavimento de concreto (esto sin considerar la etapa de mantenimiento o conservación). Pero dado que el peso relativo de la fase de uso es enorme para ambas alternativas (99% para asfalto y 97% en el caso del concreto), mejorar la eficiencia en el consumo de combustible para los vehículos que usaron ese camino en la fase de uso, aunque sea en valores aparentemente bajos (4% en promedio), termina dando emisiones totales más bajas.

Al incorporar los distintos PSC al análisis, estos resultados tienen a su vez un impacto equivalente en la evaluación social, ambas alternativas mejoran sus VAN (6%-13% mayor para el proyecto de concreto y 7%-15% mayor para el proyecto de asfalto) y TIR (0,6%-1,3% mayor para el proyecto de concreto y 1,1%-2,2% mayor para el proyecto de asfalto), volviéndose más rentables socialmente al incorporar un PSC y este impacto es mejor a mayor valor del PSC. Por otro lado, la solución más rentable es la de concreto, con un VAN que va desde 110,24 a 117,35 MM USD, de manera equivalente a los resultados sin incorporar PSC, mientras que la solución de asfalto alcanza un VAN que va desde 90,60 a 97,54 MM USD. Por lo que, en la práctica, no cambia la decisión en el proyecto analizado, pero acentúa

el resultado ya obtenido, lo que, en el caso de otro proyecto de camino, esta diferencia si podría implicar la diferencia para superar el criterio de rentabilidad social.

En conclusión, las emisiones estimadas para la fase de uso de la carretera representan más del 95% del total de las emisiones en el ciclo de vida, para todos los caminos y diferentes tecnologías constructivas analizadas en este estudio, lo que es consecuente con lo reportado en la literatura. Esto indica que es fundamental buscar alternativas que conlleven a la reducción de las emisiones en esta fase como por ejemplo: el cambio de combustible de los vehículos (biocombustibles, hidrogeno verde, combustibles sintéticos verdes o vehículos eléctricos), mejoramiento constante de la regularidad superficial de los pavimentos, superficies con fricción determinada, soluciones de cambio modal (traspasar una parte del transporte interurbano de carga y pasajeros a medios de menos emisiones, como el ferrocarril), entre otros.

En términos del impacto en la evaluación social de los proyectos de camino, la incorporación de un PSC en el rango de los valores utilizados por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile (20,2 a 43,2 USD/t CO₂), tendría un impacto positivo en la evaluación social de proyectos de caminos haciéndolos más rentable en todos los casos analizados, este beneficio es mayor a PSC más altos. Para futuros análisis es recomendable hacer estudios de los proyectos considerando periodos de tiempo más extensos, permitiendo comparar alternativas en el ciclo de vida del camino, teniendo en cuenta, tasas de descuento menores (5% o menos) o decrecientes en el tiempo. Además de incorporar las emisiones y los costos sociales del carbono de la fase de mantención de los caminos, lo que puede ser relevante en la comparación de soluciones entre hormigón y asfalto.

Introducción

El cambio climático es resultado de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que son generadas fundamentalmente por actividades antropogénicas que se emiten a la atmósfera como una consecuencia colateral de diferentes actividades económicas y estilos de vida. El cambio climático se manifiesta fundamentalmente en el aumento de temperatura, modificaciones en los patrones de precipitación, en alzas del nivel del mar, en reducciones de los glaciales y en cambios en los patrones climáticos extremos. Estos cambios o variabilidad climática inciden de diversas formas y tienen numerosas consecuencias sobre las actividades económicas, los estilos de vida, el bienestar de la población y la biodiversidad y ecosistemas.

Tomando en consideración sus causas y efectos, el cambio climático es uno de los grandes retos al que se enfrenta la humanidad en el presente siglo. La comunidad internacional a través del Acuerdo de París se comprometió a trabajar por mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2°C y en este contexto, los países presentaron a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático sus metas de reducción de emisiones de GEI mediante sus Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDCs, por su sigla en inglés). Los países de América Latina y el Caribe se han unido a este compromiso y, por lo tanto, al igual que los países del resto del mundo requieren avanzar hacia un cambio estructural con patrones de producción y de consumo que sean más sostenibles y compatibles con la meta climática.

Muchos países para avanzar hacia este objetivo han realizado cambios regulatorios, a la política fiscal y a los incentivos económicos; sin embargo, el actual sistema de valoración de las emisiones no necesariamente toma en cuenta todas las variables relevantes y por lo tanto puede estar sesgado. En este escenario, resulta importante poder contar con un estudio en el que se presenten los resultados de simulaciones con distintos precios social del carbono sobre una tipología de proyectos de inversión en el sector infraestructura y las actividades relacionadas con las obras civiles en América Latina y el Caribe. En este contexto, la CEPAL a través del programa Euroclima+ busca proporcionar a los tomadores de decisión de los países de América Latina información actualizada y apoyarlos en la elaboración de documentos técnicos y de diagnóstico que sirva de insumo en el diseño de políticas públicas frente al cambio climático.

I. Objetivo

El objetivo general del presente estudio es realizar simulaciones con distintos escenarios de precios del carbono para el sector infraestructura de caminos en países seleccionados de América Latina (Chile y Honduras) y determinar cuál sería su impacto sobre una tipología de proyectos de inversión en este sector. Con este estudio también se pretende incentivar la generación de propuestas de políticas públicas frente al cambio climático que permitan contribuir al cumplimiento de las metas planteadas en sus NDCs.

II. Análisis del ciclo de vida de un camino

Para realizar un análisis del ciclo de vida de un camino o carretera representativa de países de América Latina es necesario homogeneizar la experiencia regional y la experiencia internacional relacionada con la temática, lo que permitirá realizar ajustes metodológicos que representen de la mejor manera posible la realidad de cada uno de los países.

A. Introducción al ciclo de vida de un camino o carretera

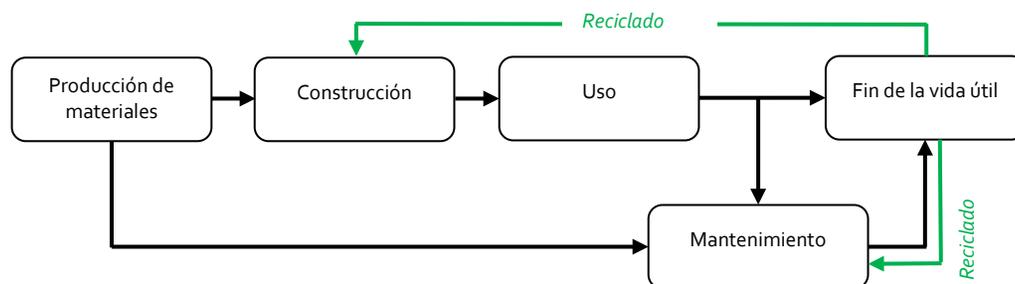
La evaluación del ciclo de vida de un camino o carretera es un concepto integral y holístico para la evaluación ambiental de prácticas sostenibles. Es utilizado para cuantificar los impactos medio ambientales durante las distintas etapas del ciclo de vida de un camino o carretera, incluyendo la adquisición de material, la producción en planta, el transporte, la construcción, el mantenimiento, el uso y el fin de la vida útil (Chen & Wang, 2018). Para definir el ciclo de vida de un camino o carretera se realizó una búsqueda bibliográfica de distintos reportes y artículos científicos que permitiera proponer un esquema coherente, confiable y representativo cuyos resultados pudieran ser verificados y comparados con otras investigaciones o informes de literatura. A continuación, se presenta un resumen de la información principalmente consultada:

- **Life-cycle Assessment of Pavements. Part I: Critical Review** (Santero, Masanet, & Horvarth, 2011): En este artículo se expone una revisión de la literatura sobre los distintos enfoques propuestos para estimar el impacto medioambiental durante el ciclo de vida de un pavimento. Se destacan algunas fallas que impiden entregar conclusiones globales sobre la elección de materiales, de estrategias de conservación, de vidas de diseño y otras políticas de mejores prácticas para alcanzar los objetivos de la sostenibilidad. Para mejorar estas deficiencias, los autores proponen estandarizar las unidades funcionales, expandir los límites del sistema del ciclo de vida, mejorar la calidad y confiabilidad de los datos y estudiar conceptos y propuestas en otros países. Estas propuestas de mejora permitirán que las estimaciones de los impactos ambientales sean comparables y homogéneos, y se evitará emitir conclusiones independientes y aisladas.

- **Pavement Life Cycle Assessment Framework** (Federal Highway Administration, 2016): Este documento oficial de la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos propone como primer intento un marco conceptual del ciclo de vida de un pavimento, haciendo énfasis en su conceptualización general, la metodología, los límites del sistema y los vacíos en el conocimiento considerados como importantes para trabajos futuros. Este documento se enfoca principalmente en la estructura del pavimento y no discute los otros elementos que componen una infraestructura vial carretera.
- **Roadprint: Practical Pavement Life Cycle Assessment (LCA) Using Generally Available Data** (Muench, Lin, & Armstrong, 2014): Se describe una nueva propuesta para analizar el ciclo de vida de un pavimento y estimar los impactos medioambientales. Presenta una definición del ciclo de vida, los procesos involucrados y su definición. También desarrolla brevemente un estado de la práctica sobre las herramientas más conocidas para evaluar el ciclo de vida de un pavimento.
- **Life-Cycle Assessment (LCA) – A Primer** (National Center for Asphalt Technology, 2011): Este documento presenta un resumen del concepto de ciclo de vida propuesto en las normas ISO, las fases que lo componen y la información que debe contener el inventario para su análisis. Utiliza lo descrito anteriormente para proponer un ciclo de vida de un pavimento y las variables que intervienen. También describe de manera general los principales cuestionamientos que deben ser resueltos en cada una de las etapas que componen el ciclo de vida.

De acuerdo con la información analizada, se propone el ciclo de vida de un camino o carretera como lo muestra el diagrama 2 y que es el marco general conceptual de este estudio.

Diagrama 2
Ciclo de vida de un camino pavimentado



Fuente: Elaboración propia.

1. Fase de producción de materiales

Para modelar la etapa de producción de material se requiere que cada entrada de material en el sistema del camino sea caracterizada por un inventario del ciclo de vida (LCI por sus siglas en inglés Life-Cycle Inventory) que incluye los siguientes procesos: adquisición de material crudo o virgen (por ejemplo: exploración y extracción del crudo de petróleo), producción del material (por ejemplo: todos los procesos de transformación desde el material virgen hasta el material terminado o producto como el refinado y el manufacturado), procesos de mezclado (por ejemplo: plantas de asfalto o de hormigón), y transporte del material virgen o terminado entre las etapas.

2. Fase de construcción

Esta etapa incluye todos los procesos y equipos asociados con la construcción de un camino nuevo. Para modelar esta etapa se requiere que sean considerados los siguientes procesos e impactos:

- Movilización y desmovilización de los equipos (transporte de equipos hasta y desde el sitio de proyecto).
- Equipo utilizado en el sitio.
- Transporte de materiales, incluyendo el agua, al sitio de obra.
- Transporte de materiales desde la obra para su disposición final, reutilización o reciclado.
- Preparación del sitio y del producto, compactación, terminado, limpieza, disposición de desechos.

En este estudio no se tienen en cuenta los cambios del tránsito en el tiempo tanto en el modelo base o en el análisis de sensibilidad. No se incluyen los cambios tanto en el crecimiento del tránsito y su composición (por ejemplo: mezcla de tipo de vehículos y tecnología).

3. Fase de uso

Se refiere al período durante el cual el pavimento está en servicio y está interactuando con el tránsito y con el medioambiente.

4. Fase de mantenimiento/conservación

Son las actividades aplicadas varias veces a través de la vida del pavimento para mantener su serviciabilidad.

5. Fin de la vida útil

Esta etapa se refiere a la disposición final, reutilización, procesado o reciclado del pavimento después de que ha alcanzado su fin de vida útil.

B. Metodología general para el cálculo de emisiones de CO₂

Para realizar un análisis del ciclo de vida de un camino o carretera se requiere la definición de algunas consideraciones, las que permitirán estimar la cantidad de emisiones de CO₂ y realizar los análisis de sensibilidad respecto al precio social del carbono. El cuadro 3 presenta las consideraciones propuestas para este trabajo.

Cuadro 3
Consideraciones para la definición del ciclo de vida de un camino y el cálculo de las emisiones de CO₂

Consideración	Descripción
Unidad funcional Límites del sistema	Km de carretera Se incorporan las fases de producción de material, construcción y uso.
Certeza y calidad de los datos	Se realizó una revisión de la literatura principalmente en artículos científicos publicados en revistas indexadas e informes de instituciones gubernamentales o universidades con buena reputación.

Consideración	Descripción
Alcance del inventario del ciclo de vida	Se consideran las emisiones de los materiales, de la maquinaria, del transporte, y de los procesos de construcción del camino o carretera.
General	Se evalúa la magnitud y significancia de los potenciales impactos ambientales en cada etapa. Este estudio se limitó a las emisiones de CO ₂ equivalente. Se considera una distancia de transporte aproximada según las condiciones reportadas para cada proyecto tanto para la obtención y fabricación de materiales como para la disposición en botadero. Se considera un horizonte de evaluación en el tiempo de 20 años (tiempo generalmente asociado a la duración de un contrato de concesión).

Fuente: Elaboración propia.

1. Inventario del ciclo de vida

Para construir el inventario del ciclo de vida es esencial obtener la información de cubriciones de los proyectos tipo, de los factores de emisión tanto de los materiales, la maquinaria y los procesos de construcción y mantenimiento del camino y la información de evaluación social del proyecto. Esta información es relevante para calcular los supuestos de flujos estimados, ahorros de combustible, apoyar en la toma de decisiones cuando se comparan alternativas, entre otros elementos.

Las fuentes de datos del inventario del ciclo de vida fueron obtenidas de bases de datos en línea, artículos científicos en revistas indexadas, artículos de conferencias y reportes publicados por agencias gubernamentales e instituciones académicas de distintos países.

a) Inventario de materiales

El inventario de materiales consiste básicamente de dos tipos de información: la identificación de los distintos tipos de materiales utilizados durante el ciclo de vida de un camino o carretera y su correspondiente valor de factor de emisión asociado, y la cuantificación de materiales utilizados durante el ciclo de vida del camino (estas cantidades se levantaron para los proyectos tipo analizados para Latinoamérica y el Caribe). Los factores de emisión de dichos materiales fueron consultados y obtenidos de la literatura. Para ello, se estudiaron distintas bases de datos tanto de propuestas de organismos internacionales como de universidades e institutos de investigación. El cuadro 4 muestra los materiales con sus respectivos factores de emisión y las fuentes consultadas.

Cuadro 4
Factores de emisión para materiales utilizados en caminos

Material	Factor de emisión (Kg CO ₂ eq/t)	Fuente
Agregados	10	(Chehovits & Galehouse, 2010)
Asfalto (ligante asfáltico)	248	(Nitta & Nishizaki, 2008)
Emulsión asfáltica	221	(Chehovits & Galehouse, 2010)
Aditivo para asfalto (polímero)	160 3 715	(Nitta & Nishizaki, 2008) (Eurobitume, 2012)
Cemento	581	(Instituto del Cemento y del Hormigón Chileno - FICEM, 2019)
Aditivos para hormigón	720	(Zhang, Liu, & Wang, 2014)
Agua	0,3 0,2	(Chehovits & Galehouse, 2010) (Zhang, Liu, & Wang, 2014)
RAP	0,6 0,8	(University of California, 2007) (Chehovits & Galehouse, 2010)

Material	Factor de emisión (Kg CO ₂ eq/t)	Fuente
FRAP (RAP fraccionado)	4,35	(University of California, 2007)
Acero	3 540 3 040	(Chehovits & Galehouse, 2010) (Liébana, Pulido, & Gómez-Hermoso, 2015)
Cal	785	(IPCC, 1996)
Cal dolomítica	913	(IPCC, 1996)
Ceniza volante	27	(Zhang, Liu, & Wang, 2014)
Geosintéticos	1 600	(Geosynthetica, 2019)

Fuente: Elaboración propia.

b) Inventario de maquinaria

Se construyó un inventario de las principales maquinarias involucradas en todo el ciclo de vida de un camino. Las principales maquinarias identificadas dentro de las etapas del ciclo de vida se muestran en la Cuadro 5.

Cuadro 5
Inventario de maquinaria para el ciclo de vida de un camino

Maquina tipo	
Asfaltadora (Finisher)	Motoniveladora
Tren pavimentador de hormigón	Camión imprimante
Bulldozer	Camión aljibe o camión guatero
Excavadora	Compactadores neumáticos
Cargador frontal	Compactadores de rodillo (tandem) para asfalto
Fresadoras	Compactadores de suelos
Estabilizadora de suelos	Spreader (esparcidor de cementante)
Recicladora en frío	Camión articulado dumper

Fuente: Elaboración propia.

Este inventario permite estimar el factor de emisión o la contribución en términos de emisiones de CO₂ de cada una de las máquinas que se involucran en el ciclo de vida de un camino o carretera. Para ello se llevaron a cabo dos actividades fundamentales: el levantamiento de datos y especificaciones de cada máquina (rendimiento o producción, consumo de combustible, tipo de combustible) y la estimación del factor de emisión de acuerdo con las especificaciones consultadas.

c) Inventario de procedimientos de construcción y mantenimiento

Esta información fue consultada principalmente en el Manual de Carreteras de Chile en su versión 2018, el cual es el documento oficial que contiene todas las especificaciones técnicas de construcción para proyectos de caminos o carreteras. El cuadro 6 presenta los principales procedimientos de construcción asociados a la materialización de un camino o carretera.

Cuadro 6
Procedimientos de construcción de un camino o carretera

Procedimiento	Sub-proceso
Preparación del área de trabajo	Demolición y remociones (material inadecuado) Demoliciones y remociones (Pavimentos hormigón) Demoliciones y remociones (Pavimento asfalto) Despeje y limpieza de la faja
Movimientos de tierras	Excavación general abierta (TCN-Terreno Cualquier Naturaleza) Excavación general abierta (Roca) Colocación geotextil (estabilización de suelos) Formación y compactación de terraplenes Preparación de la subrasante
Capas granulares	Subbase granular Base granular Granulares de rodadura Bases y granulares tratados con cemento Bases abiertas ligadas con cemento Bases abiertas ligadas con asfalto
Revestimientos y pavimentos	Imprimación Riego de liga Riego de neblina Cape seal Lechada asfáltica Tratamientos superficiales Mezcla asfáltica en caliente (capa intermedia) Mezcla asfáltica en caliente (Capa de rodadura) Pavimentos de hormigón Mezcla asfáltica reciclada y estabilizada con asfalto espumado Mezcla asfáltica drenante Mezclas Stone Mastic Asphalt (SMA) Microaglomerados asfálticos discontinuos en caliente Microaglomerados en frío Mezclas asfálticas en caliente modificadas con polvo de caucho Mezclas asfálticas en caliente con RAP

Fuente: Elaboración propia.

El cuadro 7 presenta los ítems que se involucran tradicionalmente en las labores de mantenimiento o conservación de un camino, así como los principales procedimientos asociados. Esta información también fue extraída del Manual de Carreteras de Chile versión 2018.

Cuadro 7
Ítems y procedimientos de mantenimiento o conservación de caminos

Ítem	Procedimiento
Faja vial	Limpieza de la faja
Movimiento de tierras y control de taludes	Remoción de suelos que obstruyen la calzada Tronadura de rocas Reconstrucción de la plataforma en TCN Reconstrucción de la plataforma en roca Excavación de cortes en TCN Excavación de cortes en roca
Pavimentos asfálticos	Sellado de grietas Bacheo superficial con mezcla en caliente Bacheo superficial con mezcla en frío Sellos bituminosos Imprimación reforzada Reposición de capa de rodadura de concreto asfáltico
Pavimentos de hormigón	Sellado de juntas y grietas Reparación en todo el espesor Reparación en espesor parcial Cepillado de la superficie Reemplazo de losas por mezclas asfálticas Bacheo superficial asfáltico en frío Reposición de losas de hormigón Colocación de barras de traspaso de cargas

Fuente: Elaboración propia.

C. Cálculo de las emisiones de CO₂ para proyectos representativos

Es necesaria una adecuada adaptación de la experiencia internacional en función de la realidad regional. Para ello, es relevante estructurar y homogeneizar la información de base en términos de obtención de materiales, prácticas constructivas, operación y mantenimiento para una infraestructura de un camino. La información enviada corresponde a proyectos relevantes gracias a la información provista por los países interesados de acuerdo con sus realidades y planificación de sus proyectos. Se seleccionaron finalmente los que contaran con toda la información necesaria para un análisis completo.

Sin embargo, la información disponible para cada proyecto se relaciona únicamente a las fases de: producción de materiales, construcción y uso. Por lo tanto, el análisis está enfocado en estas 3 fases.

1. ACV Proyecto: Carretera Arica-Tambo Quemado (Chile)

a) Fases de producción de materiales y construcción

El proyecto está denominado por el Ministerio de Obras Públicas de Chile (MOP) como "Reposición Ruta 11-CH, Arica – Tambo Quemado, de la Región de Arica y Parinacota, Chile". La obra es una reposición de la Ruta 11 – CH entre los Dm 36 100 al Dm 59 810, teniendo una longitud de 23 710 metros sin considerar las cuñas de empalme. Cabe destacar que este trayecto se considera una ruta internacional, ya que continua hacia territorio boliviano.

La estructura del pavimento adopta como una solución de carpeta asfáltica y se subdivide en dos tramos, una del Dm 36 100 al Dm 51 920 (15,82 km) y el otro del Dm 51 920 al Dm 59 810 (7,89 km). La estructura de pavimento y el perfil de tipo se indican en el cuadro 8.

Cuadro 8
Estructura del pavimento de los tramos 1 y 2 del proyecto

Tramo 1: Dm 36.100 al Dm 51.920		Tramo 2: Dm 51.920 al Dm 59.810	
Capa	Espesor (mm)	Capa	Espesor (mm)
Rodadura	50	Rodadura	50
Intermedia	90	Intermedia	100
Base granular	150	Base granular	150
Subbase granular	150	Subbase granular	150

Fuente: Elaboración propia.

Todo el proyecto presenta en su perfil transversal las siguientes características:

- Ancho de Calzada: 7,0 m
- Ancho de Berma: 1,5 m (dos bermas)

El inventario de materiales se presenta en el Cuadro 9.

Cuadro 9
Cantidades de obra del proyecto Arica – Tambo Quemado

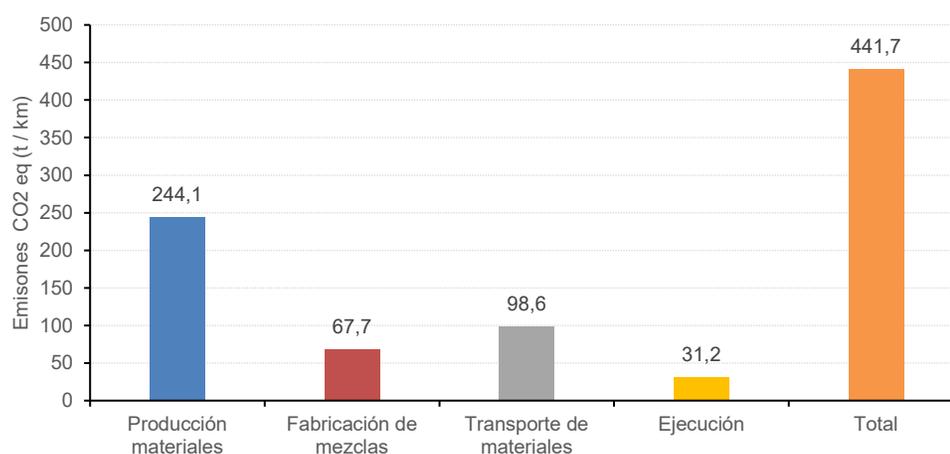
Items	Proyecto arica tambo quemado		
	Partidas	Uni	Cantidad
Preparación área de trabajo	Remoción Pavimentos Asfálticos	m2	177 433
	Despeje y Limpieza de la Faja	km	24
Movimiento de Tierras	Remoción de Material inadecuado	m3	10 000
	Excavación en corte TCN	m3	151 716
	Excavación en corte en Roca	m3	321 376
	Formación y compactación de Terraplenes	m3	129 197
	Preparación de Subrasante	m2	320 198
Capas Granulares	Subbase Granular	m3	105 027
	Base Granular	m3	56 344
Revestimientos	imprimación	m2	262 296
	Liga	m2	191 712
	Concreto Asfáltico de Rodadura	m3	13 186
	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	m3	17 897

Fuente: Elaboración propia con base en "Presupuesto de obra proyecto Arica – Tambo Quemado MOP Chile".

Los resultados obtenidos respecto de la cantidad totales de emisiones de CO₂ equivalente para cada uno de los tramos se presentan en los gráficos 4 y 5. Estos resultados se muestran de dos formas: para cada una de las etapas del ciclo de vida del camino y para cada uno de los ítems de las partidas especificadas en la construcción. No se incluyen procedimientos o actividades de mantenimiento en una temporalidad determinada.

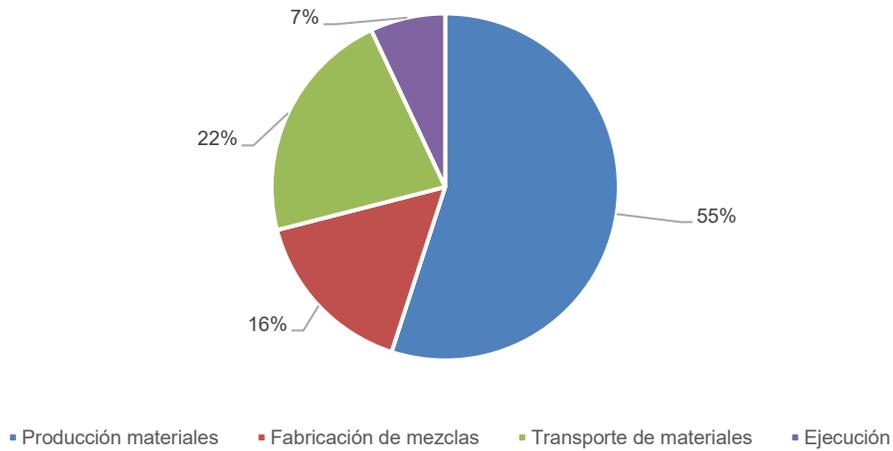
Gráfico 4
Emisiones de CO₂eq según etapas del ciclo de vida para el tramo 1 Proyecto Arica– Tambo Quemado

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

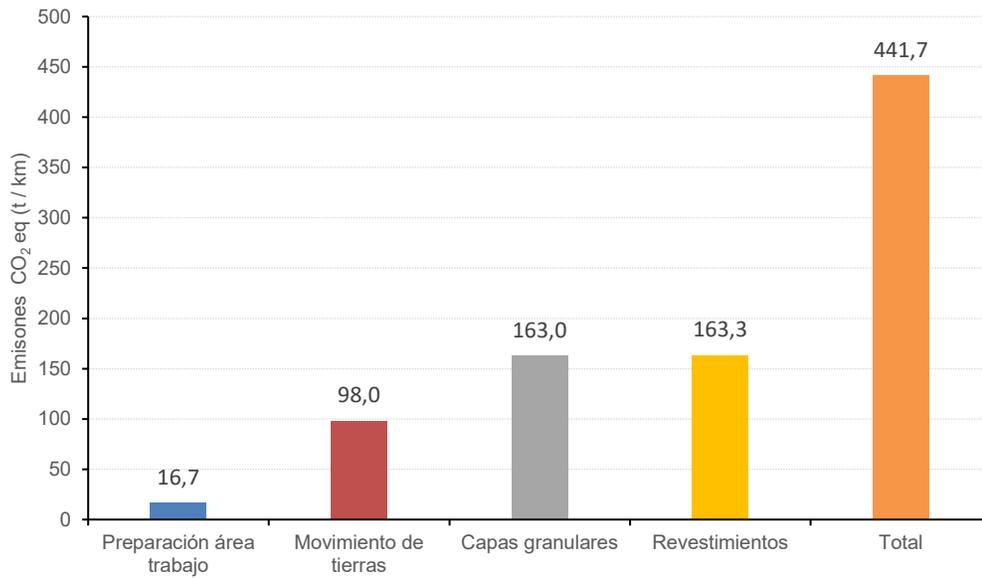
B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
(En porcentajes)



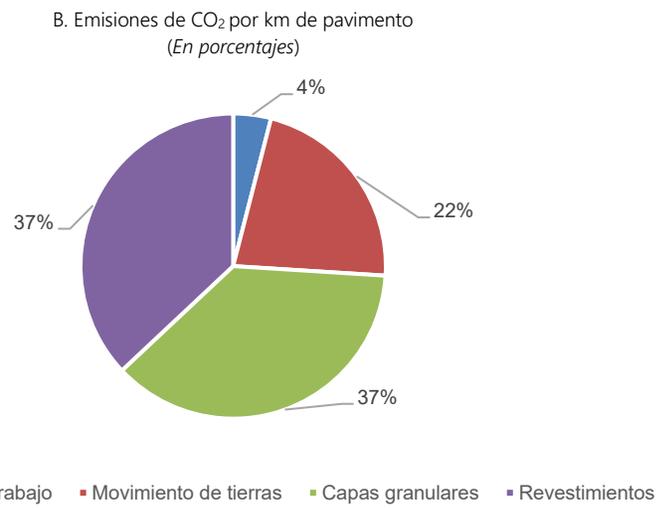
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5
Emisiones de CO₂eq según procedimientos de construcción para el tramo 1 Proyecto Arica– Tambo Quemado

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento

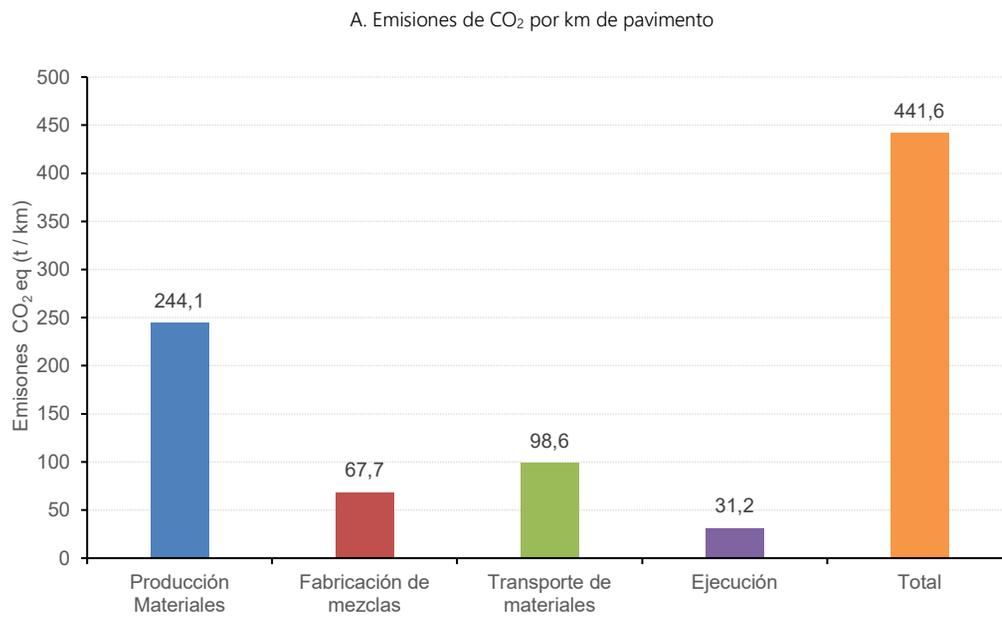


Fuente: Elaboración propia.

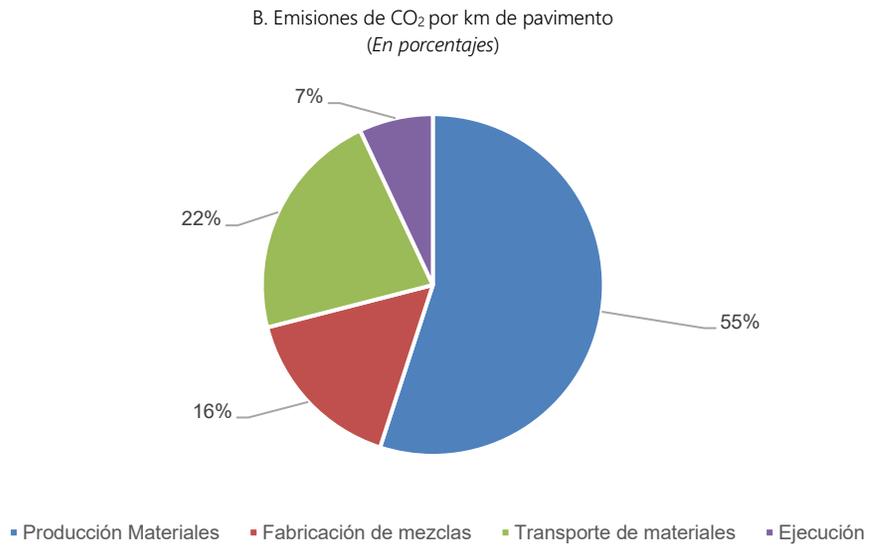


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 6
Emisiones totales de CO₂eq según etapas del ciclo de vida para el tramo 2 Proyecto Arica– Tambo Quemado

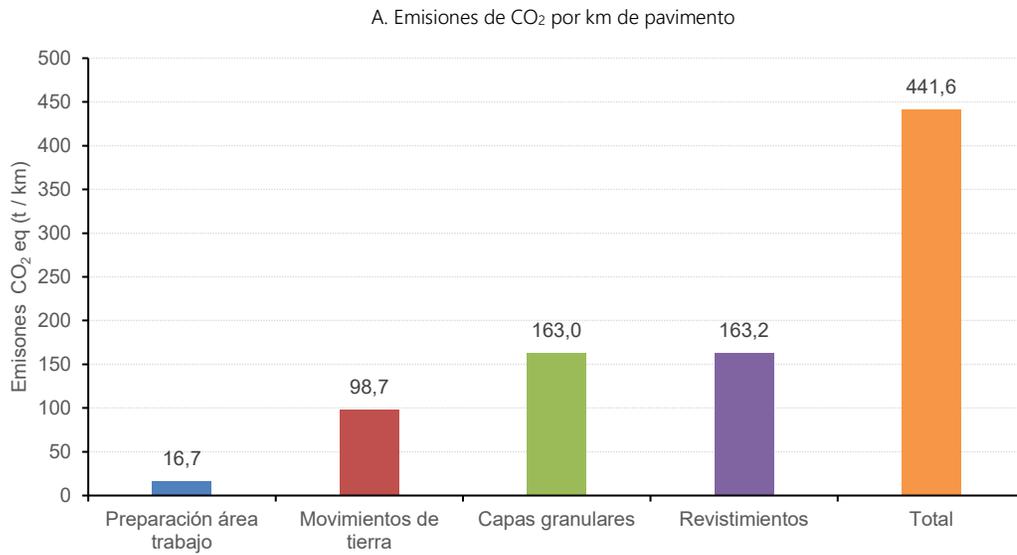


Fuente: Elaboración propia.

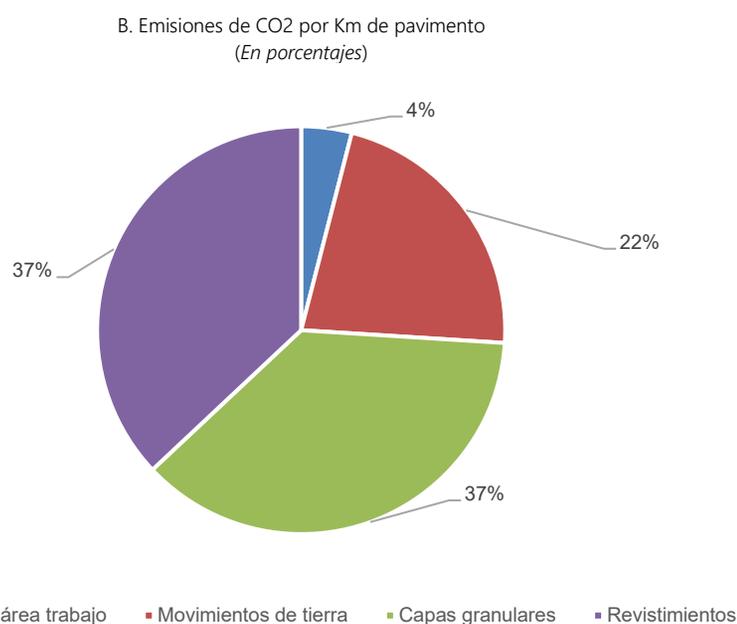


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 7
Emisiones de CO₂eq según procedimientos de construcción para el tramo 2 Proyecto Arica– Tambo Quemado



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

b) Fase de uso

Por su parte las emisiones asociadas al uso del camino se obtuvieron a partir de la evaluación social de la Carretera Arica – Tambo Quemado, la cual se encuentra en el documento “Anexo IDI- 2014. Reposición ruta 11-CH, Arica – Tambo Quemado” (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2013).

Sin embargo, este estudio describe el sector comprendido entre Rosario (km 18,00) y Guanta (km 36,100), correspondiente al tramo anterior al tramo de estudio (km 36,100 al km 59,810). Por lo tanto, dado que las emisiones dependen directamente del largo del proyecto, y para ser consistentes con el análisis de ciclo de vida, se utilizará el tráfico vehicular del tramo km 18,00 – km 36,100 y la longitud del tramo km 36,100- km 59,810, es decir, una longitud de 23 710 m.

A continuación, se describe la metodología de este análisis.

En primer lugar, se determinó el consumo de combustible para el tránsito promedio anual (TPA), según la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo combustible} = \frac{\text{Largo carretera} * \text{TPA}}{\text{Ponderador}_{\text{Gasolina}} * \text{Rendimiento}_{\text{Gasolina}} + \text{Ponderador}_{\text{Diésel}} * \text{Rendimiento}_{\text{Diésel}}}$$

La proyección del tránsito medio diario anual se muestra en el cuadro 10.

Cuadro 10
Tránsito medio diario anual (vehículos/día)

Año	Automóvil	Camioneta	Buses	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Total
2015	879	372	214	309	774	2 548
2034	1 753	552	459	522	1 489	4 774

Fuente: Elaboración propia con base en “Anexo IDI- 2014. Reposición ruta 11-CH, Arica- Tambo Quemado, Ministerio de Obras Públicas de Chile”.

Los ponderadores reflejan el porcentaje de vehículos a gasolina y a diésel que existen para cada tipo de vehículo. Estos fueron obtenidos desde los precios sociales vigentes en Chile. El siguiente cuadro muestra dichos valores:

Cuadro 11
Ponderadores por tipo de vehículo
(En porcentajes)

Tipo de vehículo	Gasolina	Diésel
Automóvil	88	12
Camioneta	88	12
Buses	0	100
Camión 2 ejes	30	70
Camión +2 ejes	0	100

Fuente: Elaboración propia con base en "Precios sociales vigentes año 2018, Ministerio de Desarrollo Social".

Los rendimientos mixtos corresponden a valores obtenidos por revisión bibliográfica, y se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 12
Rendimientos de combustibles según tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Gasolina (km/L)	Diésel (km/L)
Automóvil	16	15,6
Camioneta	11,5	9,4
Buses	3,5	-
Camión 2 ejes	4,3	2,4
Camión +2 ejes	1,6	-

Fuente: Elaboración propia con base en literatura internacional.

Con todas las variables vistas se obtuvo el consumo vehicular anual para cada tipo de vehículo. Finalmente se obtuvo las emisiones de CO₂eq según la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones CO}_2\text{eq} = \text{Factor de emisión} * \text{Consumo combustible}$$

En el Cuadro 13 se muestran los factores de emisión utilizados para cada combustible.

Cuadro 13
Factores de emisión de combustibles

	Gasolina	Diésel
Factor de emisión (kgCO ₂ eq/L)	2,24	2,55

Fuente: Elaboración propia con base en IPCC (2006).

A partir de los ponderadores y de los factores de emisión, se obtuvo un factor de emisión por tipo de vehículo, los que se muestran en el siguiente cuadro:

Cuadro 14
Factores de emisión por tipo de vehículo

Tipo de vehículo	Factor de emisión promedio ponderado (kgCO ₂ eq/L)
Automóvil	2,28
Camioneta	2,28
Buses	2,55
Camión 2 ejes	2,41
Camión +2 ejes	2,55

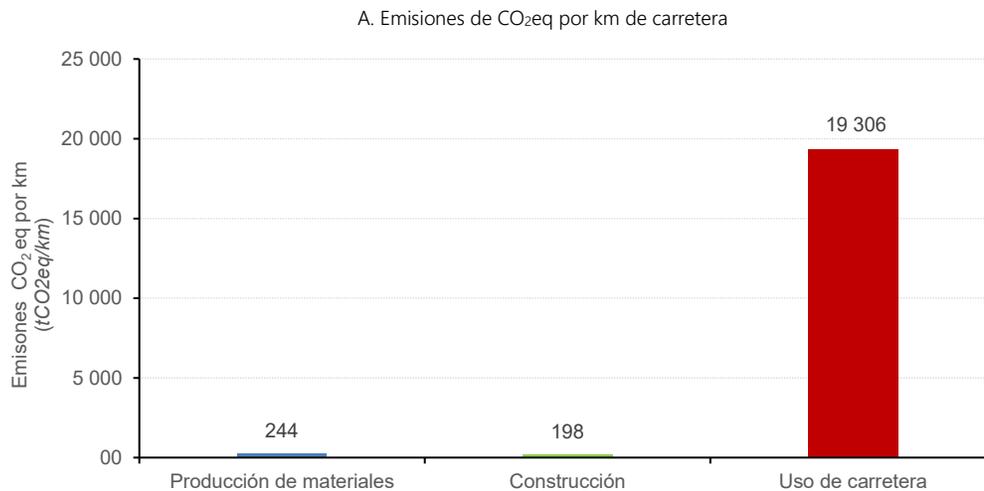
Fuente: Elaboración propia.

Este análisis se realizó para los 20 años de vida útil del proyecto, por lo tanto, considerando la suma de cada año se obtiene una emisión asociada a la fase de uso, equivalente a 19 306 tCO₂eq/km, luego considerando el largo de 23,71 km se obtiene una emisión de 457.740 tCO₂eq.

Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida

En el siguiente gráfico se muestran las emisiones totales del proyecto, considerando las fases de producción de materiales, construcción y de uso durante su vida útil (20 años).

Gráfico 8
Emisiones de CO₂eq por km para Proyecto Arica- Tambo quemado según fases



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

2. ACV Proyecto: Carretera Alto Chiza-Cuya (Chile)

a) Fases de producción de materiales y construcción

El proyecto se denomina como "Reposición Pavimento y Construcción 3era pista Ruta 5, Sector Alto Chiza – Cuya, Provincia de Tamarugal, Región de Tarapacá, Chile". La obra es una reposición de la Ruta 5 entre los Dm 1 930.100 al Dm 1 948.360, teniendo una longitud de 18 260 metros. Esta longitud considera en su tramo un puente y algunos empalmes, dejando una longitud efectiva total de camino a modelar de 18 118,42 metros. Por otro lado, la consideración de evaluación de emisiones no considera empalmes, por lo que el tramo evaluado queda en 18 088,4 metros. La estructura de pavimento se presenta en el cuadro 15.

Cuadro 15
Estructura del pavimento del proyecto

Capa	Espesor (mm)
Rodadura	50
Intermedia	80
Base granular	150
Subbase granular	150

Fuente: Elaboración propia.

Todo el proyecto presenta las siguientes características en cuanto a su perfil transversal:

- Ancho de Calzada: 7,0 m
- Ancho de Berma: 1,5 m (dos bermas)

El inventario de materiales se presenta en el cuadro 16.

Cuadro 16
Cantidades de obra del proyecto Alto Chiza - Cuya

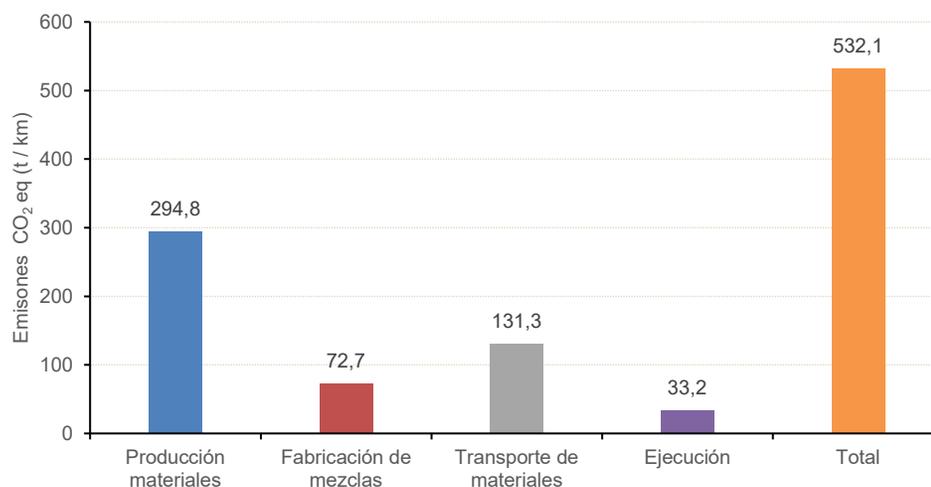
Items	proyecto alto chiza cuya		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Preparación área de trabajo	Remoción Pavimentos Asfálticos	m ²	7 081
	Despeje y Limpieza de la Faja	km	18,3
Movimiento de Tierras	Remoción de Material inadecuado	m ³	10 000
	Excavación en corte TCN	m ³	247 965
	Excavación en corte en Roca	m ³	249 980
	Formación y compactación de Terraplenes	m ³	27 806
	Preparación de Subrasante	m ²	283 977
Capas Granulares	Subbase Granular	m ³	100 066
	Base Granular	m ³	50 226
Revestimientos	imprimación	m ²	221 123
	Liga	m ²	178 903
	Concreto Asfáltico de Rodadura	m ³	1 110
	Concreto Asfáltico Capa Intermedia	m ³	14 313

Fuente: Elaboración propia con base en "Presupuesto de obra proyecto Alto Chiza - Cuya MOP Chile".

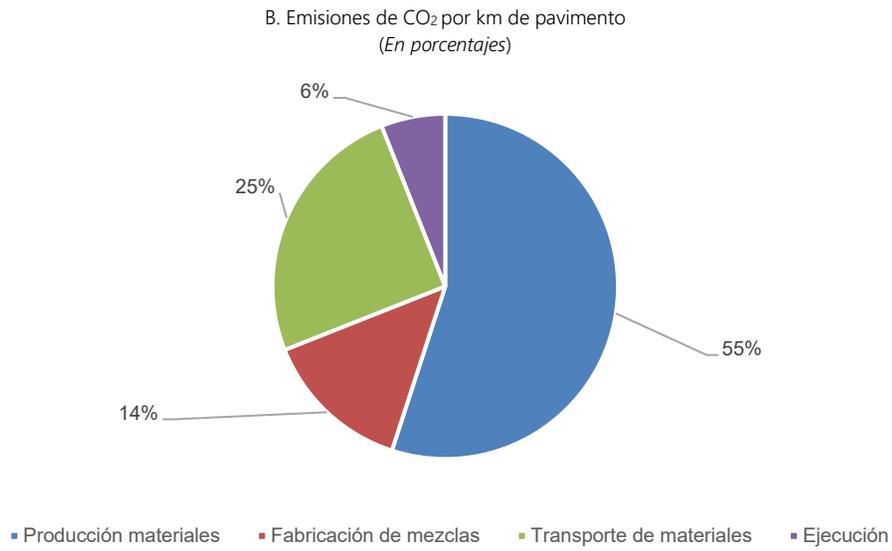
Los resultados obtenidos respecto de la cantidad total de emisiones de CO₂eq para cada uno de los tramos se presentan en los gráficos 9 y 10. Estos resultados se muestran de dos formas: para cada una de las etapas del ciclo de vida del camino y para cada uno de los ítems de las partidas especificadas en la construcción. Estos datos no incluyen ninguna temporalidad que incorpore actividades de mantenimiento por lo que esta etapa del ciclo de vida no posee ninguna valoración en este caso.

Gráfico 9
Emisiones totales de CO₂eq según etapas del ciclo de vida Proyecto Alto Chiza – Cuya

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento

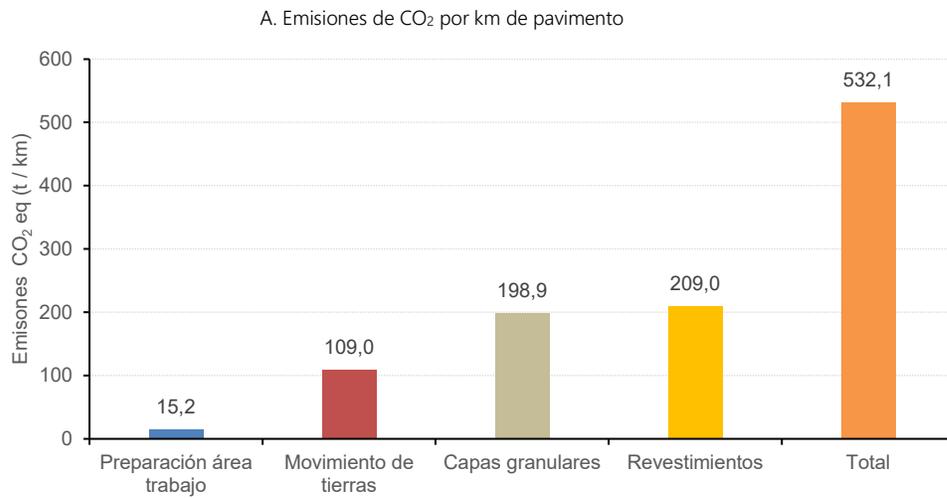


Fuente: Elaboración propia.



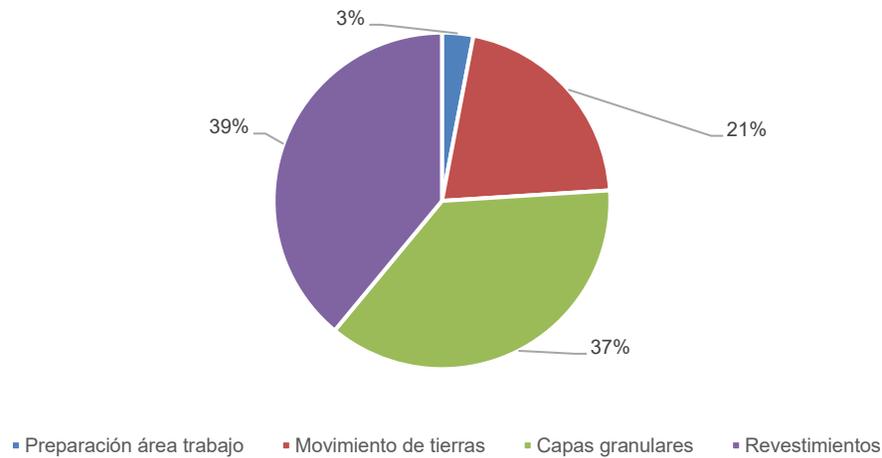
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10
Emisiones totales de CO₂eq según procedimientos de construcción Proyecto Alto Chiza – Cuya



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por Km de pavimento
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

b) Fase de uso

Finalmente, se calcularon las emisiones asociadas al uso del camino durante su vida útil, las cuales se obtuvieron a partir de los consumos de combustibles estimados a través de la evaluación social del proyecto. El documento estudiado corresponde a "Resultados Evaluación 3 seleccionada Ejecución de obras de reposición y construcción de plataforma de la pista auxiliar" (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2013).

Para este análisis se sigue la misma metodología detallada en la sección Fase de Uso del proyecto Arica – Tambo Quemado (Chile).

Para ser consistentes con el análisis de ciclo de vida, se utilizó una longitud de 18 088,4 m. La proyección del tránsito medio diario anual se muestra en el cuadro 17.

Cuadro 17
Tránsito medio diario anual (vehículos/día)

Año	Automóvil	Camioneta	Buses	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Total
2015	479	140	280	74	535	1 508
2034	888	186	613	113	1 067	2 867

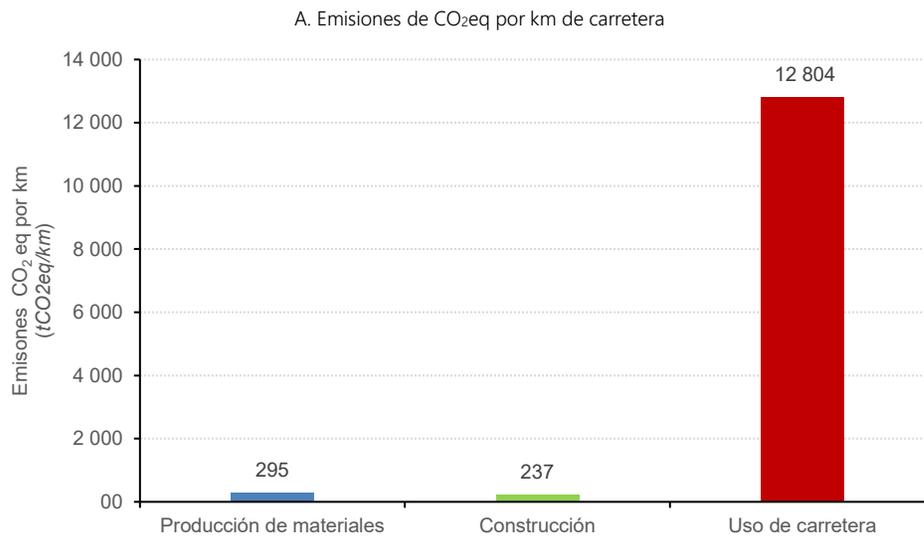
Fuente: Elaboración propia con base en "Resultados Evaluación 3 seleccionada Ejecución de obras de reposición y construcción de plataforma de la pista auxiliar, Ministerio de Obras Públicas de Chile".

Este análisis se realizó para los 20 años de vida útil del proyecto, por lo tanto, considerando la suma de cada año se obtiene una emisión asociada a la fase de uso, equivalente a 12 804 tCO₂eq/km, y considerando el largo del proyecto se obtiene una emisión de 231 597 tCO₂eq.

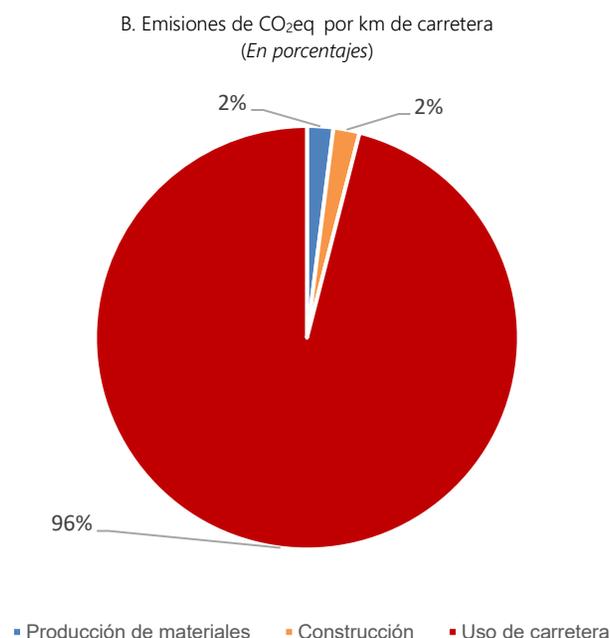
Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida

En el siguiente gráfico se muestran las emisiones totales del proyecto, considerando las fases de producción de materiales, construcción y de uso durante su vida útil (20 años).

Gráfico 11
Emisiones de CO₂eq por km para Proyecto Alto Chiza- Cuya según fases



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, de este análisis se determinaron las emisiones totales asociadas al proyecto Alto Chiza – Cuya (considerando su largo de 18,09km) las que equivalen a 241 221 tCO₂eq.

3. ACV Proyecto: Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa – La Venta (Honduras)

a) Fases de producción de materiales y construcción

La Carretera CA-5 Sur es una de las más antiguas del país. Se origina en Tegucigalpa y recorre la parte sur del Departamento de Francisco Morazán, el extremo meridional de Choluteca y nor-oriental de Valle, empalmando con la Carretera Panamericana en la población de Jícara Galán (Técnica de Ingeniería S.A, 2016). Esta carretera está clasificada según el Manual de Carreteras del país como “principal”, con velocidades de diseño de 80, 60 y 50 km/h para terrenos plano, ondulado y montañoso respectivamente. Este proyecto se compone de distintos tramos como se muestra en el cuadro 18.

Cuadro 18
Descripción de los tramos Carretera CA5 Sur

Tramo	Longitud (km)
Tegucigalpa (Germania) – Desvío Aldea Santa Rosa	3,12
Desvío Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula	14,38
Cerro de Hula – La Venta	32,16

Fuente: Elaboración propia.

Los análisis detallados de las emisiones de CO₂ para cada uno de los tramos se presentan en los siguientes numerales. Los datos utilizados para las distintas modelaciones y estimaciones del CO₂ fueron extraídos de información facilitada por el país, dentro de la cual se destacan:

- El Informe Final del Estudio de Ingeniería presentado por la firma TECNISA (Técnica de Ingeniería S.A), correspondiente al mes de marzo de 2016. Este informe fue presentado

a la Secretaría de Infraestructura y Servicios Públicos – INSEP del Gobierno de la República de Honduras.

- Los planos finales generales y de planta perfil del proyecto como construido (As Built).
- Los Informes Finales I y II de la Supervisión de la Construcción, Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera CA-5 Sur Tegucigalpa – Júcaro Galán, Tramo: La Venta del Sur – Cerro de Hula con fecha de agosto de 2018. El supervisor del trabajo fue la empresa TECNISA (Técnica de Ingeniería S.A).

Tramo 1: Tegucigalpa (Germania) – Desvío Aldea Santa Rosa

El tramo Tegucigalpa (Germania) – Desvío Aldea Santa Rosa forma parte de la referida carretera y tiene una longitud de 3,12 km. Este tramo tiene su origen en el estribo sur del puente sobre el Río Grande en la Aldea El Loarque, a unos 2,0 km de la entrada a la Colonia El Loarque y unos 2,2 km desde la intersección con el paso a desnivel del Anillo Periférico en la entrada de la Colonia Satélite.

Este tramo consiste en la rehabilitación de una vía de dos carriles de 3,65 m cada uno y hombros de 1,35 m para un ancho total de corona de 10 m, utilizando la ruta actual. La solución adoptada es una estructura de pavimento con capa de rodadura en concreto sobre una base granular estabilizada con cemento.

Las cantidades de obra (inventario) involucrados en este tramo del proyecto se presentan en el cuadro 19, las que fueron extraídas del Informe Final del Estudio de Ingeniería presentado por la firma TECNISA (Técnica de Ingeniería S.A, 2016).

Cuadro 19
Cantidades de obra del Tramo 1: Tegucigalpa (Germania) – Desvío Aldea de Santa Rosa

Items	Proyecto tegucigalpa (germania) – desvío aldea santa rosa		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m3	2 000,00
	Remoción de derrumbes	m3	1 000,00
Capas Granulares	Sub base granular	m3	600,00
	Base granular estabilizada con cemento	m3	450,00
	Cemento para estabilización	kg	35 000,00
Revestimientos	Riego de imprimación	l	2 954,96
	Concreto asfáltico en caliente AC-20	t	4 300,00
	Concreto asfáltico modificado con polímero	t	3 600,00
	Concreto asfáltico para bacheo	t	300,00
	Excavación para baches	m3	500,00

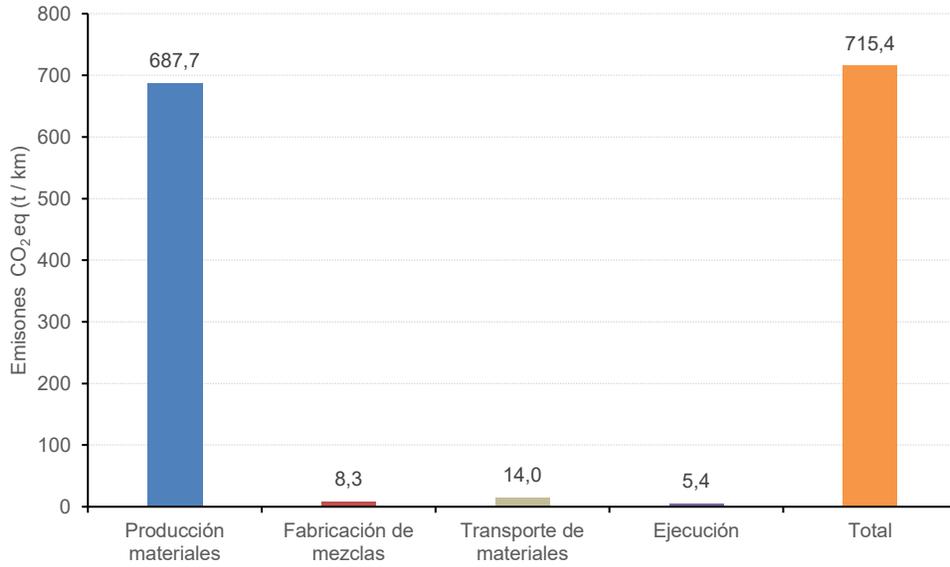
Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

Se utilizó una distancia de acarreo promedio de 15 km tanto para las zonas de botadero, planta de concreto, planta de hormigón y planta de producción de agregados.

Los gráficos 12 y 13 muestran la cantidad de emisiones de CO₂eq por kilómetro de pavimento de acuerdo con las partidas y cantidades definidas por el proyecto para este tramo.

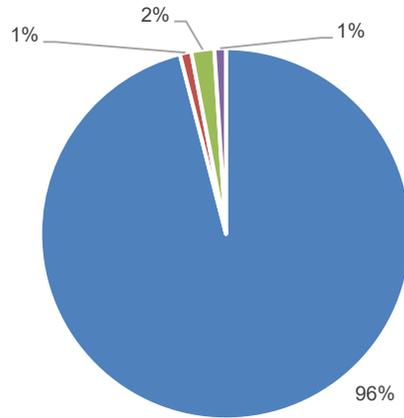
Gráfico 12
Emisiones de CO₂eq según etapas del ciclo de vida Tramo 1 Proyecto Tegucigalpa-La Venta (Tegucigalpa - Desvío Aldea Santa Rosa)

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)

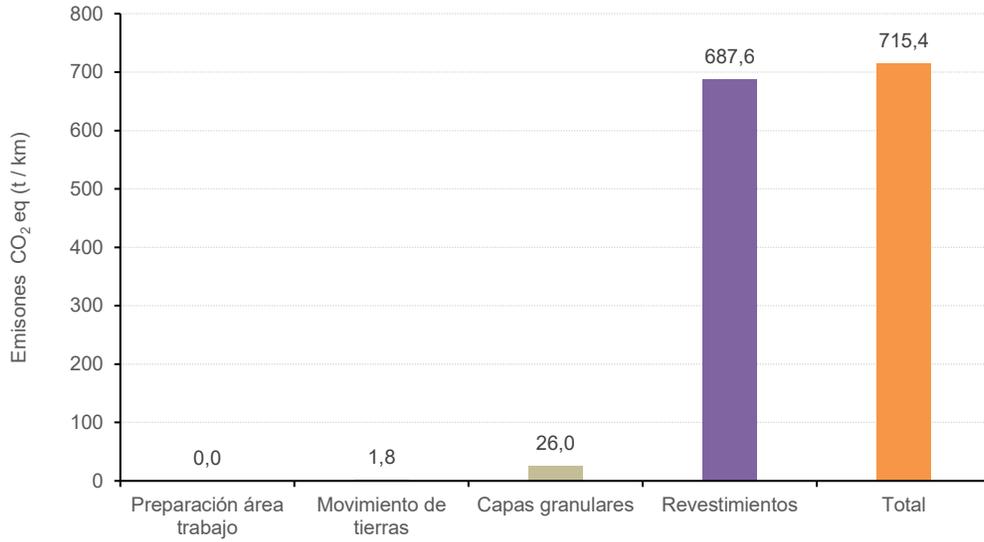


■ Producción materiales ■ Fabricación de mezclas ■ Transporte de materiales ■ Ejecución

Fuente: Elaboración propia.

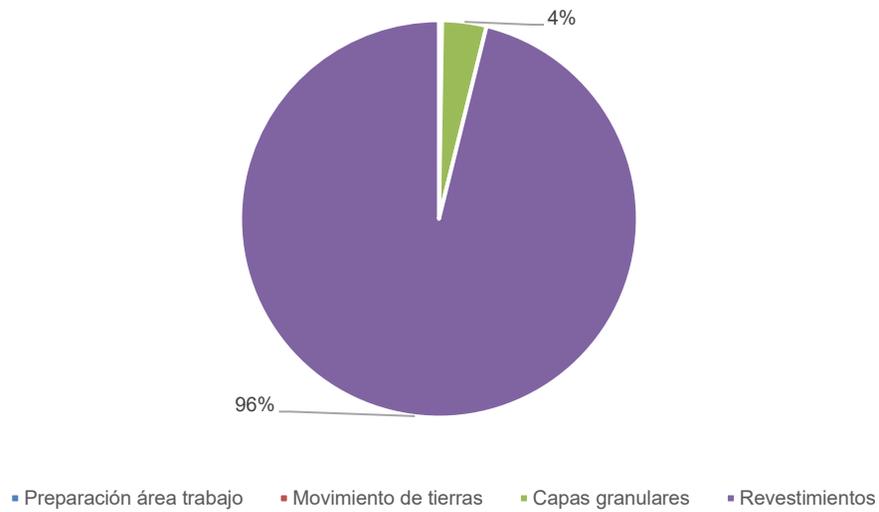
Gráfico 13
Emisiones de CO₂eq según procedimientos de construcción Tramo 1
Proyecto Tegucigalpa- La Venta (Tegucigalpa - Desvío Aldea Santa Rosa)

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Tramo 2: Desvío Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula

El tramo Desvío Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula tiene una longitud de 14,38 km. Entre las poblaciones que utilizan este tramo pueden citarse la aldea Tierras del Padre, los municipios de Ojojona, Santa Ana, San Buenaventura.

Este tramo, al igual que el anterior, consiste en la rehabilitación de una vía de dos carriles de 3,65 m cada uno y hombros de 1,35 m para un ancho total de corona de 10 m, utilizando la ruta actual. La solución adoptada es una estructura de pavimento con capa de rodadura en concreto sobre una base granular estabilizada con cemento.

Las cantidades de obra (inventario) involucrados en este tramo del proyecto se presentan en el cuadro 20, las que fueron extraídas del Informe Final del Estudio de Ingeniería presentado por la firma TECNISA (Técnica de Ingeniería S.A, 2016).

Cuadro 20
Cantidades de obra del Tramo 2: Desvío Aldea de Santa Rosa - Cerro de Hula

Items	Proyecto desvío aldea de santa rosa – cerro de hula		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m3	3 500,00
	Remoción de derrumbes	m3	1 000,00
Capas Granulares	Sub base granular	m3	4 800,00
	Base granular estabilizada con cemento	m3	8 500,00
	Cemento para estabilización	kg	700 000,00
Revestimientos	Riesgo de imprimación	l	31 823,00
	Pavimento de concreto hidráulico MR + 4,5 Mpa	m3	36 000,00
	Pasadores de transmisión de carga, No. 8	kg	235 300,00
	Barras de sujeción 5/8"	kg	26 700,00
	Concreto Asfáltico para bacheo	t	800,00
	Excavación para baches	m3	2 000,00

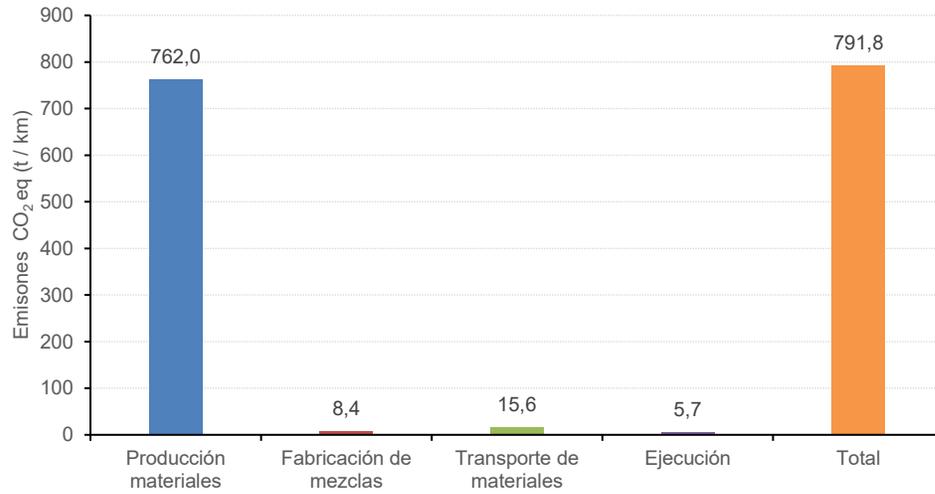
Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

Al igual que en el tramo 1, se utilizó una distancia de acarreo promedio de 15 km tanto para las zonas de botadero, planta de concreto, planta de hormigón y planta de producción de agregados.

Los gráficos 14 y 15 muestran la cantidad de emisiones de CO₂eq por kilómetro de pavimento de acuerdo con las partidas y cantidades definidas por el proyecto para este tramo.

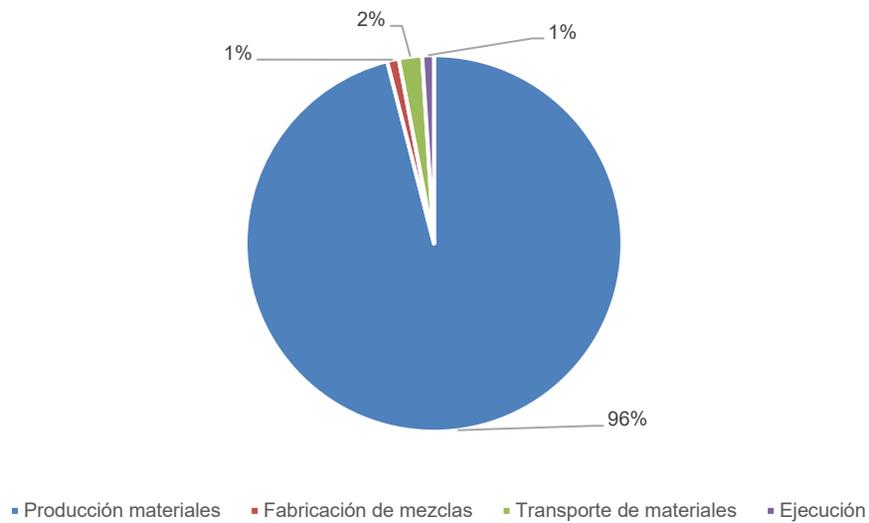
Gráfico 14
Emisiones de CO₂eq según Etapas del Ciclo de Vida Tramo 2 Proyecto Tegucigalpa
La Venta (Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula)

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



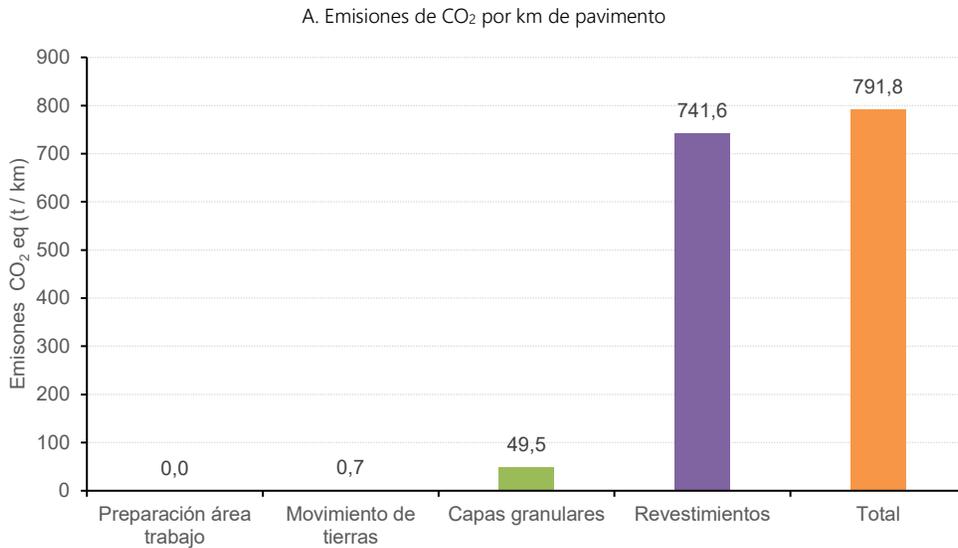
Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)



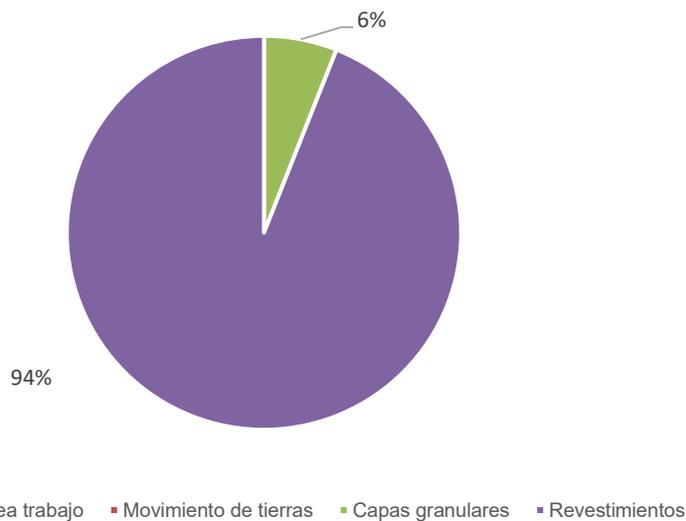
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 15
Emisiones de CO₂eq según procedimientos de construcción Tramo 2 Proyecto Tegucigalpa La Venta (Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula)



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Tramo 3: Cerro de Hula – La Venta del Sur

El proyecto corresponde a la “Construcción, Rehabilitación y Mejoramiento de la carretera CA-5 Sur, Tegucigalpa – Júcaro Galán, Sector La Venta del sur – Cerro de Hula” con una longitud total de 32 160 metros. La estructura del pavimento diseñada corresponde a una solución en concreto hidráulico como capa de rodadura y se subdivide en dos tramos cómo se presenta en los cuadros 21 y 15. El proyecto posee dos

perfiles transversales, el primero, que conlleva toda la longitud tiene un ancho de 10 metros, y solo el segundo tramo tiene un ancho de 13,6 metros ya que considera la construcción de una tercera pista. Los perfiles se presentan en el cuadro 21. Se utilizó una distancia de acarreo promedio de 15 km tanto para las zonas de botadero, planta de concreto, planta de hormigón y planta de producción de agregados.

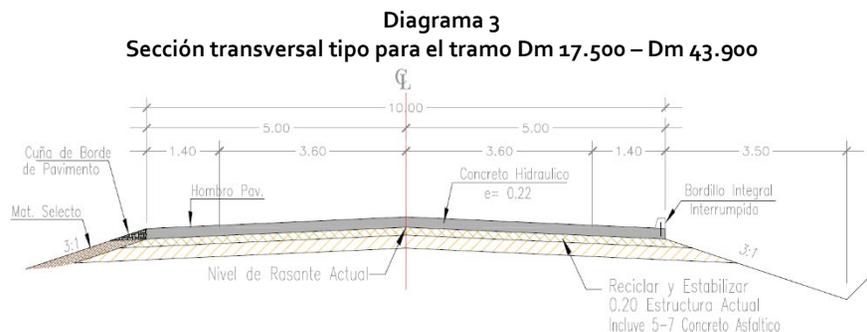
Cuadro 21
Sub-tramos del proyecto La Venta del Sur – Cerro Hula

Sub-tramo	Abscisas	Longitud (m)
1	Dm 17 500 – Dm 43 900	26 400
2	Dm 43 900 – Dm 49 660	5 760

Fuente: Elaboración propia con base en "Informes Finales I y II de la Supervisión de la Construcción, Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera CA-5 Sur Tegucigalpa – Júcaro Galán, Tramo: La Venta del Sur – Cerro de Hula (Técnica de Ingeniería S.A, 2018).

Sub-tramo 1: Dm 17.500 – Dm 43.900

El diagrama 3 presenta la sección transversal típica del pavimento para este tramo. Según el Informe Final del proyecto con fecha de agosto de 2018, las partidas y cantidades de obra involucradas que son tenidas en cuenta para este análisis se muestran en el cuadro 21.



Fuente: Elaboración propia con base en "Informes Finales I y II de la Supervisión de la Construcción, Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera CA-5 Sur Tegucigalpa – Júcaro Galán, Tramo: La Venta del Sur – Cerro de Hula (Técnica de Ingeniería S.A, 2018).

El cuadro 22 presenta las cantidades de obra por kilómetro de pavimento. Estos valores fueron calculados del Informe Final – Cuadro resumen Orden de Cambio N° 2 (página 83).

Cuadro 22
Cantidades de obra por kilómetro de proyecto – Tramo 1

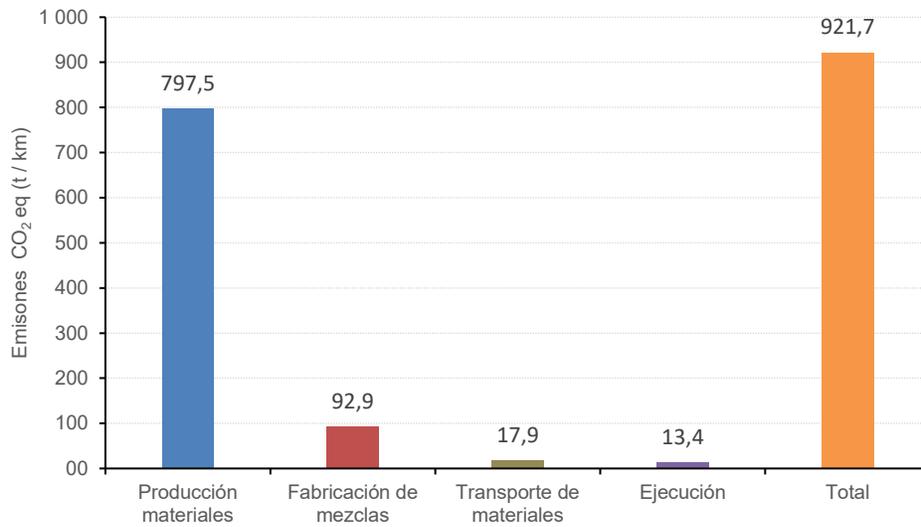
Items	Proyecto la venta del sur – cerro de hula		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m3	5 193
	Excavación en corte en Roca	m3	684
Capas Granulares	Base reciclada estabilizada con cemento	m3	2 043
	Cemento	kg	223 881
Revestimientos	Capa de rodadura en concreto	M3	2378,75
	Riego de imprimación	L	15266,72
	Barras de sujeción	kg	5830,23

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final – Cuadro resumen Orden de Cambio N° 2 (2018)".

Los gráficos 16 y 17 muestran la cantidad de emisiones de CO₂eq por kilómetro de pavimento de acuerdo con las partidas y cantidades definidas por el proyecto para este tramo.

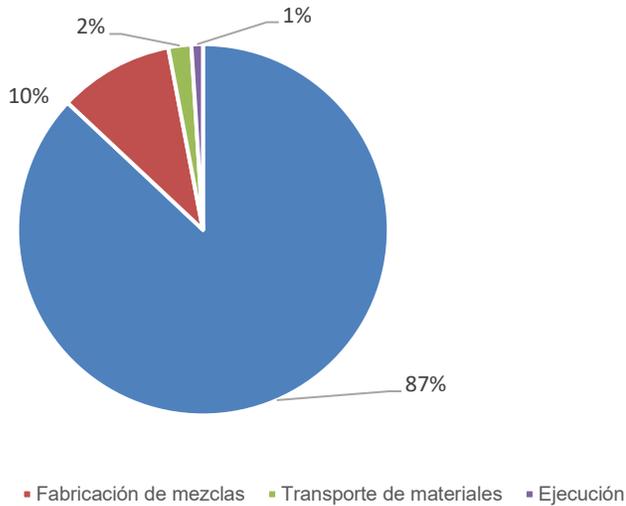
Gráfico 16
Emisiones de CO₂eq según etapas del ciclo de vida Tramo 3 – Subtramo 1
Proyecto Tegucigalpa- La Venta

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

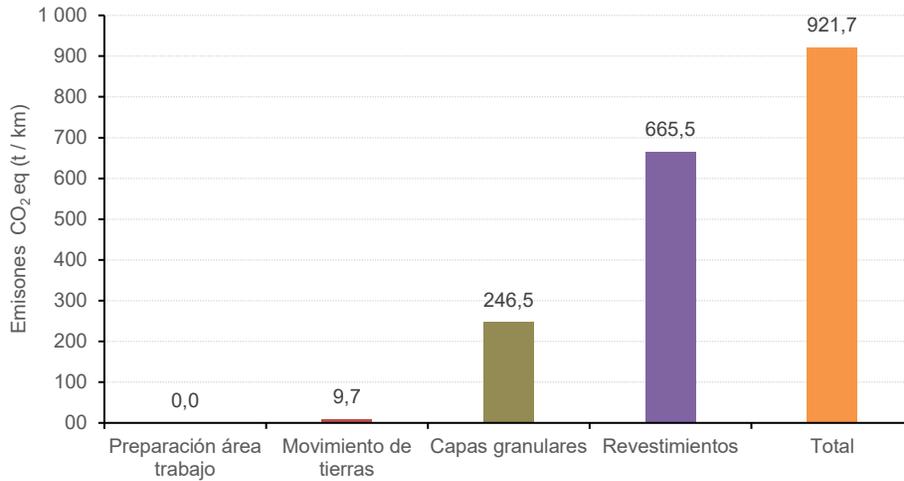
B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

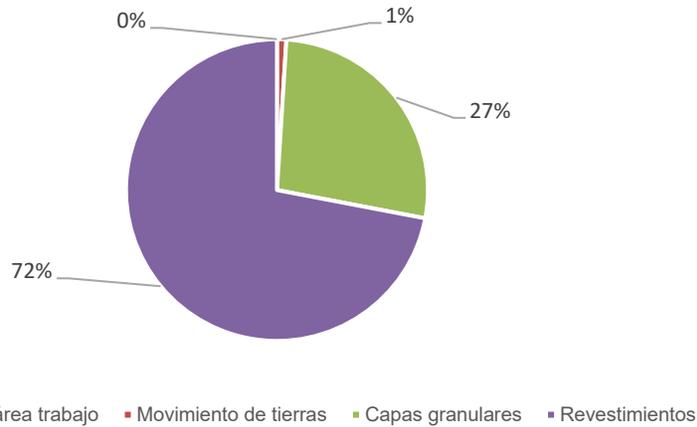
Gráfico 17
Emisiones de CO₂eq según procedimientos de construcción Tramo 3 – Subtramo 1
Proyecto Tegucigalpa – La Venta

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)

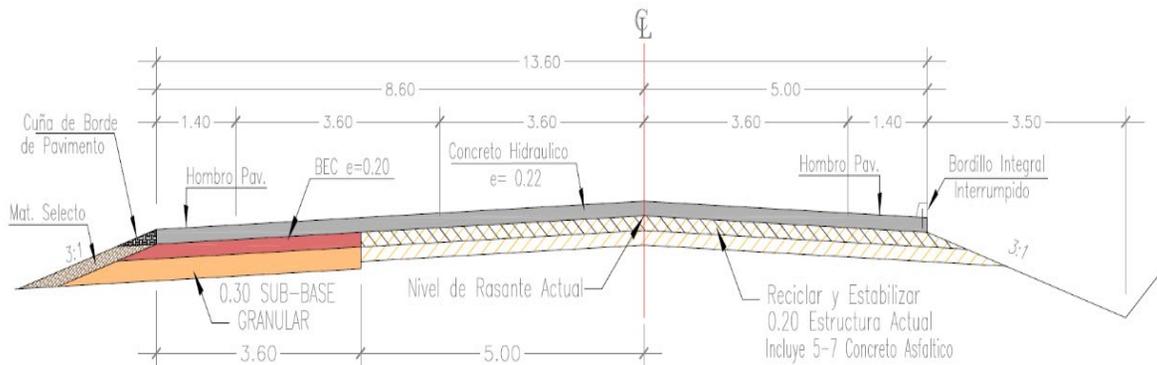


Fuente: Elaboración propia.

Sub-tramo 2: Dm 17.500 – Dm 43.900

El diagrama 4 presenta la sección transversal típica del pavimento para este tramo. Según el Informe Final del proyecto con fecha de agosto de 2018, las partidas y cantidades de obra involucradas que son tenidas en cuenta para este análisis se muestran en el cuadro 23.

Diagrama 4
Sección transversal tipo para el tramo Dm 17.500 – Dm 43.900



Fuente: Elaboración propia con base en "Informes Finales I y II de la Supervisión de la Construcción, Rehabilitación y Mejoramiento de la Carretera CA-5 Sur Tegucigalpa – Júcaro Galán, Tramo: La Venta del Sur – Cerro de Hula (Técnica de Ingeniería S.A, 2018).

El cuadro 23 presenta las cantidades de obra por kilómetro de pavimento. Estos valores fueron calculados según el Informe Final – Cuadro resumen Orden de Cambio N° 2 (página 83).

Cuadro 23
Cantidades de obra por kilómetro de proyecto – Tramo 2

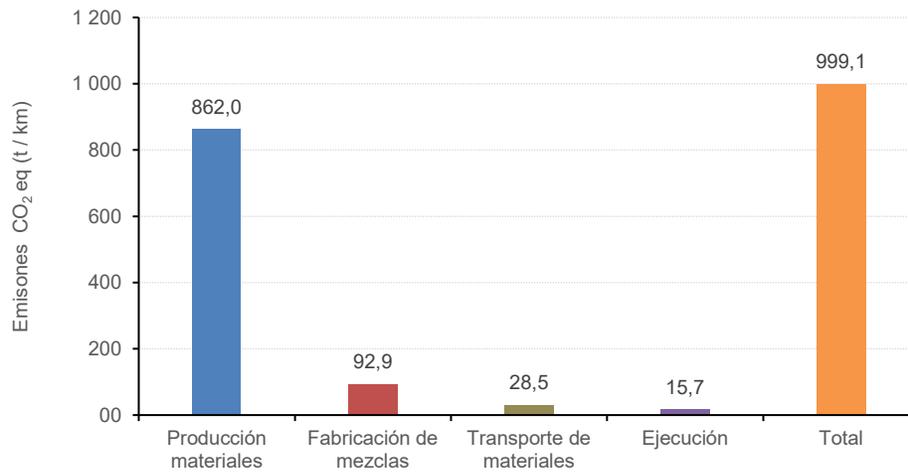
Items	Proyecto la venta del sur – cerro de hula		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m3	5 193
	Excavación en corte en Roca	m3	684
Capas Granulares	Subbase granular	m3	2 604
	Base granular estabilizada con cemento	m3	1 649
	Base reciclada estabilizada con cemento	m3	2 043
	Cemento	kg	223 881
Revestimientos	Capa de rodadura en concreto	M3	2 379
	Riego de imprimación	L	15 267
	Barras de sujeción	kg	5 830

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final – Cuadro resumen Orden de Cambio N° 2" (2018).

Los gráficos 18 y 19 muestran la cantidad de emisiones de CO₂eq por kilómetro de pavimento de acuerdo con las partidas y cantidades definidas por el proyecto para este tramo.

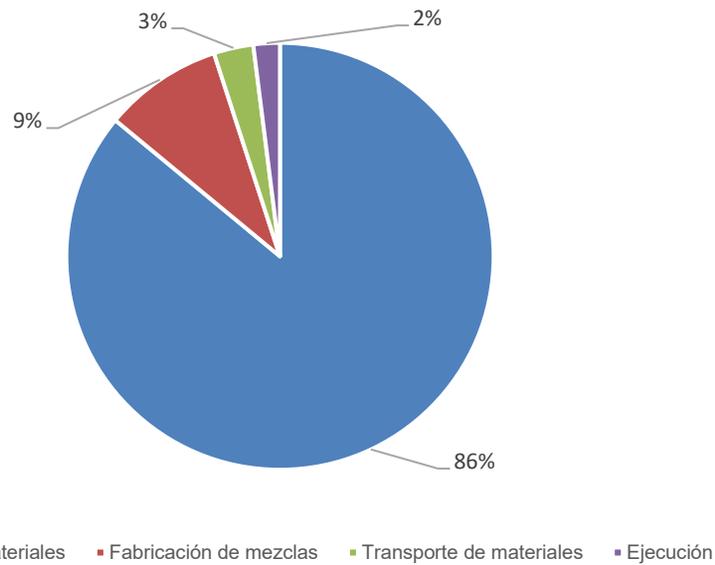
Gráfico 18
Emisiones de CO₂eq según etapas del ciclo de vida Tramo 3 – Subtramo 2
Proyecto Tegucigalpa- La Venta

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



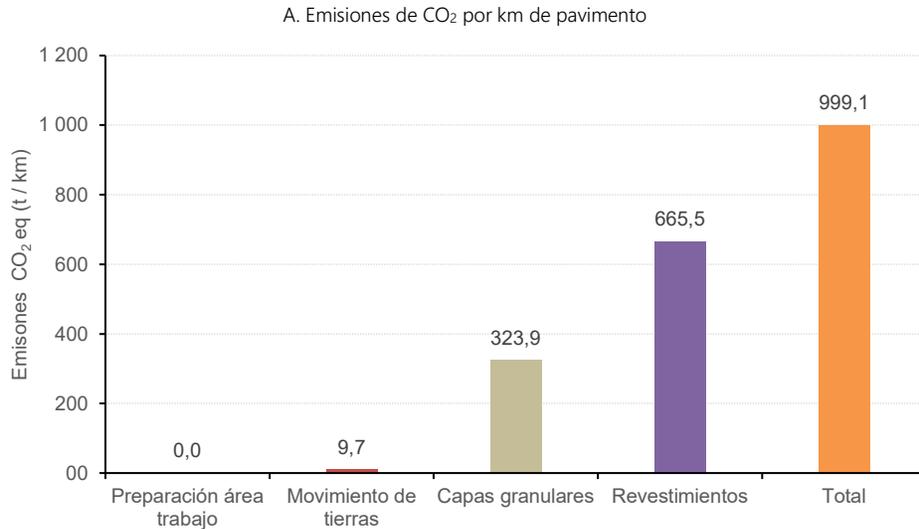
Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)

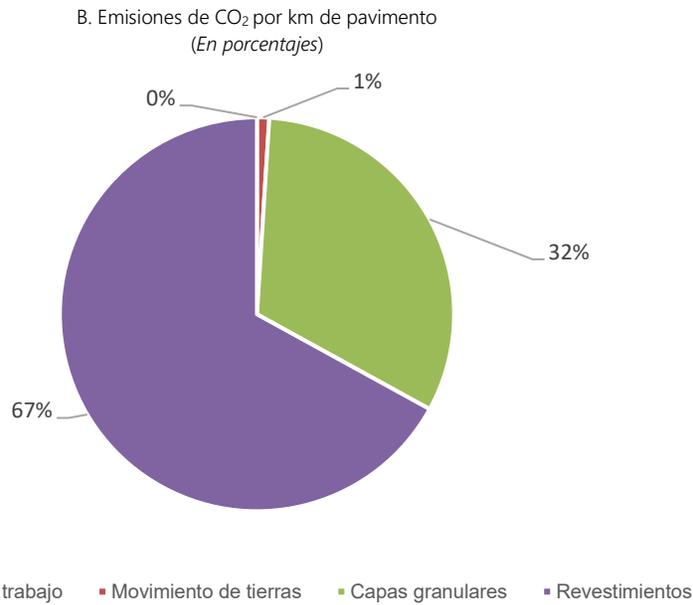


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 19
Emisiones de CO₂eq según procedimientos de construcción Tramo 3 – Subtramo 2
Proyecto Tegucigalpa- La Venta



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

b) Fase de uso

Finalmente, se calcularon las emisiones asociadas al uso del camino durante su vida útil, las cuales se obtuvieron a partir de los consumos de combustibles estimados a través de la evaluación social del proyecto. El documento revisado corresponde a "Informe Final del Estudio de Ingeniería. Estudio de rehabilitación Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa- La Venta" (TECNISA, 2016).

Para este análisis se sigue la misma metodología detallada en la sección Fase de Uso del proyecto Arica – Tambo Quemado (Chile).

El proyecto se conforma por 3 tramos que en su totalidad suman una longitud de 49 660 m. Los cuadros 24 y 25 muestran la proyección del tránsito medio diario anual.

Cuadro 24
Tránsito medio diario anual (vehículos/día) Tramo Tegucigalpa- Cerro de Hula

Año	Automóvil	Camioneta	Buses	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Total
2016	3 182	2 578	539	723	549	7 571
2035	7 165	5 806	1 213	1 627	1 237	17 048

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final de Rehabilitación Tramo Tegucigalpa- La Venta, TECNISA (2016)".

Cuadro 25
Tránsito medio diario anual (vehículos/día) Tramo Cerro de Hula- La Venta

Año	Automóvil	Camioneta	Buses	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Total
2016	2 117	1 665	379	563	538	5 262
2035	4 352	3 442	780	1 158	1 107	10 839

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final de Rehabilitación Tramo Tegucigalpa- La Venta, TECNISA (2016)".

A través de los cuadros anteriores se puede observar el gran tráfico vehicular que tiene esta carretera. Lo que implicará grandes emisiones para esta fase.

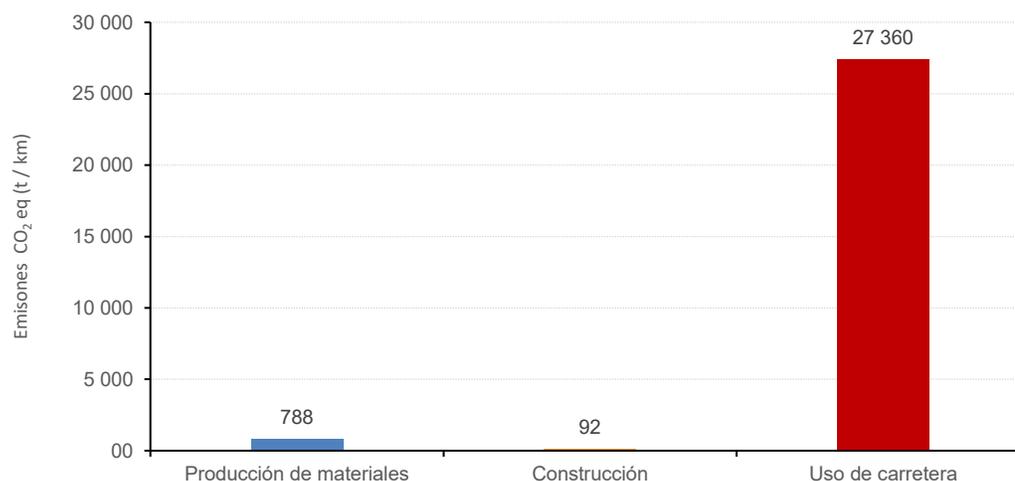
Este análisis se realizó para los 20 años de vida útil del proyecto, por lo tanto, considerando la suma de cada año se obtiene una emisión asociada a la fase de uso, equivalente a 27 360 tCO₂eq/km, y si se considera el largo del proyecto, se obtiene una emisión igual a 1 358 678 tCO₂eq.

Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida

En el siguiente gráfico se muestran las emisiones totales del proyecto, considerando las fases de producción de materiales, construcción y de uso durante su vida útil (20 años).

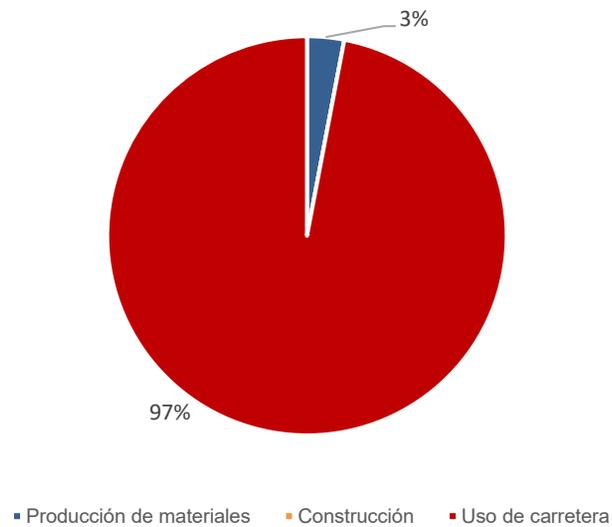
Gráfico 20
Emisiones de CO₂eq por km según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta

A. Emisiones de CO₂eq por km de carretera



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂eq por km de carretera
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Tras este análisis es posible conocer las emisiones totales del proyecto de Tegucigalpa- La Venta, que, considerando su largo total (4,9,66km) alcanzan un valor de 1 402 384 tCO₂eq. Valor muy alto en comparación a los otros dos proyectos evaluados, debido al alto flujo vehicular que presenta la carretera.

III. Evaluación social de un camino

El análisis de evaluación social consiste en incorporar: los costos sociales asociados a las emisiones del proceso de construcción de la carretera y los beneficios sociales asociados a la disminución de consumo de combustible del tráfico vehicular de la carretera, a los montos de inversión y costos de mantenimiento del proyecto, los que se encuentran detallados en la evaluación social de cada proyecto.

Tras este procedimiento, se compararán los indicadores de rentabilidad (VAN y TIR) sin costos sociales vs con costos sociales, con el fin de evaluar el impacto que genera el precio del carbono sobre los costos del proyecto, y si este es significativo o no.

Se realizará el mismo análisis para 3 escenarios según los precios de carbono propuestos por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile. En la tabla de a continuación se muestran dichos valores.

Cuadro 26
Precio social del carbono para Chile (USD/tCO₂)

Valor inferior	Valor central	Valor superior
20,2	32,5	43,2

Fuente: Elaboración propia con base en "Subsecretaría de Evaluación Social, 2017".

Estos valores se usarán como referencia también para los casos de otros países latinoamericanos.

A. Evaluación social Proyecto: Carretera Arica-Tambo Quemado (Chile)

La evaluación económica con la que se cuenta tiene un enfoque de costo-eficiencia, que supone que los beneficios son similares para todas las alternativas de solución consideradas, por lo tanto, se utiliza como criterio de selección el mínimo Costo Actual Equivalente (CAE). En este sentido, se realizará un análisis

diferente basado en el Valor Actual de Costos (VAC). Según el Anexo IDI-2014, Reposición Ruta 11-CH, Arica-Tambo Quemado el proyecto de reposición de la carpeta asfáltica tiene un VAC de 20,18 MM USD.

Para realizar este análisis se siguió la misma metodología descrita en la Evaluación social del Proyecto: Alto Chiza – Cuya. En la Tabla 27 se muestra el costo social asociado a las fases de producción de materiales y construcción para cada escenario. Este costo se considera en el año de construcción, es decir, cuando ocurre la inversión, en este caso corresponde al 2014.

Cuadro 27
Costos sociales de CO₂ fases de Producción de materiales, Construcción y Beneficios sociales de CO₂ fase de Uso
(En dólares)

	Costos sociales CO ₂ Fases de Producción y Construcción	Beneficios sociales CO ₂ Fase de Uso
Precio CO ₂ inferior	0,21 MM	0,78 MM
Precio CO ₂ central	0,34 MM	1,26 MM
Precio CO ₂ superior	0,45 MM	1,68 MM

Fuente: Elaboración propia.

Además, el cuadro 27 muestra los beneficios sociales asociados al ahorro de combustible por el uso de un camino de asfalto mantenido, podemos apreciar que por cada tonelada de CO₂ emitida al momento de la inversión, se evitan 4 en la fase de uso.

En la información revisada no se encuentran los flujos vehiculares, por lo que no es posible calcular directamente el consumo de combustible. En consecuencia, se consideró que el consumo de combustible en un camino mantenido es 16% menor que en un camino deteriorado. Este valor se obtuvo al comparar los costos de operación asociados a combustible de la situación sin y con proyecto del camino Lo Orozco – Quilpué, pues este camino es de asfalto y se evalúa su mantención (este proyecto se desarrolla más adelante en la sección Análisis comparativo de alternativas de tecnologías de asfalto). De esta manera, se obtuvieron los valores de los ahorros obtenidos traídos a valor presente.

En el Anexo 3 se muestra el detalle de los costos y beneficios sociales anualizados.

En el cuadro 28 se compara el VAC del proyecto y los 3 escenarios según precio social de CO₂.

Cuadro 28
Comparación de VAC para distintos escenarios

	VAC (MM USD)	Cambio porcentual en el VAC frente a proyecto sin precio social CO ₂ . (en porcentajes)
Proyecto sin Precio social CO ₂	20,18	-
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	19,61	-2,8
Proyecto con Precio social CO ₂ central	19,26	-4,6
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	18,96	-6,1

Fuente: Elaboración propia.

Se aprecia una disminución para el VAC que alcanza el 6,1% para precio social de carbono igual a 43,2 USD/tCO₂. Dado que la alternativa más rentable se refleja con un VAC menor, es que es conveniente incluir el precio del CO₂ en la evaluación, pues este refleja el ahorro de combustible que se produce al llevar a cabo el proyecto.

B. Evaluación social Proyecto: Carretera Alto Chiza-Cuya (Chile)

La evaluación social con la que se cuenta realiza el análisis para una longitud de 35,7 km, la cual se conforma por un primer tramo de 19 km y un segundo tramo de 16,7 km.

Por lo tanto, se hizo un escalamiento de los costos y beneficios para que sean proporcionales con la longitud de estudio equivalente a 18.088,4 m. De esta manera se recalcularon los indicadores económicos para que sean comparables con los costos y beneficios sociales.

El período de análisis es de 20 años, realizándose la estimación a partir del año 2014. Para descontar los flujos de costos y beneficios del proyecto se utilizó una tasa social de descuento del 6%. A partir de este análisis se obtuvieron los siguientes indicadores de rentabilidad:

Cuadro 29
Indicadores de rentabilidad proyecto Alto Chiza- Cuya

VAN	TIR
10,75 MM USD	9,5%

Fuente: Elaboración propia a partir de (Anexo IDI-2014. Reposición de pavimento y construcción de tercera pista Ruta 5, sector Alto Chiza- Cuya, Ministerio de Obras Públicas de Chile).

Nota: (Moneda: 31/12/12).

Primero se calculó del costo social del carbono derivado de la rehabilitación de la carretera, según:

$$\text{Costo social}_{\text{Construcción}} = \text{EmisionesCO}_2 \text{eq}_{\text{Construcción}} * \text{Precio social Carbono}$$

En el cuadro 30 se muestra el costo social del CO₂ asociado a las fases de producción de materiales y construcción para cada escenario.

Cuadro 30
Costos sociales CO₂ fases de Producción de materiales, Construcción y Beneficios sociales de CO₂ fase de Uso
(En dólares)

	Costos sociales CO ₂ Fases de Producción y Construcción	Beneficios sociales CO ₂ Fase de Uso
Precio CO ₂ inferior	0,10 MM	0,90 MM
Precio CO ₂ central	0,16 MM	1,44 MM
Precio CO ₂ superior	0,22 MM	1,91 MM

Fuente: Elaboración propia.

Este costo se considera únicamente en el año de construcción, es decir, cuando ocurre la inversión, que en este caso corresponde al año 2014. Podemos apreciar que por cada tonelada de CO₂ emitida en los años de inversión, se evitan 9 en la fase de uso.

Luego, se calculó el beneficio social derivado del ahorro de combustible, según:

$$\text{Beneficio socialCO}_2 \text{Transporte} = \text{Ahorro EmisionesCO}_2 \text{eq}_{\text{Transporte}} * \text{Precio Social Carbono}$$

En este caso, para determinar el diferencial de emisiones de CO₂ entre la situación sin y con proyecto, se determinó primero el delta de costos de operación¹, y luego se consideró que 70% de estos costos equivalen al ahorro de combustible para vehículos livianos (automóviles y camionetas) y 60% para vehículos pesados (buses y camiones). Estos valores fueron determinados según la información de precios sociales proporcionada en la evaluación social del proyecto, que se muestra en el cuadro 31.

Cuadro 31
Precios sociales de los costos de operación

Tipo de vehículo	Combustible (\$/L)	Lubricante (\$/L)	Neumáticos (\$/unidad)	Vehículo nuevo (miles \$)	Horas mantención (\$/hora)
Automóvil	474	4 244	33 860	7 062	3 424
Camioneta	474	4 244	66 901	8 219	3 424
Buses	480	2 002	103 611	16 661	3 424
Camión 2 ejes	478	2 002	205 269	37 697	3 424
Camión +2 ejes	480	2 002	205 269	60 379	3 424

Fuente: Elaboración propia con base en "Resultados Evaluación 3 seleccionada Ejecución de obras de reposición y construcción de plataforma de la pista auxiliar, Ministerio de Obras Públicas de Chile".

Este beneficio social asociado al ahorro de combustible se considera anualmente a lo largo de la vida útil del proyecto. En el Anexo 1 se puede ver el detalle de los costos y beneficios sociales anualizados.

A modo de resumen, en el cuadro 32 se comparan los indicadores económicos.

Cuadro 32
Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios

	VAN (MM USD)	Cambio porcentual en el VAN frente a proyecto sin precio social CO ₂	TIR (en porcentajes)	Cambio absoluto en la TIR frente a proyecto sin precio social CO ₂
Proyecto sin Precio social CO ₂	10,48	-	9,7	-
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	11,31	8%	10,0	0,3%
Proyecto con Precio social CO ₂ central	11,82	13%	10,2	0,5%
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	12,26	17%	10,3	0,6%

Fuente: Elaboración propia.

Según el cuadro 32 el impacto de los costos sociales es significativo en la rentabilidad del proyecto pues el VAN y la TIR aumentan, lo que lo hace más atractivo socialmente, esto pese a que hay mayores costos sociales asociados a la inversión, estos son compensados a lo largo de la operación, producto de los ahorros de combustible. A mayor precio social de carbono, mayor es el aumento en estos indicadores, lo que refleja que esta diferencia se asocia en mayor proporción al ahorro de combustible (pues es un beneficio) y en menor proporción a las emisiones del proceso de construcción (pues es un costo). En este sentido, el mayor incentivo es que los costos operacionales sociales disminuyen haciendo el proyecto, lo que se traduce en menores emisiones por el uso de la carretera rehabilitada.

¹ Estos costos sociales de operación incluyen combustible, lubricante, neumáticos, vehículo nuevo y horas de mantención. Y no incluye tiempo de viaje.

C. Evaluación social Proyecto: Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa – La Venta (Honduras)

La evaluación económica se basa en comparar la carretera existente (situación sin proyecto) versus pavimentación con concreto hidráulico (situación con proyecto). El período de análisis es de 20 años, realizándose la estimación a partir del año 2016. Para descontar los flujos de costos y beneficios del proyecto se utilizó una tasa del 12%. A partir de este análisis se obtuvieron los siguientes indicadores de rentabilidad:

Cuadro 33
Indicadores de rentabilidad Pavimentación Concreto Hidráulico

VAN	TIR
104,02 MM USD	37,4%

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final de Rehabilitación Tramo Tegucigalpa- La Venta, TECNISA".

Para realizar este análisis se siguió la misma metodología descrita en la Evaluación social del Proyecto: Alto Chiza – Cuya.

En el cuadro 34 se muestra el costo social asociado a las fases de Producción de materiales y Construcción para cada escenario.

Cuadro 34
Costos sociales de CO₂ fases de Producción de materiales, Construcción y Beneficios sociales de CO₂ fase de Uso
(En dólares)

	Costos sociales CO ₂ Fases de Producción de y Construcción	Beneficios sociales CO ₂ Fase de Uso
Precio CO ₂ inferior	1,06 MM	6,23 MM
Precio CO ₂ central	1,70 MM	10,02 MM
Precio CO ₂ superior	2,26 MM	13,31 MM

Fuente: Elaboración propia.

Este costo se divide en partes iguales en los años de construcción, es decir, cuando ocurre la inversión, que en este caso corresponde a los años 2016 y 2017. Podemos apreciar que por cada tonelada de CO₂ emitida en la fase de inversión, se evitan 6 en la fase de uso. En el Anexo 2 se muestra el detalle de los costos y beneficios sociales anualizados.

En e cuadro 35 se comparan los indicadores de rentabilidad del proyecto y los 3 escenarios según precio social de CO₂. Se aprecia que, para el VAN, un aumento que va desde 6% para precio de CO₂ inferior igual a 20,2 USD/tCO₂ hasta 13% para precio de CO₂ superior igual a 43,2 USD/tCO₂, este aumento se debe a los beneficios sociales que genera la disminución del uso de combustible por la rehabilitación de la carretera. El caso de la TIR es similar, pero con aumentos menores. Estos aumentos reflejan la mayor rentabilidad que obtiene el proyecto al incorporar la evaluación social asociada a emisiones de CO₂.

Cuadro 35
Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios

	VAN (MM USD)	Cambio porcentual en el VAN frente a proyecto sin precio social CO ₂	TIR (en porcentajes)	Cambio absoluto en la TIR frente a proyecto sin precio social CO ₂
Proyecto sin Precio social CO ₂	104,02	-	37,4	-
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	110,24	6%	38,0	0,6%
Proyecto con Precio social CO ₂ central	114,03	10%	38,4	1,0%
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	117,34	13%	38,7	1,3%

Fuente: Elaboración propia.

IV. Análisis de alternativas para disminuir las emisiones de CO₂ asociadas a un camino

Esta parte del documento presenta los resultados de la cantidad de emisiones de CO₂eq de un camino al que se le han planteado dos tecnologías diferentes de pavimentación.

El primer caso, muestra 2 soluciones de capa de rodadura distinta (incluye capa de rodadura, la capa intermedia y base asfáltica). La primera solución corresponde a una mezcla asfáltica en caliente y la segunda está representada en el uso de una mezcla asfáltica tibia. Este análisis se presenta para un proyecto típico en Chile.

El segundo caso, muestra 2 soluciones de pavimentación. La primera solución corresponde a pavimento flexible (asfalto) y la segunda a pavimento rígido (concreto). Este análisis se presenta para un proyecto típico en Honduras.

A. Análisis comparativo de alternativas de tecnologías de asfalto

1. Análisis de ciclo de vida

a) Fases de producción de materiales y construcción

El proyecto en el que se realizó este análisis comparativo se denomina "Mejoramiento Ruta F.50, sector Orozco – Quilpué, Provincia de Valparaíso, Región de Valparaíso, Chile". La obra se localiza entre los Dm 295,73 al Dm 11.900, teniendo una longitud de 11.604 metros. Contempla dos singularidades: un puente de 34 metros de longitud y un tramo de 1.000 metros del camino con una capa de rodadura construida con una mezcla asfáltica tibia (Warm Mix por sus siglas en inglés). Esto significa que 10 570 metros del proyecto presentan una mezcla asfáltica en caliente (HMA por sus siglas en inglés) como solución para capa de rodadura.

La estructura del pavimento para ambas soluciones contempla los mismos espesores, que se muestran en el cuadro 36. El análisis incluye estructuras que incorporan tanto la capa de rodadura como la capa intermedia fabricadas con mezclas en caliente y tibias.

Cuadro 36
Estructura del pavimento del proyecto Carretera Lo Orozco-Quilpué

Capa	Espesor (mm)
Rodadura	50
Intermedia	50
Base granular	150
Subbase granular	150

Fuente: Elaboración propia.

Todo el proyecto presenta las siguientes características en cuanto a su perfil transversal:

- Ancho de Calzada: 7,0 m
- Ancho de Berma: 2,0 m (dos bermas)

El inventario de materiales se presenta en el cuadro 37.

Cuadro 37
Cantidades de obra del proyecto Lo Orozco - Quilpué

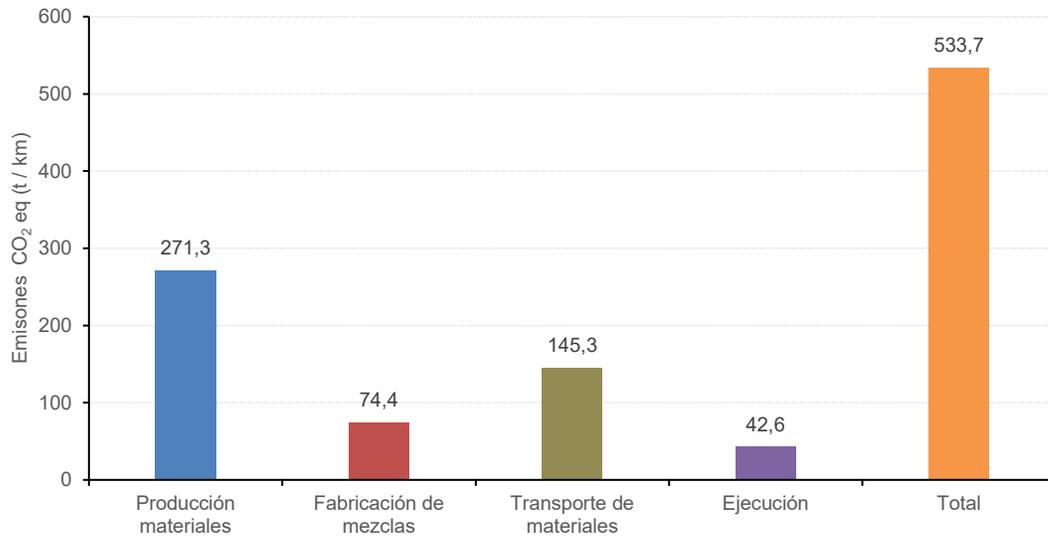
Items	Proyecto orozco quilpué		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Preparación área de trabajo	Remoción Pavimentos Asfálticos	m ²	60 601
	Despeje y Limpieza de la Faja	kg	11,6
Movimiento de Tierras	Remoción de Material Inadecuado	m ³	53 409
	Excavación en corte en TCN	m ³	45 239
	Excavación en corte en Roca	m ³	96 317
	Formación y compactación de Terraplenes	m ³	204 057
	Preparación de Subrasante	m ²	171 578
Capas Granulares	Subbase Granular	m ³	24 754
	Base Granular	m ³	31 740
Revestimientos	Imprimación	m ²	143 861
	Liga	m ²	185 370
	Concreto Asfáltico de Rodadura	m ³	6 535
	Concreto Asfáltico capa intermedia	m ³	4 334
	Base Asfáltica en caliente	m ³	4 334
	Mezcla tibia de Asfalto de Rodadura con Polímero	m ³	550
	Mezcla tibia de Asfalto de Capa intermedia con polímero	m ³	350
Mezcla tibia de base asfáltica con polímero	m ³	350	

Fuente: Elaboración propia con base en "Presupuesto de obra proyecto Lo Orozco – Quilpué MOP Chile".

Los gráficos 21 y 23 muestran los resultados de emisiones para cada uno de los tramos contemplados en el proyecto, uno con mezcla asfáltica en caliente (HMA) y otro con mezcla asfáltica tibia (WMix).

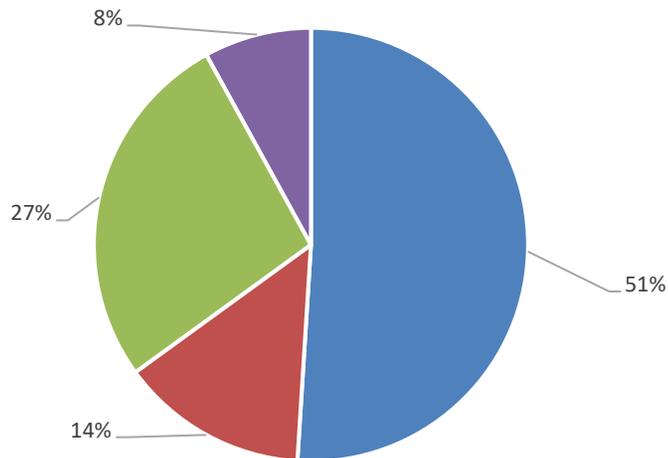
Gráfico 21
Emisiones totales de CO₂eq según ciclo de vida para estructura con mezcla asfáltica en caliente (HMA) proyecto Lo Orozco – Quilpué

A. Emisiones de CO₂ por km de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

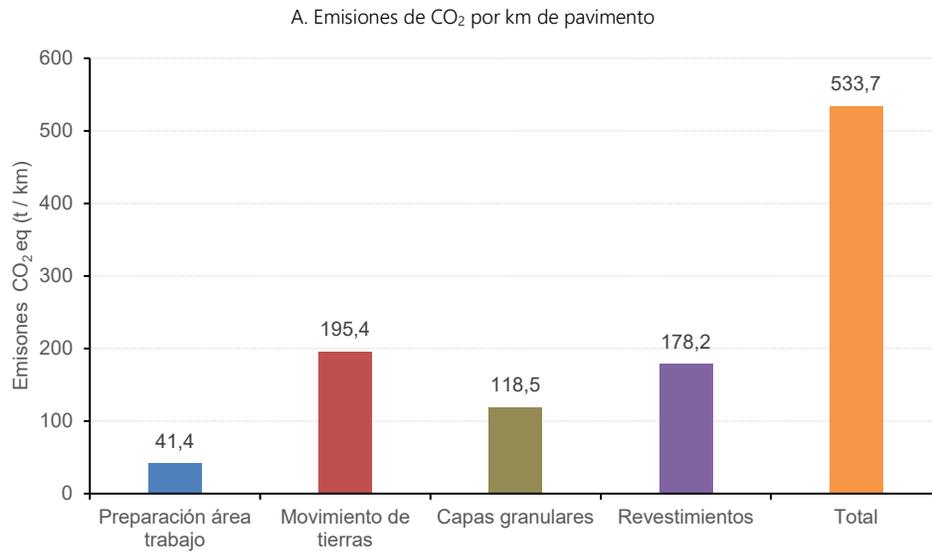
B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)



■ Producción materiales ■ Fabricación de mezclas ■ Transporte de materiales ■ Ejecución

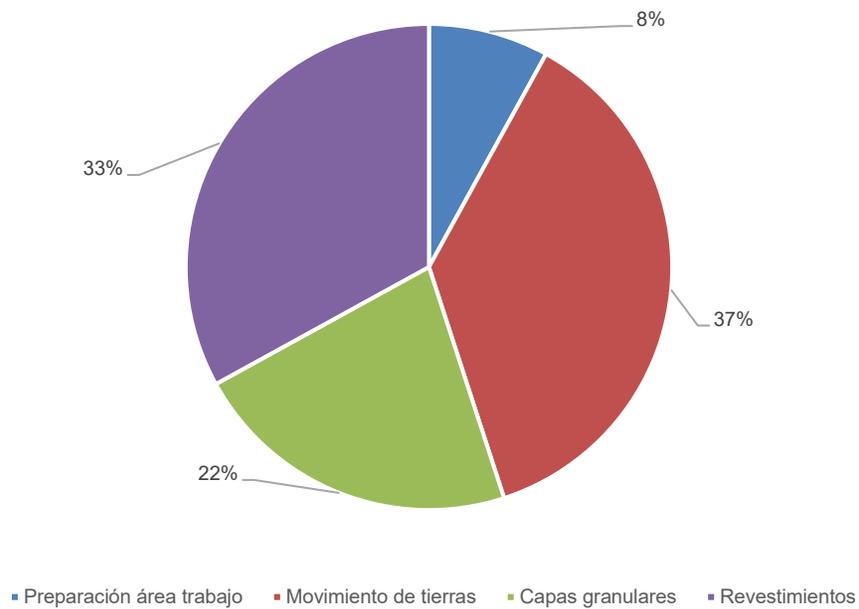
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 22
Emisiones totales de CO₂eq según procedimientos de construcción para estructura con mezcla asfáltica en caliente (HMA) proyecto Lo Orozco – Quilpué



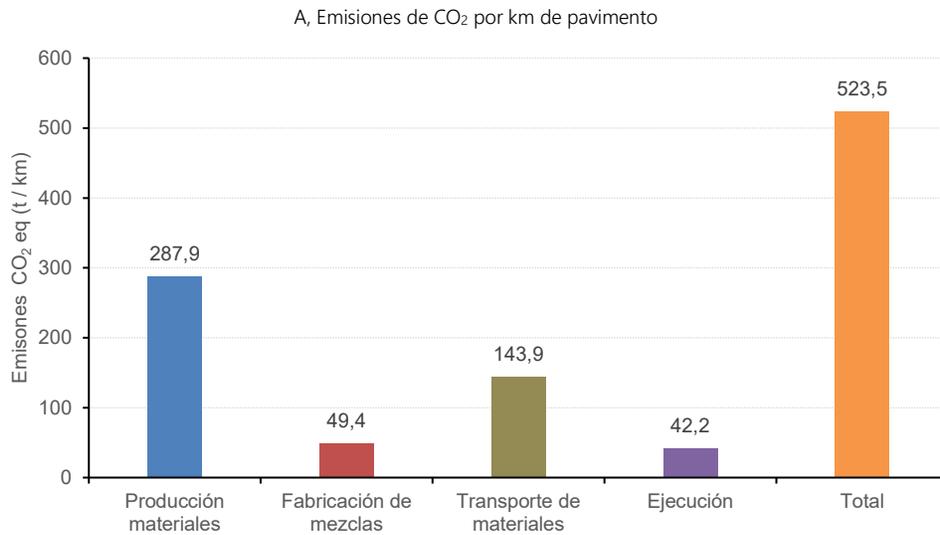
Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentaje)

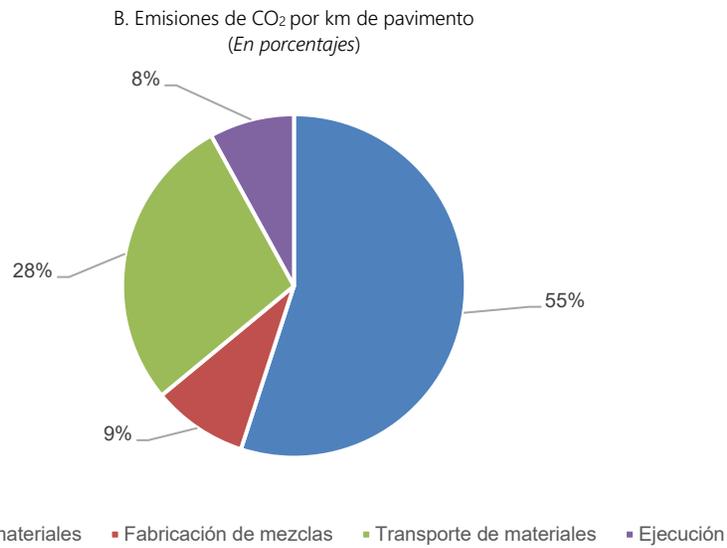


Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 23
Emisiones totales de CO₂eq según las etapas del ciclo de vida para estructura con mezcla asfáltica tibia (WMix)

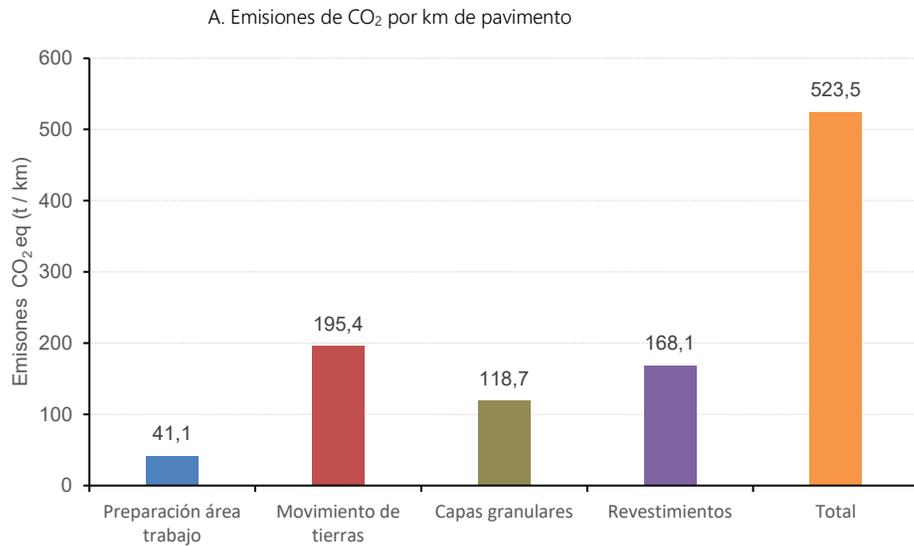


Fuente: Elaboración propia.



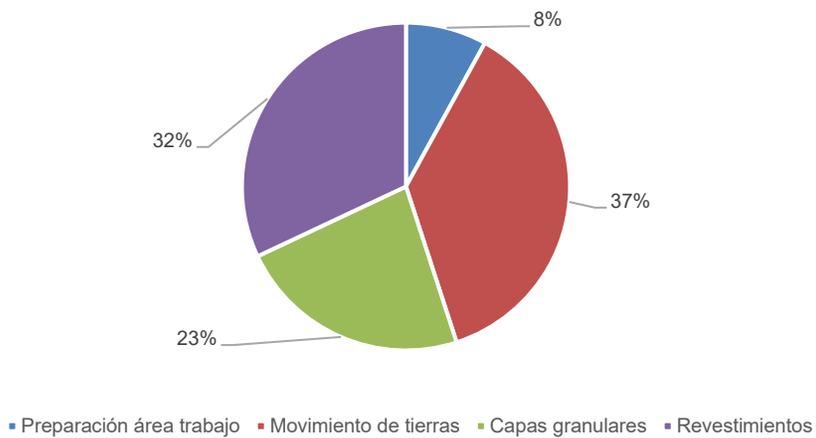
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 24
Emisiones totales de CO₂eq según procedimientos de construcción para estructura con mezcla asfáltica tibia (WMix)



Fuente: Elaboración propia.

B. Emisiones de CO₂ por km de pavimento
 (En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Al utilizar una mezcla asfáltica tibia (WMix) se reduce en un 1,9% las emisiones de CO₂eq cuando se evalúan las emisiones en la unidad funcional de km. Esta reducción se justifica principalmente por el proceso de fabricación de la mezcla asfáltica, producto que la fabricación de una mezcla tibia emite un 45% menos de CO₂eq comparado con una mezcla asfáltica en caliente. Las tecnologías deben seguir avanzando en la búsqueda de aditivos más eficientes que permitan reducir en mayor proporción las temperaturas tanto de mezclado como de compactación de las mezclas asfálticas. De esta forma, es

posible conseguir una mayor reducción de las emisiones al requerir menores temperaturas en planta, además de promover un ahorro energético al utilizar menor cantidad de combustible.

b) Fase de uso

Finalmente, se calcularon las emisiones asociadas al uso del camino durante su vida útil, las cuales se obtuvieron a partir de los consumos de combustibles estimados a través de la evaluación social del proyecto. Los documentos revisados corresponden a "Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué Etapa III" (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2013) y "Anexo IDI nuevos-2014. Mejoramiento Ruta F-50 Lo Orozco – Quilpué Etapa III, Com. Casa Blanca" (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2013). En ambos documentos no se especifica si el mejoramiento de la ruta se llevó a cabo utilizando HMA o WMix. Sin embargo, según la Asociación europea de pavimento de asfalto (EAPA, por sus siglas en inglés) se ha demostrado con casos de estudio en Alemania y Noruega que el rendimiento de ambas alternativas es similar, por lo que las emisiones asociadas al uso de la carretera no deberían cambiar según la alternativa de asfalto.

Para este análisis se sigue la misma metodología detallada en la sección Fase de Uso del proyecto Arica – Tambo Quemado (Chile).

El proyecto tiene una longitud de 11 604 m. El cuadro 38 muestra la proyección del tránsito medio diario anual.

Cuadro 38
Tránsito medio diario anual (vehículos/día)

Año	Automóvil	Camioneta	Buses	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Total
2015	1 446	525	167	480	114	2 732
2034	3 160	1 148	507	1 402	418	6 635

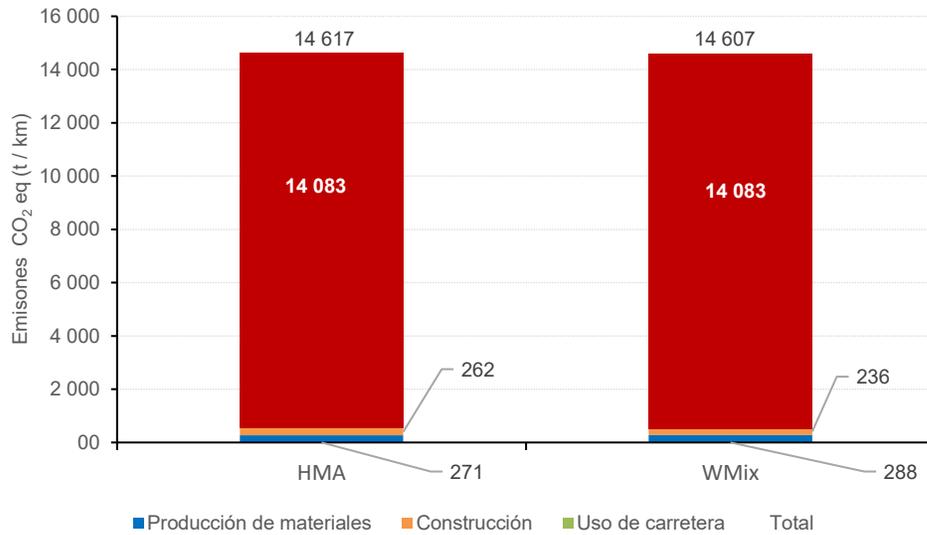
Fuente: Elaboración propia con base en "Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué Etapa III, Ministerio de Obras Públicas de Chile".

Este análisis se realizó para los 20 años de vida útil del proyecto, por lo tanto, considerando la suma de cada año se obtiene una emisión asociada a la fase de uso, equivalente a 14 083 tCO₂eq/km, lo que refleja una emisión de 163 425 tCO₂eq al considerar los 11,6 km de largo.

Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida

En los gráficos 25 y 26 se muestran las emisiones totales para las alternativas de HMA y WMix, considerando las fases de producción de materiales, construcción y de uso durante su vida útil (20 años).

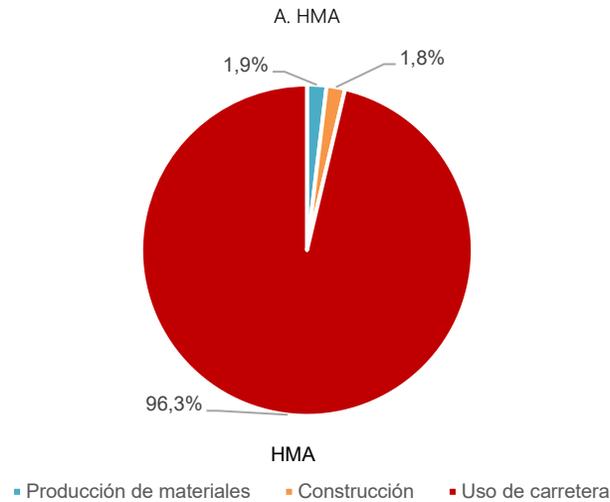
Gráfico 25
Emisiones de CO₂eq por km para HMA y WMix, según fase Proyecto Lo Orozco- Quilpué
(En emisiones de CO₂eq por km de carretera)



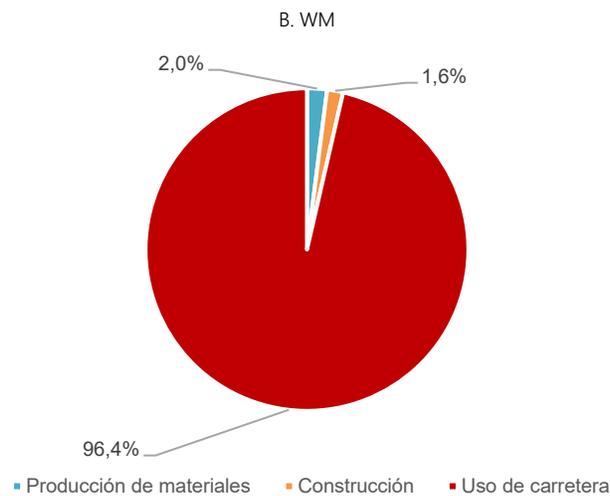
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 26
Emisiones de CO₂eq por km porcentuales para HMA y WMix, según fase Proyecto Lo Orozco- Quilpué

A. Emisiones de CO₂eq por km de carretera
(En porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Se concluye que la fase de uso es la que más aporta a las emisiones. Sin embargo, dentro de las posibilidades para bajar la huella de carbono, se debe tener foco en las fases de producción de materiales y construcción, en donde la alternativa de WMix es la que menos emite, alcanzando las 523 tCO₂eq/km, mientras que la alternativa de HMA alcanza las 534 tCO₂eq/km, es decir, la alternativa de WMix produce 2% menos de emisiones. Por lo tanto, se debería preferir frente a la alternativa comúnmente utilizada de HMA. Las emisiones totales suman 169 618 y 169 499 tCO₂eq para HMA y WMix respectivamente.

2. Evaluación social

Se realizó la evaluación social comparando la reposición de pavimento de asfalto (situación con proyecto) versus la carretera actual (situación sin proyecto).

Se determinó el beneficio social asociado al ahorro de combustible. Los documentos revisados son "Anexo IDI-2014. Mejoramiento Ruta F-50 Lo Orozco – Quilpué Etapa III, Com. Casa Blanca" (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2013) y "Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco – Quilpué Etapa III" (Ministerio de Obras Públicas de Chile, 2013).

Cabe destacar que el costo social asociado a la reposición de pavimento (fase de producción de materiales y construcción) se calculó considerando la suma de ambas tecnologías de pavimentación para obtener el largo total de la carretera, por lo que no es posible concluir que una alternativa sea más rentable que la otra, dado que de la evaluación del proyecto no es posible desprender que una solución sea más económica que la otra.

Según la evaluación social del proyecto se tienen los siguientes indicadores económicos:

Cuadro 39
Indicadores de rentabilidad proyecto Lo Orozco-Quilpué
(En dólares)

Inversión Privada	26,8 MM
Inversión Social	21,4 MM
Valor residual	-8,0 MM
VAN	11,8 MM
TIR	10,7 %

Fuente: Elaboración propia con base en "Anexo IDI-2014. Mejoramiento Ruta F-50 Lo Orozco-Quilpué Etapa III, Com. Casa Blanca, Ministerio de Obras Públicas de Chile".

Nota: (Moneda: 31/12/12).

En el cuadro 40 se comparan los indicadores de rentabilidad del proyecto y los 3 escenarios según precio social de CO₂. La consideración de los costos y beneficios sociales asociados al carbono favorecen la rentabilidad del proyecto. En el Anexo 4 se muestra el detalle de costos y beneficios anuales.

Cuadro 40
Comparación de indicadores de rentabilidad para distintos escenarios

	VAN (MM USD)	Cambio porcentual en el VAN frente a proyecto sin costos sociales	TIR (en porcentajes)	Cambio absoluto en la TIR frente a proyecto sin precio social CO ₂
Proyecto sin Precio social CO ₂	11,78	-	10,70	-
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	12,35	5%	10,87	0,17%
Proyecto con Precio social CO ₂ central	12,69	8%	10,98	0,28%
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	13,00	10%	11,07	0,37%

Fuente: Elaboración propia.

De esta evaluación es posible desprender que, en este proyecto, al igual que los 3 revisados en la sección anterior los indicadores de rentabilidad social mejoran al incorporar precios sociales del carbono y esto se acentúa a precios sociales mayores.

B. Análisis comparativo distintas soluciones de pavimentación

1. Análisis de ciclo de vida

a) Fases de producción de materiales y construcción

En este numeral se presenta una comparación de las emisiones de CO₂ para dos alternativas de pavimentación del proyecto de ampliación y mejoramiento de la carretera CA-5 Sur Tegucigalpa (Germania) – Valle de Hula. Dicha comparación se basa en dos estructuras de pavimento diferentes para una misma condición de tránsito y clima: una alternativa con capa de rodadura en concreto y la otra alternativa con capa de rodadura en asfalto.

Los diseños de cada uno de los pavimentos están consignados en el Informe Final del Estudio de Ingeniería presentado para el estudio de la Rehabilitación de la Carretera CA5 Sur en el tramo Tegucigalpa – La Venta (Técnica de Ingeniería S.A, 2016), específicamente en lo descrito en el Capítulo III.

Determinación de Estructura de Pavimento (Páginas 50 a 88). Los datos más relevantes a tener en cuenta para el análisis de los resultados entregados se refieren al período de tiempo para el cual es diseñada cada estructura, los que se presentan en el cuadro 41.

Cuadro 41
Período de diseño de los pavimentos

Tipo de estructura de pavimento	Período de diseño (años)
Pavimento flexible (asfalto)	10
Pavimento rígido (concreto)	20

Fuente: Elaboración propia con base en "Técnica de Ingeniería S.A, 2016".

Para efectos de comparación de la cantidad de CO₂eq emitido durante la materialización de cada uno de los pavimentos, se tomaron los datos de las cantidades de obra relacionadas en el Informe Final del Estudio de Ingeniería presentado para el estudio de la Rehabilitación de la Carretera CA5 Sur en el tramo Tegucigalpa – La Venta (Técnica de Ingeniería S.A, 2016), debido a que no se encontró la información de las cantidades reales de construcción (como construido – As Built) para todos los tramos. Por lo anterior y para que la comparación de los resultados fuera consistente, se utilizó la base de datos referidos en el numeral 4.3 "Costos de Construcción", páginas 90 a 109 de dicho informe.

A continuación, se describen con mayor detalle los datos de entrada y los resultados de las emisiones de CO₂eq para cada una de las alternativas de pavimentos propuestas para el proyecto, teniendo en cuenta como unidad de análisis el kilómetro de carretera.

Tramo 1, Tegucigalpa (Germania) – Desvío Aldea Santa Rosa

Los cuadros 42 y 43 muestran las cantidades de obra por kilómetro para las alternativas de pavimentos en asfalto y en concreto respectivamente. Se utilizó una distancia de acarreo promedio de 15 km tanto para las zonas de botadero, planta de concreto, planta de hormigón y planta de producción de agregados.

Cuadro 42
Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 1: Tegucigalpa (Germania)
Desvío Aldea de Santa Rosa para la alternativa en asfalto

Items	Proyecto tegucigalpa (germania) – desvío aldea de sanat rosa		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m ³	2 000
	Remoción de derrumbes	m ³	1 000
Capas Granulares	Sub base gradual	m ³	600
	Base granular estabilizada con cemento (f c= 3 Mpa)	m ³	450
	Cemento para estabilización	kg	35 000
Revestimientos	Riego de imprimación	l	2 955
	Concreto Asfáltico caliente AC-20 (e=4cm)	t	4 300
	Concreto Asfáltico modificado con polímero	t	3 600
	Concreto Asfáltico para bacheo	t	300
	Excavación para baches	m ³	500

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)"

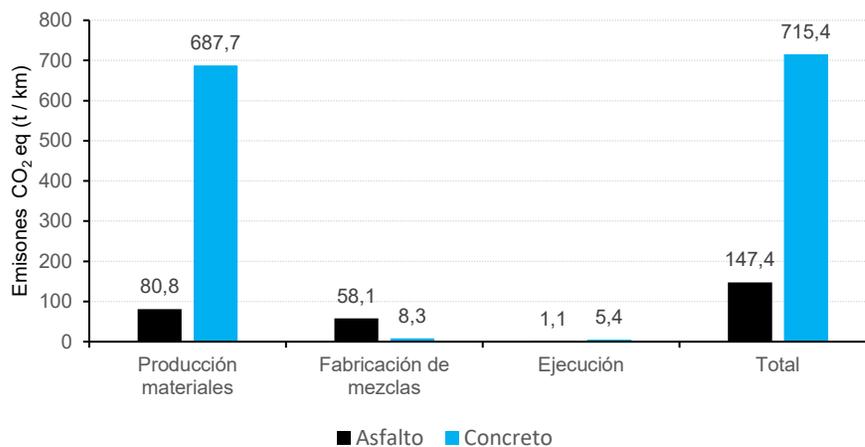
Cuadro 43
Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 1: Tegucigalpa (Germania)
Desvío Aldea de Santa Rosa para la alternativa en concreto

Items	Proyecto tegucigalpa (germania) – desvío aldea de sanat rosa		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m ³	2 000
	Remoción de derrumbes	m ³	1 000
Capas Granulares	Sub base gradual	m ³	500
	Base granular estabilizada con cemento (f c= 3 Mpa)	m ³	1 000
	Cemento para estabilización	kg	80 000
Revestimientos	Riego de imprimación	l	2 955
	Pavimento concreto hidráulico MR=4,5Mpa	m ³	7 200
	Pasadores de transmisión de carga, No.8	kg	48 900
	Barras de sujeción 5/8"	kg	5 432
	Concreto asfáltico para bacheo	t	300
	Excavación para baches	m ³	500

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

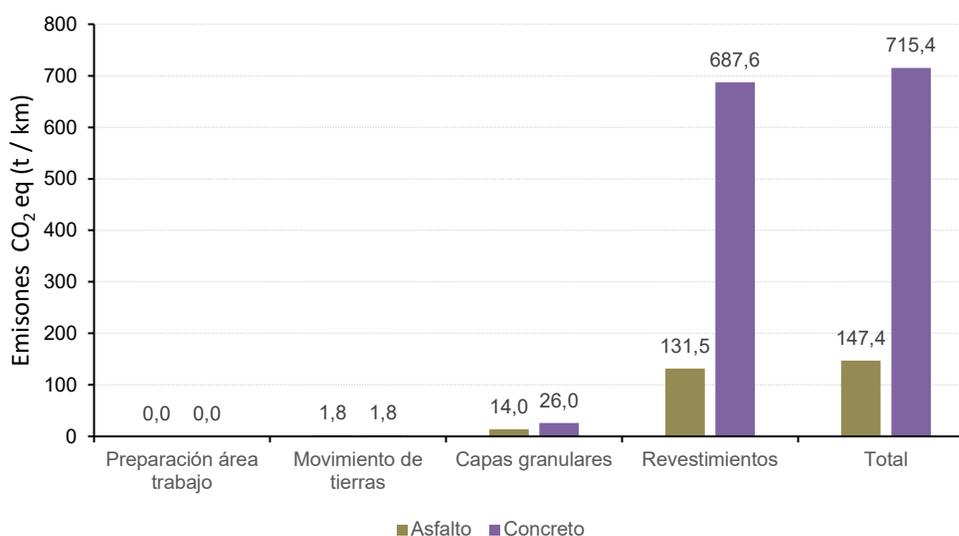
Los gráficos 27 y 28 presentan la cantidad de CO₂ equivalente emitido por kilómetro de pavimento según la etapa del ciclo de vida y las fases de construcción.

Gráfico 27
Emisiones de CO₂eq por km según etapa del ciclo de vida para el tramo 1



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 28
Emisiones de CO₂eq por km según las fases de construcción para el tramo 1



Fuente: Elaboración propia.

Tramo 2, Desvío Aldea Santa Rosa – Cerro de Hula

Los cuadros 44 y 45 muestran las cantidades de obra para las alternativas de pavimentos en asfalto y en concreto respectivamente. Se utilizó una distancia de acarreo promedio de 15 km tanto para las zonas de botadero, planta de concreto, planta de hormigón y planta de producción de agregados.

Cuadro 44
Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 2: Desvío Aldea de Santa Rosa
Cerro de Hula para la alternativa en asfalto

Items	Proyecto desvío aldea de santa rosa – cerro de hula		
	Partidas	Unidad	CANTIDAD
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m ³	3 500
	Remoción de derrumbes	m ³	1 000
Capas Granulares	Sub base gradual	m ³	4 800
	Base granular estabilizada con cemento (f c= 3 Mpa)	m ³	4 900
	Cemento para estabilización	kg	360 000
Revestimientos	Riego de imprimación	l	31 823
	Concreto asfáltico en caliente AC-20(e=4cm)	t	25 850
	Concreto asfáltico modificado c/polimero	t	15 900
	Concreto asfáltico para bacheo	t	800
	Excavación para baches	m ³	2 000

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

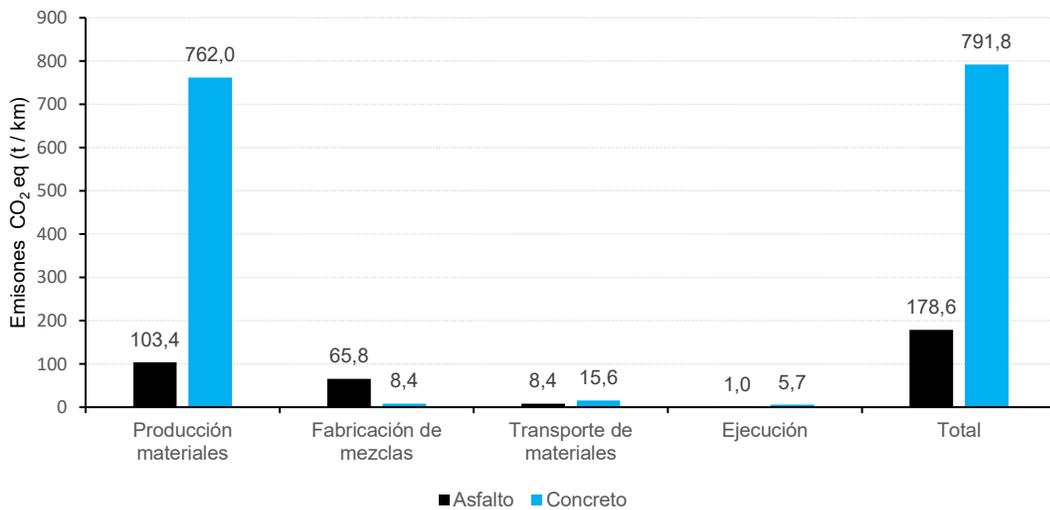
Cuadro 45
Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 2: Desvío Aldea de Santa Rosa
Cerro de Hula para la alternativa en concreto

Items	Proyecto desvío aldea de santa rosa – cerro de hula		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m ³	3 500
	Remoción de derrumbes	m ³	1 000
Capas Granulares	Sub base gradual	m ³	4 800
	Base granular estabilizada con cemento (f c= 3 Mpa)	m ³	8 500
	Cemento para estabilización	kg	700 000
Revestimientos	Riego de imprimación	l	31 823
	Pavimento de concreto hidráulicoMR=4,5Mpa	t	36 000
	Pasadores de transmisión de carga, No 8	kg	235 300
	Barras de sujeción 5/8"	kg	26 700
	Concreto asfáltico para bacheo	t	800
	Excavación para baches	m ³	2 000

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

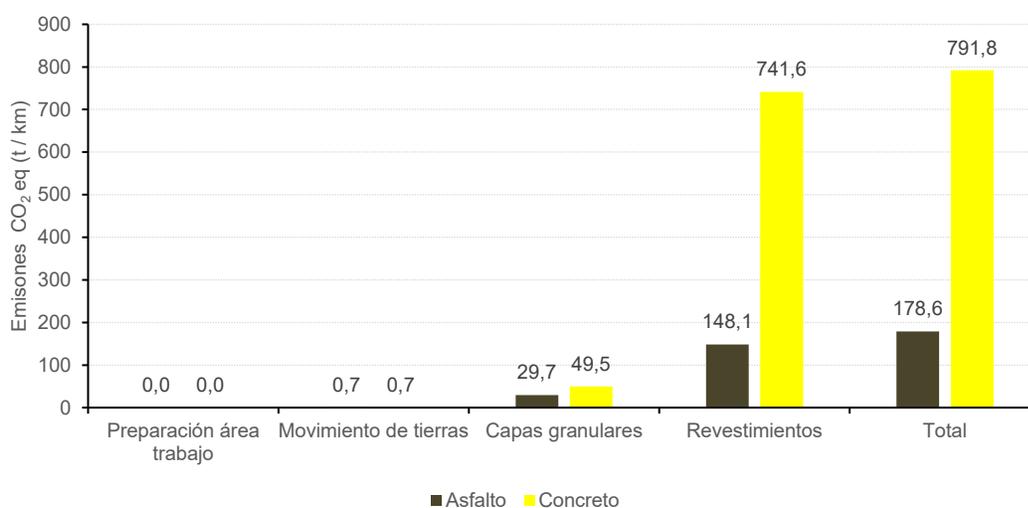
Los gráficos 29 y 30 presentan la cantidad de CO₂eq emitido por kilómetro de pavimento según la etapa del ciclo de vida y las fases de construcción.

Gráfico 29
Emissiones de CO₂eq por km según etapa del ciclo de vida para el tramo 2



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 30
Emisiones de CO₂eq por km según las fases de construcción para el tramo 2



Fuente: Elaboración propia

Tramo 3: Cerro de Hula – La Venta del Sur

Este tramo se analizó completo teniendo en cuenta el inventario de las cantidades de obra de los dos sub tramos que lo componen. Los cuadros 46 y 47 muestran las cantidades de obra para las alternativas de pavimentos en asfalto y en concreto respectivamente. Se utilizó una distancia de acarreo promedio de 15 km tanto para las zonas de botadero, planta de concreto, planta de hormigón y planta de producción de agregados.

Cuadro 46
Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 3: Cerro de Hula – La Venta del Sur para la alternativa en asfalto

Items	Proyecto cerro de hula – la venta del sur		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m ³	127 000
	Excavación en Roca	m ³	30 600
	Remoción de derrumbes	m ³	5 000
Capas Granulares	Sub base granular	m ³	21 700
	Base granular estabilizada con cemento (f c= 3 Mpa)	m ³	16 500
	Reciclado estructura existente estabilizada c/cem	m ³	14 600
	Cemento para estabilización	kg	2 550 000
Revestimientos	Riego de imprimación	l	195 482
	Concreto asfáltico en caliente AC-20(e=4cm)	t	55 650
	Concreto asfáltico modificado con polimero	t	35 220
	Concreto asfáltico para bacheo	t	4 000
	Excavación para baches	m ³	11 000

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

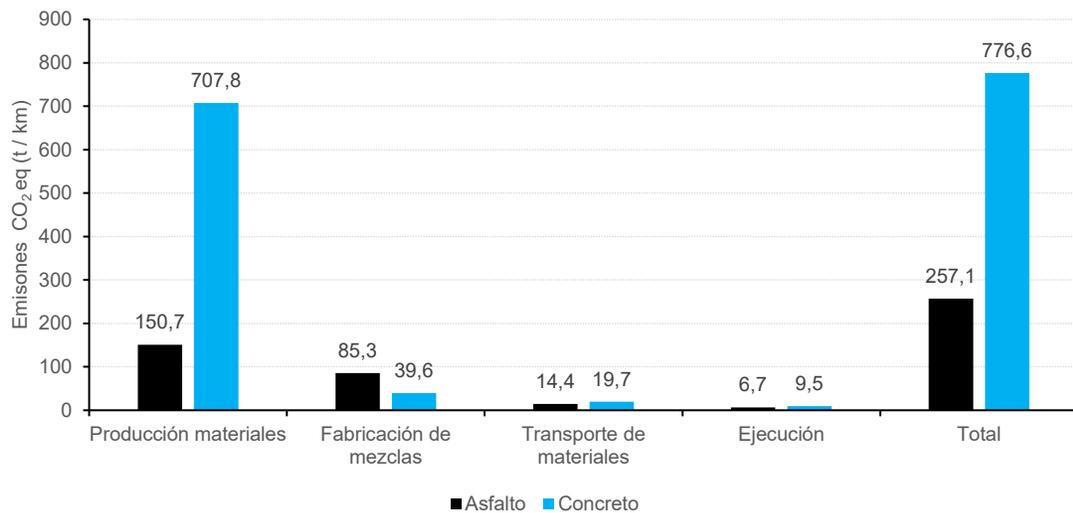
Cuadro 47
Cantidades de obra por kilómetro del Tramo 3: Cerro de Hula – La Venta del Sur para la alternativa en concreto

Items	Proyecto la venta del sur – cerro hula		
	Partidas	Unidad	Cantidad
Movimiento de Tierras	Excavación en corte en TCN	m ³	125 500
	Excavación en Roca	m ³	30 000
	Remoción de derrumbes	m ³	5 000
Capas Granulares	Sub base granular	m ³	17 800
	Base granular estabilizada con cemento	m ³	22 500
	Base reciclada estabilizada con cemento	m ³	8 550
	Cemento	kg	2 100 000
Revestimientos	Riego de imprimación	l	195 482
	Pavimento concreto hidráulico MR=4,5 Mpa	m ³	79 650
	Pasadores de transmisión de carga No. 8	kg	533 000
	Barras de sujeción 5/8	kg	63 350
	Concreto asfáltico para bacheo	t	4 000
	Excavación para baches	m ³	11 000

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final del Estudio de Ingeniería (Técnica de Ingeniería S.A, 2016)".

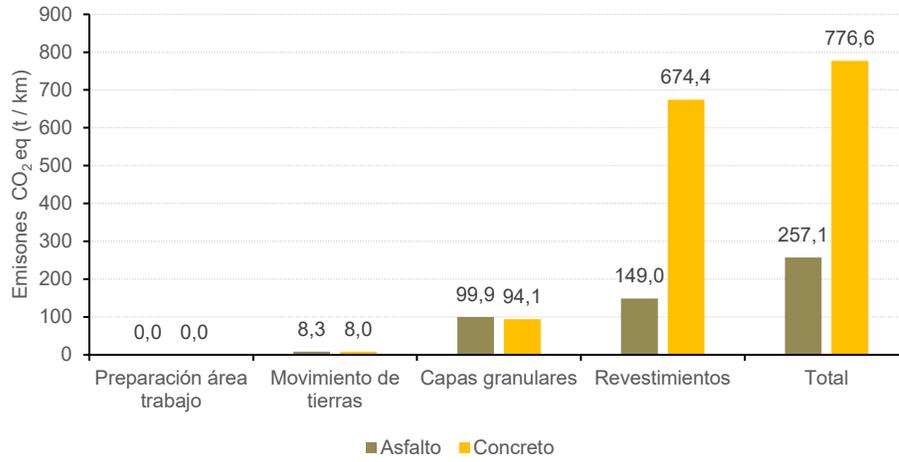
Los gráficos 31 y 32 presentan la cantidad de CO₂eq emitido por kilómetro de pavimento según la etapa del ciclo de vida y las fases de construcción.

Gráfico 31
Emissiones de CO₂eq por km según etapa del ciclo de vida para el tramo 3



Fuente: Elaboración propia.

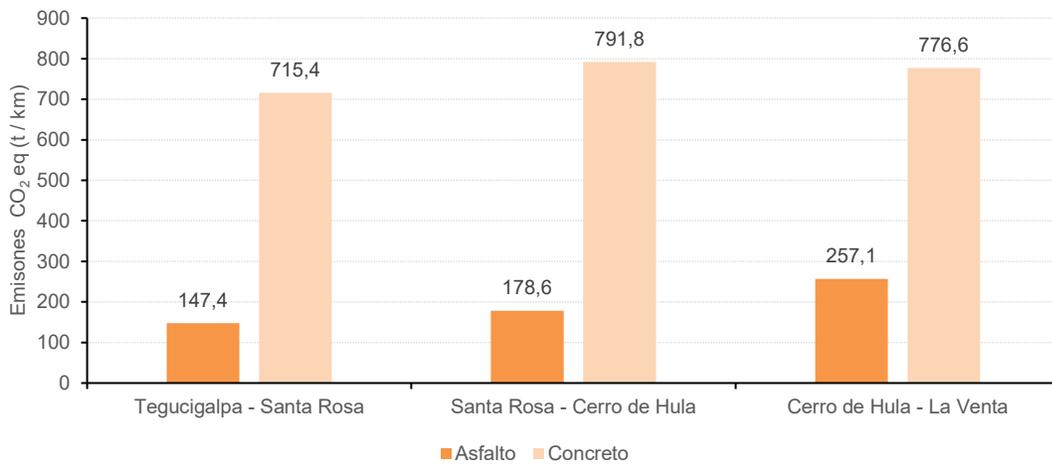
Gráfico 32
Emisiones de CO₂eq por km según las fases de construcción para el tramo 3



Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presenta la consolidación de los resultados para los tres tramos y cada tipo de pavimento. El gráfico 33 muestra que la cantidad de gases emitidos por el pavimento asfáltico, en términos de CO₂eq, oscila entre el 20% y 33% de los gases emitidos por el pavimento de concreto propuesto. Estos valores son consistentes con los encontrados en algunas investigaciones previas (Asphalt Pavement Alliance – APA, 2010), (Brown, s.f). Para el tramo 1 (Tegucigalpa – Santa Rosa) es del 20%, para el tramo 2 (Santa Rosa – Cerro de Hula) del 23% y finalmente para el tramo 3 (Cerro de Hula – La Venta) del 33%.

Gráfico 33
Emisiones de CO₂eq por km para los tres tramos y cada tipo de pavimento



Fuente: Elaboración propia.

b) Fase de uso

Continuando con el análisis, se calcularon las emisiones de la fase de uso diferenciando entre cada tecnología. Hultqvist (2010), después de medir el consumo de combustible, descubrió que, en la sección de pavimento de hormigón, un camión completamente cargado consume un 6,7% menos de combustible y el automóvil de pasajeros consume un 1,1% menos de combustible en comparación con la sección de pavimento de asfalto (Vashisth & Kumar, 2018); (Hultqvist, 2010).

Considerando los antecedentes descritos en la sección ACV Proyecto: Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa – La Venta (Honduras) y la referencia descrita anteriormente se obtienen los siguientes valores de emisiones:

Cuadro 48
Emisiones de CO₂ asociadas a la fase de uso según tipo de pavimentación

Alternativa	Emisiones de CO ₂ eq por km durante vida útil
Asfalto	27 360 tCO ₂ eq/km
Concreto	26 256 tCO ₂ eq/km

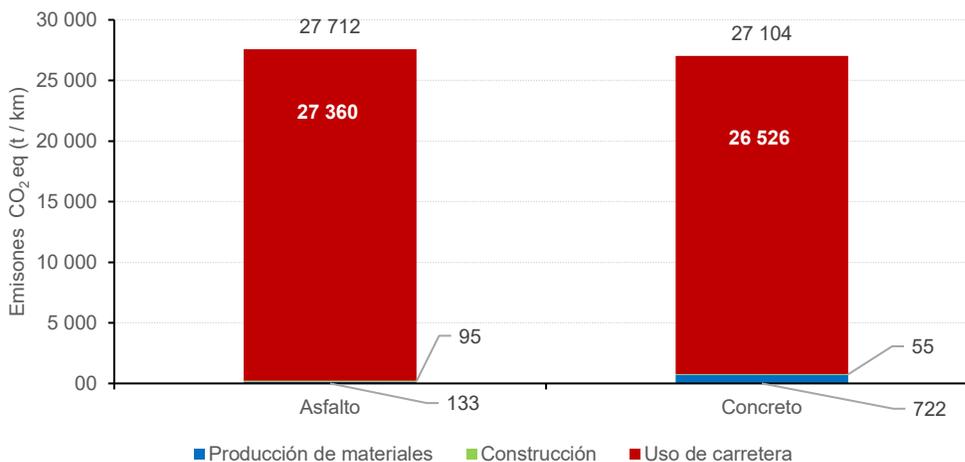
Fuente: Elaboración propia

En el cuadro 48 se aprecia que el concreto produce 4% menos de emisiones de CO₂ en la fase de uso. Dado que esta fase es la que más peso tiene sobre el análisis de ciclo de vida del proyecto, es que esta diferencia es significativa y debería ser un incentivo para preferir esta alternativa de pavimentación. Adicionalmente, considerando el largo del proyecto (49,7 km) se obtiene una emisión de 1.358.678 tCO₂eq para el asfalto y 1 303 885 tCO₂eq para el concreto.

Emisiones de CO₂ en el ciclo de vida

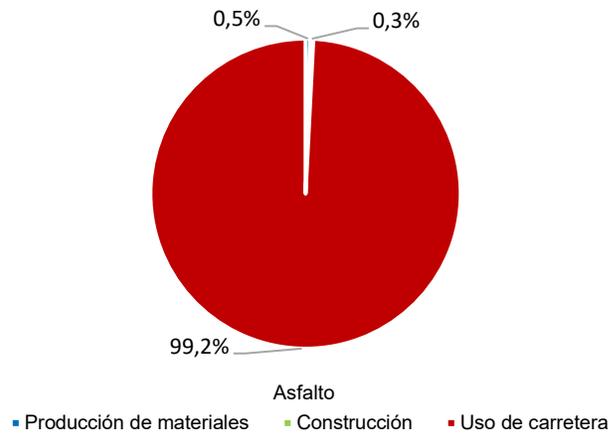
En el gráfico 34 y 35 se muestran las emisiones totales del proyecto, considerando las fases de producción de materiales, construcción y de uso durante su vida útil (20 años).

Gráfico 34
Emisiones de CO₂ para asfalto y concreto según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta, Asfalto
(En emisiones de CO₂ por km de carretera)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 35
Emisiones de CO₂ porcentuales para asfalto y concreto según fase Proyecto Tegucigalpa- La Venta, Asfalto
(En emisiones de CO₂ por km de carretera)



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Para ambos tipos de pavimentación la fase de uso es la que más aporta emisiones, siendo el asfalto con lo que más se emite, superando al concreto por casi un 6%. En caso contrario, para las fases de producción de materiales y construcción el concreto es lo que más emite. En este sentido, es importante considerar las emisiones en su totalidad para evaluar cuál tipo de pavimentación es recomendable. Se obtuvieron las emisiones totales considerando cada tramo del proyecto, lo que resultó en 1 369 975 tCO₂eq para el asfalto y 1 342 479 tCO₂eq para el concreto. Por lo tanto, a pesar de que las emisiones de la construcción con concreto cuadruplican a las de asfalto, esto se ve contrarrestado con las emisiones por el uso, y se hace más atractiva, en términos de ahorro de emisiones, la alternativa de concreto.

2. Evaluación social

Para este análisis se compararán los indicadores económicos para cada alternativa de pavimentación. En la tabla siguiente se muestran los indicadores de rentabilidad.

Cuadro 49
Indicadores de rentabilidad Pavimentación Concreto Hidráulico

	VAN (en dólares)	TIR (en porcentajes)
Concreto	104,02 MM	37,4%
Asfalto	84,52 MM	33,8%

Fuente: Elaboración propia con base en "Informe Final de Rehabilitación Tramo Tegucigalpa- La Venta, TECNISA".

Luego, tras contabilizar los costos y beneficios sociales de cada tipo de pavimentación, se obtienen los siguientes resultados.

Cuadro 50
Indicadores de rentabilidad alternativa de Concreto

	VAN (miles de millones de dólares)	Diferencia en el VAN frente a proyecto sin precio social CO ₂	TIR (en porcentajes)
Proyecto sin Precio social CO ₂	104,02	-	37,4
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	110,24	6,22	38,0
Proyecto con Precio social CO ₂ central	114,05	10,03	38,4
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	117,35	13,33	38,7

Fuente: Elaboración propia

Nota: Este análisis ya se realizó en la sección ACV Proyecto: Carretera CA5 Sur Tramo Tegucigalpa – La Venta (Honduras), por lo tanto, este cuadro es igual al Cuadro 33.

Cuadro 51
Indicadores de rentabilidad alternativa de Asfalto

	VAN (miles de millones de dólares)	Diferencia en el VAN frente a proyecto sin precio social CO ₂	TIR (en porcentajes)
Proyecto sin Precio social CO ₂	84,51	-	33,8
Proyecto con Precio social CO ₂ inferior	90,60	6,09	34,9
Proyecto con Precio social CO ₂ central	94,31	9,80	35,5
Proyecto con Precio social CO ₂ superior	97,54	13,03	36,0

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperar, la alternativa de asfalto resulta menos rentable, y como se concluyó anteriormente, es la que más emite CO₂ relativamente. En este sentido, la decisión de construir con concreto resultó más rentable y amigable con el medio ambiente, por tanto, existe un incentivo para la elección de esta alternativa. Del mismo modo, las diferencias en el VAN frente a la situación actual reflejan que, para el concreto, la diferencia se acentúa más pues con esta alternativa se generan mayores ahorros de combustible para los usuarios finales.

V. Conclusiones

En el presente estudio se propone un marco conceptual para el cálculo de las emisiones de GEI en el ciclo de vida de un camino, describiendo las distintas etapas y ajustándolo a la realidad de los países bajo estudio. Estas metodologías son extrapolables para otros países de la región de Latinoamérica y el Caribe.

Se realizaron 3 experiencias prácticas donde se construyeron análisis de ciclo de vida para las fases de producción de materiales, construcción y uso del camino. De este análisis es posible concluir que la mayor parte de las emisiones suelen estar asociadas a la fase de uso (entre 97% para el camino de concreto y 96-98% para los caminos de asfalto), teniendo poco peso relativo las emisiones de la fase de producción de materiales (3% para el camino de concreto y 1-2% para los caminos de asfalto) y la de construcción (0% para el camino de concreto y 1-2% para los caminos de asfalto). Evidentemente la fase de uso podría variar, dependiendo de los flujos de transporte proyectados para el camino en específico, por lo que la variabilidad de esta etapa es alta. Sin embargo, la variabilidad para las fases de producción de materiales y construcción, dependen principalmente de la materialidad del camino.

En términos del impacto en la evaluación social de los proyectos cuando se incorporan precios sociales del carbono (PSC), se analizaron los mismos 3 caminos de la sección anterior y se analizaron 3 escenarios de precio social del carbono (20,2, 32,5 y 43,2 USD/Ton CO₂) usando de referencias los valores oficiales de Chile (Subsecretaría de Evaluación Social, 2017). Los proyectos que realizaron una evaluación por medio de un análisis de costo-beneficio, pese al incremento en los costos asociadas a la inversión, las emisiones evitadas en la fase de uso, generaron un incremento en los ahorros sociales, lo que implicó mejoras en los VAN (8%-17% mayor para un proyecto y 6%-13% en el otro) y TIR (0,6%-1,3% mayor para un proyecto y 0,3%-0,6% en el otro) de ambos proyectos, esto ocurrió para todos los escenarios de precio social del carbono, siendo más beneficiosos los escenarios de alto precio al carbono. En el caso del proyecto que había sido evaluado por la metodología de costo efectividad, en este caso los resultados son equivalentes a los que utilizan metodología de costo-beneficio, implicando una mejora en el VAC, disminuyendo su valor, pero con un impacto bajo (entre 0,4% y 0,9% dependiendo del PSC).

En la siguiente sección se analizaron 2 alternativas para disminuir las emisiones de CO₂ en proyectos de camino y el impacto en la evaluación social de estas estrategias.

En el primer caso se analizó la posibilidad de utilizar 2 formas de construcción con asfalto mezcla caliente (técnica tradicional) y mezcla tibia (técnica de menores emisiones), esto permite disminuir las emisiones de CO₂ en un 2% respecto de las fases de producción de materiales y construcción, pero dado que el grueso de las emisiones se produce en la fase de uso y que no hay diferencias en la eficiencia de los vehículos entre estas tecnologías, el impacto en las 3 fases es solo de un 0,1%.

En el segundo caso se analizó las emisiones de CO₂ en las 3 fases para un proyecto de camino, evaluando las alternativas de usar concreto o asfalto. Este ejercicio resulta particularmente interesante dado que el concreto tiene mayores emisiones en la fase de construcción del camino, pero es más durable (lo que implica menos mantenciones) y permita una eficiencia media mayores de los vehículos que usaran ese camino en la fase de uso. Los resultados estiman que las emisiones, considerando dos soluciones de pavimentos para los mismos requerimientos del camino, en la etapa de construcción un pavimento de asfalto emite entre un 20% y un 33% de las emisiones que emite un pavimento en hormigón (esto sin considerar la etapa de mantenimiento o conservación). Pero dado que el peso relativo de la fase de uso es enorme para ambas alternativas (99% para asfalto y 97% en el caso del hormigón), mejorar la eficiencia en el consumo de combustible para los vehículos que usaran ese camino en la fase de uso, aunque sea en valores aparentemente bajos (4% en promedio), termina dando emisiones totales más bajas. Al incorporar los distintos PSC al análisis, estos resultados tienen a su vez un impacto equivalente en la evaluación social, ambas alternativas mejoran sus VAN (6%-13% mayor para el proyecto de concreto y 7%-15% mayor para el proyecto de asfalto) y TIR (0,6%-1,3% más puntos de TIR para el proyecto de concreto y 1,1%-2,2% mayor para el proyecto de asfalto), volviéndose más rentables socialmente al incorporar un PSC y este impacto es mejor a mayor valor del PSC. Por otro lado, la solución más rentable es la de concreto, con un VAN que va desde 110,24 a 117,35 MM USD, de manera equivalente a los resultados sin incorporar PSC, mientras que la solución de asfalto alcanza un VAN que va desde 90,60 a 97,54 MM USD. Por lo que, en la práctica, no cambia la decisión en el proyecto analizado, pero acentúa el resultado ya obtenido, lo que, en el caso de otro proyecto de camino, esta diferencia si podría implicar la diferencia para superar el criterio de rentabilidad social.

En términos generales, las emisiones estimadas para la fase de uso de las carreteras interurbanas estudiadas representan más del 95% del total de las emisiones en el ciclo de vida, para todos los caminos y diferentes tecnologías constructivas analizadas en este informe, lo que es consecuente con lo reportado en la literatura. Esto indica que es fundamental buscar alternativas que conlleven a la reducción de las emisiones en esta fase es crucial como por ejemplo: el cambio de combustible de los vehículos (biocombustibles, hidrógeno verde, combustibles sintéticos verdes o vehículos eléctricos), mejoramiento constante de la regularidad superficial de los pavimentos, superficies con fricción determinada, soluciones de cambio modal (traspasar una parte del transporte interurbano de carga y pasajeros a medios de menos emisiones, como el ferrocarril), entre otros.

En términos del impacto en la evaluación social de los proyectos de camino, la incorporación de un PSC en el rango de los valores utilizados por el Ministerio de Desarrollo Social de Chile (20,2 a 43,2 USD/t CO₂), tendría un impacto positivo para la evaluación social de proyectos de caminos, dado que lo hace más rentable en todos los casos analizados. Cabe destacar que a mayor PSC la rentabilidad social mejora para todos los casos analizados. Por otro lado, es recomendable hacer análisis de los proyectos considerando periodos de tiempo más extensos (al menos 40 años), permitiendo comparar alternativas en el ciclo de vida del camino. Para que esto se vea reflejado es relevante considerar tasas de descuento menores (5% o menos) o decrecientes en el tiempo.

Resulta relevante incorporar en futuros análisis las emisiones y los costos sociales del carbono de la fase de mantenimiento de los caminos, esto puede ser relevante en la comparación de soluciones en hormigón versus asfalto. También resulta de interés analizar el impacto de alternativas de cambio modal parcial al transporte interurbano de pasajeros y carga, como podrían ser los ferrocarriles.

Bibliografía

- Asian Development Bank. (2010), Methodology for estimating carbon footprint of road projects. Case study: India.
- AUSTROADS. (2012), Carbon and Asphalt: A review of Environmental Factors Including Emission Calculators.
- Azhar, A., & Toller, S. (2015), Life cycle assessment for the green procurement of roads: a way forward, go. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.068>.
- Base de datos estadísticos. Banco central de Chile. Recuperado en <https://sj3.bcentral.cl/Siete/secure/cuadros/arboles.aspx>.
- Chehovits, J., & Galehouse, L. (2010), Energy Usage and Greenhouse Gas Emissions of Pavement Preservation Processes for Asphalt Concrete Pavements. Compendium of Papers from the First International Conference on Pavement Preservation. Recuperado el June de 2019, de <https://trid.trb.org/view.aspx?id=919015>.
- Chen, X., & Wang, H. (2018), Life Cycle Assessment of Asphalt Pavement Recycling for Greenhouse Gas Emission with Temporal Aspect. *Journal of Cleaner Production* (187), 148-157.
- European Asphalt Pavement Association. (2014), The use of warm mix asphalt.
- Eurobitume (2012), Life Cycle Inventory. European Bitumen Association, Brussels.
- Federal Highway Administration (2016), Pavement Life Cycle Assessment Framework. Federal Highway Administration.
- Garc, L. C., Jim, F., & Arroyo, N. E. Z. (2013), La huella de carbono en las infraestructuras de transporte, 91-101. *Geosynthetica*. (2019). Carbon Footprint Advantages of HDPE Geomembranes. Recuperado el June de 2019, de <https://www.geosynthetica.com/carbon-footprint-hdpe-geomembranes-aug2018/>.
- Hanson, C. S., Noland, R. B., & Cavale, K. R. (2012), Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Materials Used in Road Construction. *Journal of the Transportation Research Board*, 174-181. <https://doi.org/10.3141/2287-21>.
- INECO; ECODES. (2012), Huella de carbono de la construcción de una línea ferroviaria de alta velocidad.
- Instituto del Cemento y del Hormigón Chileno - FICEM. (2019), Hoja de Ruta CHILE Industria del Cemento - Hacia una Economía Baja en Carbono. Santiago de Chile, Chile.
- IPCC (2006), Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories.
- _____(1996), Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouses Gas Inventories.
- Jullien, A., Dauvergne, M., & Proust, C. (2015), Road LCA: the dedicated ECORCE tool and database, 14040(Afnor 2006). <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0858-y>.

- Jullien, A., Dauvergne, M., & Cerezo, V. (2014), Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. *TRANSPORTATION RESEARCH PART D*, 29(2010), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.03.006>.
- Kawakami, A., Nitta, H., Kanou, T., & Kubo, K. (n.d.), *STUDY ON CO₂ EMISSIONS OF PAVEMENT RECYCLING METHODS*.
- Keijzer, E. E., Leegwater, G. A., Vos-effting, S. E. De, & Wit, M. S. De. (2015), Environmental Science & Policy Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in The Netherlands. *Environmental Science and Policy*, 54, 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.06.010>.
- Liébana, O., Pulido, M., & Gómez-Hermoso, J. (2015), Análisis de emisiones de CO₂ en la producción de forjados planos in situ de hormigón en comportamiento unidireccional. *Informes de la Construcción*, 67(539), 1-11. Obtenido de <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es/index.php/informesdelaconstruccion/article/view/4410/5088>.
- Mao, R., Duan, H., Dong, D., Zuo, J., Song, Q., Liu, G. Dong, B. (2017), Quantification of carbon footprint of urban roads via life cycle assessment: Case study of a megacity- Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.173>.
- Ministerio de Desarrollo Social. (2018), *Precios sociales 2018*.
- Ministerio de Desarrollo Social de Chile. (2017), *Estimación del Precio Social del CO₂*.
- Ministerio de Obras Públicas de Chile. (2013a), *Anexo IDI-2014. Mejoramiento Ruta F-50 Lo Orozco-Quilpué Etapa III, Com. Casa Blanca*.
- _____ (2013b), *Anexo IDI- 2014. Reposición ruta 11-CH, Arica- Tambo Quemado*.
- _____ (2013c), *Anexo IDI- 2014. Resultados Evaluación 3 seleccionada Ejecución de obras de reposición y construcción de plataforma de la pista auxiliar*.
- _____ (2013d), *Mejoramiento Ruta F-50, Sector Lo Orozco-Quilpué Etapa III*.
- Muench, S., Lin, Y., & Armstrong, A. (2014), *Roadprint: Practical Pavement Life Cycle Assessment (LCA) Using Generally Available Data*. En U. o. California (Ed.), *International Symposium on Pavement LCA 2014*, (págs. 249-262). Recuperado el June de 2019, de http://www.ucprc.ucdavis.edu/P-LCA2014/media/pdf/Papers/LCA14_Roadprint_LCA.pdf.
- National Center for Asphalt Technology. (2011), *NCAT. (A. University, Ed.)* Recuperado el June de 2019, de *Life-Cycle Assessment (LCA) - A Primer*: <https://www.floridardesonus.org/wp-content/uploads/2017/03/38thAC-Life-Cycle-Assesment-Primer-1.pdf>.
- National Pollutant Inventory. (1999), *Emission Estimation Technique Manual for Hot Mix Asphalt Manufacturing*.
- Nitta, H., & Nishizaki, I. (December de 2008), *LCA Evaluation of Recycle Pavement Using Scrap Tire and Waste Plastic*. *Journal of Pavement Engineering*, 79-86.
- Norris, G. A. (2001), *Integrating Economic Analysis into LCA*, 59–64.
- Price, S. (n.d.), *A Review of Worldwide Road Construction Carbon Accounting Practices and Outstanding Challenges*.
- Proust, C. (2014), *Lca of roads alternative materials in various reuse scenarios*, (February 2015).
- Ripoll, J. O., Farré, C. M., & Ripoll, J. O. (2007), *Mezclas bituminosas y emisiones de CO₂ Valoración cuantitativa de las alternativas disponibles*, 18–23.
- Road, R., & Road, R. (2012), *Benefits in Energy Savings and CO₂ Reduction by Using Reclaimed Asphalt Pavement*, 1–18.
- Santero, N. J., Masanet, E., & Horvath, A. (2011), *Resources, Conservation and Recycling Life-cycle assessment of pavements. Part I : Critical review. "Resources, Conservation & Recycling,"* 55(9–10), 801–809. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.03.010>.
- TECNISA (2016), *Informe Final de Rehabilitación Tramo Tegucigalpa- La Venta*.
- The World Bank. (2011), *Transport Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation: A Toolkit for Developing Countries*.
- University of California. (2007), *PaLate. Pavement Life-Cycle Assessment Tool for Environmental and Economics Effects*. Berkeley. Recovered on June 2019, from http://faculty.ce.berkeley.edu/horvath/palate.html#_Who_should_use_PaLATE?
- US EPA. (2011), *A-34 Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2010*.

- _____ (2000), Hot Mix Asphalt Plants - Emission Assessment Report.
- Val, M. A. D. E. L., & Pozo, J. D. E. L. (2012). Huella de carbono del reciclado en planta asfáltica en caliente con altas tasas de RAP Carbon Footprint of Recycled Hot-Mix Asphalt with High Rates of RAP Resumen Introducción.
- Wang, P. (2010), Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation A Toolkit for Developing Countries Introduction to Greenhouse Gas Emissions in Road Construction and Rehabilitation, (November).
- Zammataro, S. (2011), CHANGER The IRF GHG Calculator for Assessing Emissions in Road Construction.
- Zhang, Y., Liu, M., & Wang, Y. (2014). Assessment of CO₂ emissions and cost in fly ash concrete. International Conference on Frontier of Energy and Environmental Engineering. Recovered on June 2019, from https://www.researchgate.net/publication/280430859_Assessment_of_CO2_emissions_and_cost_of_fly_ash_concrete .

Anexos

Anexo 1

Flujos anuales Proyecto Alto Chiza-Cuya (Chile)

Cuadro A1
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ inferior

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Fujos Evaluación social original	MM USD	\$-23,43	\$1,92	\$1,99	\$2,05	\$2,12	\$1,76	\$2,27	\$2,35	\$2,43	\$2,51	\$1,96	\$2,69	\$2,78	\$2,87	\$2,97	\$2,25	\$3,19	\$3,29	\$3,41	\$3,53	\$22,78
Costos sociales CO2 Construcci	MM USD	\$0,07	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Transp	MM USD		\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,07	\$0,07	\$0,07	\$0,07	\$0,08	\$0,08	\$0,08	\$0,09	\$0,09	\$0,09	\$0,10	\$0,10	\$0,10	\$0,11	\$0,11	\$0,11
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$-23,49	\$1,98	\$2,05	\$2,12	\$2,19	\$1,83	\$2,34	\$2,42	\$2,50	\$2,59	\$2,04	\$2,77	\$2,86	\$2,96	\$3,07	\$2,35	\$3,28	\$3,40	\$3,51	\$3,64	\$22,90
Flujos VAN@20.2	MM USD	\$-23,49	\$1,87	\$1,82	\$1,78	\$1,73	\$1,36	\$1,65	\$1,61	\$1,57	\$1,53	\$1,14	\$1,46	\$1,42	\$1,39	\$1,36	\$0,98	\$1,29	\$1,26	\$1,23	\$1,20	\$7,14
VAN FINAL @20.2	MM USD	\$11,31																				
TIR @20.2		9,98%																				

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A2
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ central

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Fujos Evaluación social origini	MM USD	\$-23,43	\$1,92	\$1,99	\$2,05	\$2,12	\$1,76	\$2,27	\$2,35	\$2,43	\$2,51	\$1,96	\$2,69	\$2,78	\$2,87	\$2,97	\$2,25	\$3,19	\$3,29	\$3,41	\$3,53	\$22,78
Costos sociales CO2 Construcci	MM USD	\$0,11	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Trans	MM USD		\$0,09	\$0,10	\$0,10	\$0,10	\$0,11	\$0,11	\$0,12	\$0,12	\$0,12	\$0,13	\$0,13	\$0,14	\$0,14	\$0,15	\$0,15	\$0,16	\$0,17	\$0,17	\$0,18	\$0,18
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$-23,53	\$2,02	\$2,09	\$2,15	\$2,23	\$1,87	\$2,38	\$2,46	\$2,55	\$2,64	\$2,09	\$2,82	\$2,92	\$3,02	\$3,12	\$2,41	\$3,35	\$3,46	\$3,58	\$3,71	\$22,97
Flujos VAN@32.5	MM USD	\$-23,53	\$1,90	\$1,86	\$1,81	\$1,77	\$1,40	\$1,68	\$1,64	\$1,60	\$1,56	\$1,17	\$1,49	\$1,45	\$1,42	\$1,38	\$1,00	\$1,32	\$1,29	\$1,25	\$1,23	\$7,16
VAN FINAL @32.5	MM USD	\$11,82																				
TIR @32.5		10,15%																				

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A3
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ superior

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Fujos Evaluación social origini	MM USD	\$-23,43	\$1,92	\$1,99	\$2,05	\$2,12	\$1,76	\$2,27	\$2,35	\$2,43	\$2,51	\$1,96	\$2,69	\$2,78	\$2,87	\$2,97	\$2,25	\$3,19	\$3,29	\$3,41	\$3,53	\$22,78
Costos sociales CO2 Construcci	MM USD	\$0,14	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Trans	MM USD		\$0,13	\$0,13	\$0,13	\$0,14	\$0,14	\$0,15	\$0,15	\$0,16	\$0,17	\$0,17	\$0,18	\$0,18	\$0,19	\$0,20	\$0,21	\$0,21	\$0,22	\$0,23	\$0,24	\$0,24
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$-23,57	\$2,05	\$2,12	\$2,19	\$2,26	\$1,90	\$2,42	\$2,50	\$2,59	\$2,68	\$2,13	\$2,86	\$2,96	\$3,07	\$3,17	\$2,46	\$3,40	\$3,52	\$3,64	\$3,77	\$23,03
Flujos VAN@43.2	MM USD	\$-23,57	\$1,93	\$1,88	\$1,84	\$1,79	\$1,42	\$1,71	\$1,66	\$1,62	\$1,58	\$1,19	\$1,51	\$1,47	\$1,44	\$1,40	\$1,02	\$1,34	\$1,31	\$1,27	\$1,24	\$7,18

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2

Flujos anuales Proyecto Tegucigalga- La Venta (Honduras)

Cuadro A4
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ inferior

		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Fujos Evaluación social original	MM USD	-16,75	-16,27	\$6,56	\$8,39	\$22,79	\$14,71	\$17,36	\$20,47	\$24,04	\$34,57	\$18,45	\$21,49	\$24,85	\$29,31	\$40,40	\$23,87	\$29,51	\$36,26	\$44,24	\$63,10
Costos sociales CO2 Construcción	MM USD	\$0,39	\$0,39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beneficios sociales CO2 Transporte	MM USD	\$0,00	\$0,03	\$0,36	\$0,46	\$0,93	\$0,81	\$0,95	\$1,12	\$1,33	\$1,57	\$1,01	\$1,18	\$1,37	\$1,61	\$1,89	\$1,31	\$1,63	\$1,99	\$2,43	\$2,76
Beneficios netos TOTALES	MM USD	-17,14	-16,63	\$6,92	\$8,85	\$23,72	\$15,52	\$18,31	\$21,59	\$25,37	\$36,14	\$19,46	\$22,67	\$26,22	\$30,92	\$42,29	\$25,18	\$31,14	\$38,25	\$46,67	\$65,86
Flujos VAN@20.2	MM USD	-17,14	-14,85	\$5,52	\$6,30	\$15,07	\$8,80	\$9,28	\$9,77	\$10,25	\$13,03	\$6,27	\$6,52	\$6,73	\$7,09	\$8,65	\$4,60	\$5,08	\$5,57	\$6,07	\$7,65
VAN FINAL @20.2	MM USD	\$110,24																			
TIR @20.2	MM USD	38,0%																			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A5
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ central

		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Fujos Evaluación social original	MM USD	-16,75	-16,27	\$6,56	\$8,39	\$22,79	\$14,71	\$17,36	\$20,47	\$24,04	\$34,57	\$18,45	\$21,49	\$24,85	\$29,31	\$40,40	\$23,87	\$29,51	\$36,26	\$44,24	\$63,10
Costos sociales CO2 Construcción	MM USD	\$0,63	\$0,63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beneficios sociales CO2 Transporte	MM USD	\$0,00	\$0,04	\$0,58	\$0,74	\$1,50	\$1,30	\$1,53	\$1,80	\$2,13	\$2,52	\$1,63	\$1,89	\$2,20	\$2,58	\$3,04	\$2,10	\$2,61	\$3,20	\$3,90	\$4,44
Beneficios netos TOTALES	MM USD	-17,38	-16,85	\$7,14	\$9,13	\$24,29	\$16,01	\$18,89	\$22,27	\$26,17	\$37,09	\$20,08	\$23,38	\$27,05	\$31,89	\$43,44	\$25,97	\$32,12	\$39,46	\$48,14	\$67,54
Flujos VAN@32.5	MM USD	-17,38	-15,05	\$5,69	\$6,50	\$15,43	\$9,08	\$9,57	\$10,08	\$10,57	\$13,38	\$6,46	\$6,72	\$6,94	\$7,31	\$8,89	\$4,75	\$5,24	\$5,75	\$6,26	\$7,84
VAN FINAL @32.5	MM USD	\$114,03																			
TIR @32.5	MM USD	38,4%																			

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A6
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ superior

		2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
Fujos Evaluación social original	MM USD	-16,75	-16,27	\$6,56	\$8,39	\$22,79	\$14,71	\$17,36	\$20,47	\$24,04	\$34,57	\$18,45	\$21,49	\$24,85	\$29,31	\$40,40	\$23,87	\$29,51	\$36,26	\$44,24	\$63,10
Costos sociales CO2 Construcción	MM USD	\$0,83	\$0,83	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Beneficios sociales CO2 Transporte	MM USD	\$0,00	\$0,06	\$0,77	\$0,98	\$1,99	\$1,72	\$2,03	\$2,40	\$2,83	\$3,35	\$2,16	\$2,52	\$2,93	\$3,43	\$4,03	\$2,80	\$3,48	\$4,25	\$5,18	\$5,90
Beneficios netos TOTALES	MM USD	-17,58	-17,05	\$7,33	\$9,37	\$24,78	\$16,43	\$19,39	\$22,87	\$26,87	\$37,92	\$20,61	\$24,01	\$27,78	\$32,74	\$44,43	\$26,67	\$32,99	\$40,51	\$49,42	\$69,00
Flujos VAN@43.2	MM USD	-17,58	-15,22	\$5,84	\$6,67	\$15,75	\$9,33	\$9,83	\$10,34	\$10,85	\$13,67	\$6,64	\$6,90	\$7,13	\$7,50	\$9,09	\$4,87	\$5,38	\$5,90	\$6,43	\$8,01
VAN FINAL @43.2	MM USD	\$117,34																			
TIR @43.2	MM USD	38,7%																			

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 3

Flujos anuales Proyecto Arica-Tambo quemado (Chile)

Cuadro A7
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ inferior

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	
Fujos Evaluación social original	MM USD	\$21,22	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,48	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,68	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,87	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$-8,28
Costos sociales CO2 Construcción	MM USD	\$0,21	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Transporte	MM USD		\$0,05	\$0,05	\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,07	\$0,07	\$0,07	\$0,07	\$0,08	\$0,08	\$0,08	\$0,08	\$0,09	\$0,09	\$0,09	\$0,09	\$0,09	\$0,10
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$21,43	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$0,42	\$-0,01	\$-0,02	\$-0,02	\$-0,02	\$0,61	\$-0,03	\$-0,03	\$-0,03	\$-0,03	\$0,79	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,05	\$-0,05	\$-0,05	\$-8,38
Flujos VAC@20.2	MM USD	\$21,43	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$0,32	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$0,34	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$-0,01	\$0,33	\$-0,02	\$-0,02	\$-0,02	\$-0,02	\$-0,02	\$-2,61
VAC FINAL @20.2	MM USD	\$19,61																					

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A8
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ central

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	
Fujos Evaluación social original	MM USD	\$21,22	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,48	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,68	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,87	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$-8,28
Costos sociales CO2 Construcción	MM USD	\$0,34	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Transporte	MM USD		\$0,08	\$0,09	\$0,09	\$0,09	\$0,10	\$0,10	\$0,10	\$0,11	\$0,11	\$0,11	\$0,12	\$0,12	\$0,12	\$0,13	\$0,13	\$0,14	\$0,14	\$0,15	\$0,15	\$0,16	\$0,16
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$21,56	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,05	\$0,39	\$-0,05	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$0,57	\$-0,07	\$-0,07	\$-0,08	\$-0,08	\$0,74	\$-0,09	\$-0,10	\$-0,10	\$-0,11	\$-0,11	\$-8,44
Flujos VAC@32.5	MM USD	\$21,56	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$0,29	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$0,32	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$0,31	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,04	\$-0,03	\$-0,03	\$-2,63
VAC FINAL @32.5	MM USD	\$19,26																					

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A9
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ superior

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	
Fujos Evaluación social original	MM USD	\$21,22	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,48	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,68	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,87	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$-8,28
Costos sociales CO2 Construcción	MM USD	\$0,45	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Transporte	MM USD		\$0,11	\$0,12	\$0,12	\$0,12	\$0,13	\$0,13	\$0,14	\$0,14	\$0,15	\$0,15	\$0,16	\$0,16	\$0,17	\$0,17	\$0,18	\$0,18	\$0,19	\$0,20	\$0,20	\$0,20	\$0,21
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$21,67	\$-0,06	\$-0,07	\$-0,07	\$-0,08	\$0,36	\$-0,08	\$-0,09	\$-0,09	\$-0,10	\$0,53	\$-0,11	\$-0,11	\$-0,12	\$-0,13	\$0,70	\$-0,14	\$-0,14	\$-0,15	\$-0,16	\$-0,16	\$-8,49
Flujos VAC@43.2	MM USD	\$21,67	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$0,27	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$0,30	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$-0,06	\$0,29	\$-0,05	\$-0,05	\$-0,05	\$-0,05	\$-0,05	\$-2,65
VAC FINAL @43.2	MM USD	\$18,96																					

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 4

Flujos anuales Proyecto Lo Orozco- Quilpué

Cuadro A10
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ inferior

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Fujos Evaluación social origi	MM USD	\$-21,32	\$1,80	\$1,89	\$1,98	\$2,08	\$1,91	\$2,30	\$2,41	\$2,53	\$2,66	\$2,39	\$2,94	\$3,09	\$3,25	\$3,42	\$3,07	\$3,78	\$3,98	\$4,19	\$4,41	\$12,65
Costos sociales CO2 Construc	MM USD	\$0,12	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Tran	MM USD		\$0,00	\$0,04	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,05	\$0,06	\$0,06	\$0,06	\$0,07	\$0,07	\$0,07	\$0,08	\$0,08	\$0,08	\$0,09	\$0,09	\$0,10	\$0,10	\$0,11
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$-21,44	\$1,80	\$1,94	\$2,03	\$2,13	\$1,96	\$2,35	\$2,47	\$2,59	\$2,73	\$2,46	\$3,01	\$3,17	\$3,33	\$3,50	\$3,15	\$3,87	\$4,07	\$4,29	\$4,51	\$12,76
Flujos VAN@20.2	MM USD	\$-21,44	\$1,70	\$1,72	\$1,70	\$1,69	\$1,46	\$1,66	\$1,64	\$1,63	\$1,61	\$1,37	\$1,59	\$1,57	\$1,56	\$1,55	\$1,32	\$1,52	\$1,51	\$1,50	\$1,49	\$3,98
VAN FINAL @20.2	MM USD	\$12,34																				
TIR @20.2		10,87%																				

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A11
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ central

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Fujos Evaluación social original	MM USD	\$-21,32	\$1,80	\$1,89	\$1,98	\$2,08	\$1,91	\$2,30	\$2,41	\$2,53	\$2,66	\$2,39	\$2,94	\$3,09	\$3,25	\$3,42	\$3,07	\$3,78	\$3,98	\$4,19	\$4,41	\$12,65
Costos sociales CO2 Construc	MM USD	\$0,20	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Transp	MM USD		\$0,00	\$0,07	\$0,07	\$0,08	\$0,08	\$0,09	\$0,09	\$0,10	\$0,10	\$0,11	\$0,11	\$0,12	\$0,12	\$0,13	\$0,14	\$0,14	\$0,15	\$0,16	\$0,17	\$0,18
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$-21,52	\$1,80	\$1,96	\$2,06	\$2,16	\$1,99	\$2,38	\$2,50	\$2,63	\$2,77	\$2,50	\$3,05	\$3,21	\$3,38	\$3,55	\$3,21	\$3,93	\$4,13	\$4,35	\$4,58	\$12,83
Flujos VAN@32.5	MM USD	\$-21,52	\$1,70	\$1,75	\$1,73	\$1,71	\$1,49	\$1,68	\$1,67	\$1,65	\$1,64	\$1,40	\$1,61	\$1,60	\$1,58	\$1,57	\$1,34	\$1,55	\$1,53	\$1,52	\$1,51	\$4,00
VAN FINAL @32.5	MM USD	\$12,69																				
TIR @32.5		10,98%																				

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A12
Flujos anuales e indicadores de rentabilidad para precio social CO₂ superior

		2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
Fujos Evaluación social origi	MM USD	\$-21,32	\$1,80	\$1,89	\$1,98	\$2,08	\$1,91	\$2,30	\$2,41	\$2,53	\$2,66	\$2,39	\$2,94	\$3,09	\$3,25	\$3,42	\$3,07	\$3,78	\$3,98	\$4,19	\$4,41	\$12,65
Costos sociales CO2 Construc	MM USD	\$0,27	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00	\$0,00
Beneficios sociales CO2 Tran	MM USD		\$0,00	\$0,09	\$0,10	\$0,10	\$0,11	\$0,11	\$0,12	\$0,13	\$0,13	\$0,14	\$0,15	\$0,16	\$0,16	\$0,17	\$0,18	\$0,19	\$0,20	\$0,21	\$0,22	\$0,24
Beneficios netos TOTALES	MM USD	\$-21,59	\$1,80	\$1,98	\$2,08	\$2,18	\$2,01	\$2,41	\$2,53	\$2,66	\$2,80	\$2,53	\$3,09	\$3,25	\$3,42	\$3,59	\$3,25	\$3,98	\$4,18	\$4,40	\$4,63	\$12,89
Flujos VAN@43.2	MM USD	\$-21,59	\$1,70	\$1,77	\$1,75	\$1,73	\$1,51	\$1,70	\$1,68	\$1,67	\$1,66	\$1,41	\$1,63	\$1,61	\$1,60	\$1,59	\$1,36	\$1,56	\$1,55	\$1,54	\$1,53	\$4,02
VAN FINAL @43.2	MM USD	\$12,99																				
TIR @43.2		11,07%																				

Fuente: Elaboración propia.

El precio social del carbono es un instrumento de política con el que es posible incidir, a través de decisiones de inversión pública, en el estilo de desarrollo de los países. En este estudio se presentan los resultados de simulaciones realizadas con distintos precios sociales del carbono, sobre la base de una tipología de proyectos de inversión en el sector de la infraestructura de caminos en Chile y Honduras. En primer lugar, se propone un marco conceptual para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero en el ciclo de vida de un camino, describiendo sus distintas etapas y ajustándolo a la realidad de los países en estudio. Esta metodología puede extrapolarse a los casos de otros países de América Latina y el Caribe. En el marco de la realización de tres experiencias prácticas, se elaboran análisis de ciclo de vida para las fases de producción de materiales, construcción y uso del camino. Por último, se incorporan al análisis de evaluación social los costos sociales asociados a las emisiones del proceso de construcción de la carretera y los beneficios sociales vinculados a la disminución del consumo de combustible, de los montos de inversión y de los costos de mantenimiento del proyecto.