



INSTRUCTIVO METODOLÓGICO PARA LA INCORPORACIÓN DE EMISIÓN DE CONTAMINANTES EN LA EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS DE TRANSPORTE VIAL URBANO

SANTIAGO, MARZO 2022
DIVISIÓN DE EVALUACIÓN SOCIAL DE INVERSIONES
MINISTERIO DE DESARROLLO SOCIAL Y FAMILIA

1. Introducción

Los proyectos de transporte urbano que solicitan financiamiento del Estado requieren previamente un informe del Ministerio de Desarrollo Social y Familia que analice su rentabilidad técnica económica, para ello, se determinan sus beneficios los que provienen principalmente de ahorros de tiempo y combustible junto con sus correspondientes costos de operación.

El Anteproyecto de la Política Energética Nacional (Ministerio de Energía, 2021), en su segundo propósito: *"Energía para una mejor calidad de vida"*, indica que un 37% del consumo energético de Chile corresponde al sector Transporte¹, y que el transporte es responsable del 26% del total de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)². Actualmente, un 99% del consumo energético en el sector transporte proviene de fuentes fósiles importadas³.

Por otro lado, Chile ha adquirido compromisos de reducción de emisiones en el marco de las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional (NDC por sus siglas en inglés) y que son el núcleo del Acuerdo de París, realizado en diciembre de 2015, y de la consecución de los objetivos allí definidos para el largo plazo. Estas contribuciones encarnan los esfuerzos de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático. En este sentido, Chile ha propuesto alcanzar la neutralidad de GEI al 2050 y la reducción de sus emisiones para limitar el aumento de temperatura del planeta por debajo de 2°C, tal como se ha establecido en el Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático. Alcanzar la Carbono Neutralidad al 2050 es una visión y meta del país, que tiene implicancias económicas, sociales y ambientales, por lo que se requieren esfuerzos transversales para poder materializarla.

En 2011, el Sistema Nacional de Inversión Pública de Chile efectuó la primera estimación del Precio Social del Carbono (PSC) utilizando un valor proxy basado en el precio de mercado de los instrumentos que se transan bajo el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), correspondiente a 4,05 USD por tonelada de CO₂ equivalente⁴ en el 2011, y 8,45 USD por tonelada de CO₂ equivalente en el año 2016. Este precio no reflejaba el precio sombra del carbono debido a las distorsiones de mercado, por este motivo, con apoyo de la Embajada Británica en Chile, la empresa consultora POCH realizó una actualización de conceptos y metodología internacionales de cuantificación de costos sociales y precios sombra. A partir de esta revisión fue seleccionado el modelo de Reino Unido para estimar un precio sombra del carbono equivalente, a partir de la disposición de Chile a reducir emisiones, la cual consiste en su meta de mitigación bajo el Acuerdo de París.

De esta forma, con la nueva metodología adoptada el 2016, el cálculo del precio sombra del carbono se basó en la curva de costo de abatimiento que permite cumplir con la meta de mitigación del país, la cual entregó un valor central de 32,5 USD/t CO₂ equivalente para el PSC. Este desarrollo ha permitido incorporar, desde el año 2017, la estimación de cambios de emisiones de CO₂ en proyectos de edificios públicos, agua potable rural, proyectos ferroviarios de carga y pasajeros, entre otros.

¹ Ministerio de Energía, Balance Nacional de Energía, 2018.

² Ministerio de Medio Ambiente, Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (INGEI), 2020.

³ Ministerio de Energía, Balance Nacional de Energía, 2019

⁴ El CO₂ equivalente se define como el producto del peso de los gases de efecto invernadero (GEI) en toneladas métricas por su potencial de calentamiento atmosférico (PCA).

Como fue mencionado, este precio social es calculado de manera de ser coherente con la política ambiental adoptada por nuestro país. Sin embargo, para que este instrumento genere los efectos esperados, requiere ser complementado con enfoques metodológicos capaces de cuantificar los cambios – aumentos o reducciones – de emisiones de CO₂ en las iniciativas de inversión pública.

En ese contexto, se vuelve crucial incorporar en la evaluación social de proyectos los efectos de las consideraciones ambientales en términos de la reducción de emisiones de contaminantes, particularmente en el sector transporte (dado su aporte a las emisiones totales), con metodologías capaces de cuantificar los cambios de emisiones de GEI de las iniciativas de inversión pública. Al respecto, dichas consideraciones ya se encuentran incorporadas en las metodologías de proyectos de transporte ferroviario, así como para proyectos de transporte interurbano; sin embargo, para los proyectos de transporte urbano aún no se había incorporado esta dimensión de análisis.

De esta manera, el presente instructivo es una guía para incorporar a la evaluación social de proyectos de transporte vial urbano los beneficios – o desbeneficios – asociados a la emisión de contaminantes ambientales, entregando directrices claras a los formuladores, de manera complementaria a las metodologías vigentes.

2. Indicaciones de Aplicación

2.1. Tipo de iniciativas de inversión a los que aplica

La incorporación de consideraciones medioambientales en la evaluación social de proyectos será exigible para iniciativas de inversión (IDI) nuevas⁵ de vialidad urbana estructurante que postulen al Sistema Nacional de Inversiones (SNI), así como para estudios básicos que consideren modelación de transporte, como los Diagnósticos de Sistema de Transporte Urbano (STU), desarrollados por el Programa de Vialidad y Transporte Urbano SECTRA.

En el caso de los proyectos de vialidad urbana intermedia y vialidad urbana local, no será exigible la incorporación de consideraciones medioambientales, por lo que no se requiere la aplicación de este instructivo.

2.2. Criterios de aplicación

Este instructivo será válido a partir de la fecha del oficio que lo formaliza en el Sistema Nacional de Inversiones, considerando los siguientes criterios en su aplicación:

2.2.1. Estudios Básicos de Transporte que consideren modelación de transporte

- a. Deberán incorporar la cuantificación y valoración de emisiones en la evaluación social como parte de sus Términos de Referencia (TDR), si corresponde.

2.2.2. Proyectos de Vialidad Urbana Estructurante

- a. IDI nueva que postula de perfil a prefactibilidad: Deberá incorporar en los TDR la cuantificación y valoración de emisiones contaminantes en la evaluación social, tanto a nivel de análisis de alternativas como para la alternativa escogida. Su inclusión en la evaluación social con la cual se postula será opcional, a menos que los antecedentes utilizados para confeccionar el perfil permitan la aplicación de este instructivo.
- b. IDI nueva que postula desde perfil o prefactibilidad a factibilidad: Deberá incorporar en los TDR la cuantificación y valoración de emisiones contaminantes en la evaluación social de la alternativa en estudio. En proyectos que postulen a los procesos presupuestarios de 2022 y 2023, se aceptará provisionalmente que no cuenten con la cuantificación y valoración de emisiones en la evaluación social con la cual se postula, siendo exigible a partir de la postulación al proceso presupuestario 2024.
- c. IDI nueva que postula desde perfil, prefactibilidad o factibilidad a diseño: Deberá incorporar en los TDR una actualización de la evaluación socioeconómica de la alternativa escogida, que incluya la cuantificación y valoración de las emisiones contaminantes. En proyectos que postulen a los procesos presupuestarios de 2022 y 2023, se aceptará provisionalmente que no cuenten con la cuantificación y valoración de emisiones en la evaluación social con la cual se postula, siendo exigible a partir de la postulación al proceso presupuestario 2024.

⁵ Según lo establecido en el documento Normas, Instrucciones y Procedimientos para el proceso De Inversión Pública (NIP) del Ministerio de Desarrollo Social y Familia - Ministerio de Hacienda, Mayo 2020.

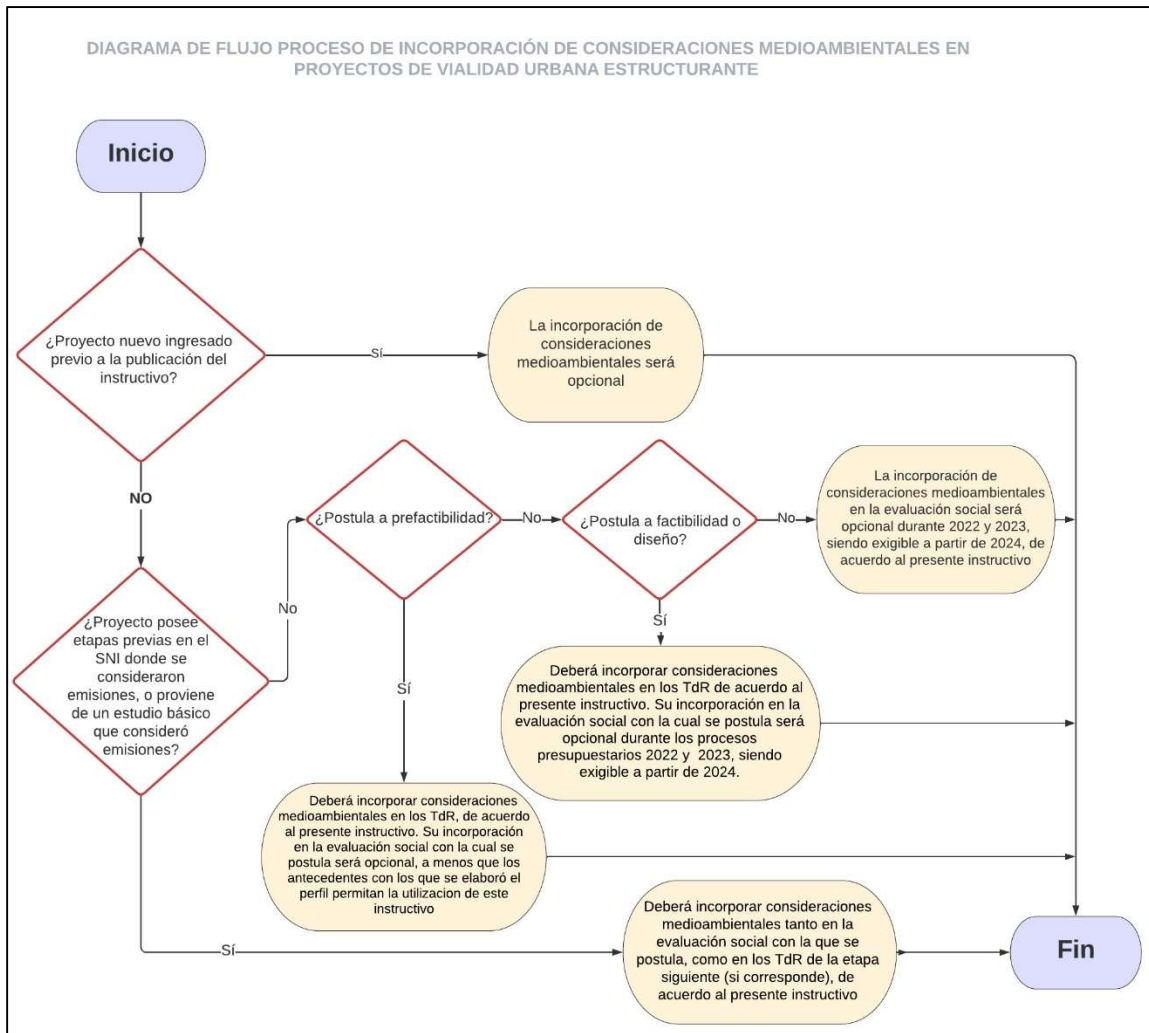
d. IDI nueva que postula desde diseño a ejecución: La incorporación de consideraciones medioambientales en la evaluación social será opcional durante las postulaciones a los procesos presupuestarios del año 2022 y 2023, siendo exigible a partir de la postulación correspondiente al proceso presupuestario 2024.

g. IDI nueva que postule desde perfil, prefactibilidad o factibilidad a ejecución: La incorporación de consideraciones medioambientales en la evaluación social será opcional en los proyectos que postulen a los procesos presupuestarios 2022 y 2023, debiendo incorporarse de manera obligatoria en los proyectos que postulen al proceso presupuestario 2024 en adelante.

2.2.3. Consideraciones adicionales en proyectos

- a. Todos los proyectos que hayan considerado la cuantificación y valoración de emisiones contaminantes en alguna de sus etapas previas deberán continuar incorporándolas en etapas posteriores.
- b. Si una iniciativa proviene de un Estudio Básico que incorporó la cuantificación y valoración de emisiones contaminantes, esta deberá incluir dicha componente en la evaluación social de la postulación al SNI.
- c. En el caso de las evaluaciones de proyectos sometidos a Reevaluaciones o con RATE Incumplimiento de Normativa (IN), la incorporación de emisiones a la evaluación social de acuerdo a este instructivo será opcional; si en la recomendación original se incluyeron emisiones, entonces será exigible.
- d. En el caso de Reevaluaciones a Estudios Básicos, deberán incorporar en los Términos de Referencia la cuantificación y valoración de emisiones, si corresponde.
- e. De manera excepcional, y previa autorización de la jefatura de la División de Evaluación Social de Inversiones, una iniciativa de inversión podrá eximirse de incluir consideraciones ambientales en la evaluación social de postulación de acuerdo con el presente instructivo, lo cual deberá estar debidamente fundamentado.

Los criterios de aplicación descritos en la sección 2.2.2, para proyectos de vialidad urbana estructurante, se resumen en el siguiente diagrama de flujo:



Como ya fue mencionado, en el caso de proyectos sometidos a reevaluaciones o con RATE IN, aplica el literal c). de la sección 2.2.3.

Modificaciones en la gradualidad de aplicación de este instructivo serán indicadas en los Requisitos de Información por Sector (RIS), previo análisis y evaluación conjunta entre entidades técnicas y MDSF.

Cualquier situación que no esté contenida en los casos anteriormente descritos, deberá ser resuelta por la jefatura de la División de Evaluación Social de Inversiones.

3. Marco Conceptual

Para valorizar las emisiones de contaminantes en proyectos de transporte vial urbano, es necesario estimar los aumentos – o disminuciones – en las emisiones de CO₂ equivalente para la situación sin proyecto (situación base optimizada) y la situación con proyecto, y transformarlos monetariamente a través del precio social del carbono definido por el MDSF, para luego calcular la diferencia entre ambos escenarios y determinar los beneficios (o desbeneficios) atribuibles a esta dimensión. Para ello, se considerarán factores unitarios de emisión de contaminantes y consumo de combustible, proporcionados y validados por SECTRA, así como variables propias de las modelaciones de este tipo de proyectos de transporte, como son los largos de arcos, flujos vehiculares, número de detenciones, número medio de paradas, velocidad, entre otros.

La emisión de contaminantes atmosféricos asociados al tráfico vehicular se puede desagregar según el tipo de descarga, es decir, identificar las emisiones de tráfico en 3 estados: para vehículos en movimiento –en función de la velocidad–, por detenciones y aquellas relativas al estado ralenti de los vehículos.

Para ello, se estimará la Valorización Anual de Emisiones contaminantes (*VAE*) en cada situación y corte temporal, expresadas en [\$/año], las que resultan de la agregación de su valor para cada semana tipo considerada en la modelación:

$$VAE = \sum_{m=1}^{NS} \sum_{i=1}^{NP_m} VAE_{im} \quad (I)$$

Donde *VAE_{im}* corresponde a la valorización de las emisiones contaminantes en el período *i* de la semana tipo *m*, expresadas en [\$/año]. Además, *NS* corresponde al conjunto de todas las semanas tipo consideradas por el formulador, mientras que *NP_m* son todos los períodos *i* considerados en una semana tipo *m*.

Para obtener la valorización anual de las emisiones de contaminantes *VAE_{im}* – basado en una semana tipo *m* definida por el formulador – expresada en [\$/año], se considerará la siguiente expresión:

$$VAE_{im} = \frac{PSC}{\alpha} \cdot FE_i \sum_{j=1}^{NV} \left(\sum_{k \in NA} q_{ijk} [L_k \cdot em_j(v_{ik}) + h_{ik} \cdot ed_j(v_{ik}) + d_{ik} \cdot er_j] \right) \quad (II)$$

Donde:

- PSC*: Precio social del carbono [\$/TON CO₂ eq].
- α*: Factor de conversión de toneladas a gramos, equivalente a 10⁶.
- FE_i*: Factor de expansión anual del período *i* [h/año].
- NV*: Conjunto de tipos de vehículo considerados en la evaluación.
- NA*: Conjunto de arcos de la red.
- q_{ijk}*: Flujo de vehículos tipo *j* en el arco *k* durante el período *i* [veh/h].

L_k : Longitud del arco k [km].

$em_j(v_{ik})$: Emisión unitaria de gramos de CO₂ equivalente por kilómetro en movimiento para vehículos tipo j , en función de la velocidad del arco k en el período i [g/km].

h_{ik} : Número medio de detenciones por vehículo en el arco k y período i [det/veh].

$ed_j(v_{ik})$: Emisión unitaria de gramos de CO₂ equivalente por detención para vehículos tipo j , en función de la velocidad del arco k en el período i [g/det].

d_{ik} : Demora media por vehículo en el período i para un arco k [h/veh].

er_j : Emisión unitaria de gramos de CO₂ equivalente por hora en ralentí para vehículos tipo j [g/hr].

En la fórmula anterior, se ha omitido de manera intencional el subíndice m , asociado a la semana tipo, de manera de no sobrecargar la expresión funcional; en este sentido, es claro que las variables PSC , α y L_k y er_j son las únicas que no dependen de la semana tipo m .

De la modelación de transporte se obtienen – además de los flujos q_{ijk} – las variables h_{ik} , d_{ik} y las velocidades v_{ik} ; todas estas variables poseen una componente asociada a la semana tipo, por lo tanto, en caso de que el formulador considere más de una semana tipo, deberá incorporarlas a través de la ecuación (I).

En el caso que h_{ik} y/o d_{ik} no forme parte de las salidas de la modelación de transporte, deberán ser consideradas iguales a cero en ambas situaciones (con y sin proyecto).

Finalmente, para determinar la valorización neta anual de emisiones contaminantes asociadas a un proyecto de vialidad urbana, ΔVAE , expresada en [\$/año], se utiliza la siguiente fórmula, que corresponde a la diferencia entre la situación sin proyecto (que corresponde a la situación base optimizada) y la situación con proyecto:

$$\Delta VAE = VAE^{SP} - VAE^{CP} \quad (III)$$

Donde:

VAE^{SP} : Corresponde a la valorización de las emisiones anuales de contaminantes en la situación sin proyecto (situación base optimizada) en [\$/año].

VAE^{CP} : Corresponde a la valorización de las emisiones anuales de contaminantes en la situación con proyecto en [\$/año].

Las emisiones unitarias de contaminantes por tipo de vehículo en movimiento, por detenciones y en ralentí vienen dados en las Tablas 1, 2 y 3, respectivamente. Las

velocidades no incluidas en las tablas deben ser interpoladas para determinar las emisiones unitarias por tipo.

Tabla 1: Emisiones unitarias de CO₂ equivalente para vehículos en movimiento, en función de la velocidad

INTERVALO VELOCIDAD [KM/H]	Emisión unitaria en movimiento [g CO ₂ eq / km]							
	Vehículo Liviano	Taxi	Taxibus	Bus	Bus Articulado	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Motocicletas
[5, 10)	426,57	327,18	1125,41	1327,71	1683,83	1001,73	1630,77	386,46
[10, 20)	346,79	259,56	896,32	1081,92	1303,24	728,72	1166,75	279,05
[20, 30)	267,24	207,69	705,53	842,33	1032,13	524,02	842,14	184,19
[30, 40)	224,56	180,76	607,20	716,93	887,53	441,10	705,34	146,25
[40, 50)	198,04	165,46	555,03	648,08	801,15	404,59	632,32	128,25
[50, 60)	181,41	156,75	526,78	609,03	745,96	391,13	588,44	119,77
[60, 70)	172,09	152,34	513,86	588,94	711,36	391,27	560,52	116,83
[70, 80)	168,87	151,11	514,11	585,92	695,30	400,53	542,47	117,62
[80, 90)	171,15	152,53	525,90	590,92	715,33	414,08	532,20	121,24
[90, 100)	178,68	156,45	528,04	583,88	731,18	416,32	531,14	127,28
[100, 110)	191,48	163,06	528,04	583,88	731,18	416,32	531,14	135,57
[110, 120]	209,08	172,98	528,04	583,88	731,18	416,32	531,14	146,13

Fuente: SECTRA, 2021

Tabla 2: Emisiones unitarias de CO₂ equivalente por detenciones, en función de la velocidad

VELOCIDAD [KM/H]	Emisión unitaria por detención [g CO ₂ eq / det]							
	Vehículo Liviano	Taxi	Taxibus	Bus	Bus Articulado	Camión 2 ejes	Camión +2 ejes	Motocicletas
1	1,92	2,35	3,56	7,46	8,99	1,13	2,01	3,43
10	1,84	3,61	3,45	6,15	6,64	1,15	2,22	2,54
20	6,50	8,49	11,56	17,65	18,57	5,13	8,11	7,12
30	14,19	14,71	29,61	41,20	42,02	27,34	20,95	14,61
40	28,09	21,67	56,09	74,20	73,21	40,03	159,22	23,87
50	42,02	28,24	258,90	115,58	110,55	49,27	180,75	33,69
60	56,31	34,66	384,77	162,82	153,68	60,78	163,65	44,37
70	66,55	39,41	347,76	313,84	205,99	73,11	165,02	54,19
80	71,84	42,31	321,45	466,21	261,26	85,44	174,60	62,66
90	70,82	42,79	273,88	501,43	261,26	85,59	164,75	68,46

Fuente: SECTRA, 2021

Tabla 3: Emisión unitaria de CO₂ equivalente en ralentí

Tipo Vehículo	Emisión en ralentí [g CO ₂ eq /h]
Vehículo Liviano	1869,89
Taxi	1676,58
Taxibus	10592,47
Bus	10592,47
Bus Articulado	10592,47
Camión 2 ejes	6988,85
Camión +2 ejes	5350,84
Motocicletas	1496,74

Fuente: SECTRA, 2021

Por otro lado, la proyección de los beneficios (o desbeneficios) asociados a emisiones se realizará de forma análoga a lo que se indica en el MESPIVU (MDS-SECTRA, 2013 o aquel documento que lo reemplace), incluyendo criterios conservadores y considerando, además, restricciones de capacidad. Particularmente, en el caso de modelaciones con un solo corte temporal, utilizar el punto 13.2.1 del citado manual, para casos sin saturación. En el caso de proyectos con modelación de más de un corte temporal, utilizar en cambio el punto 13.2.2, considerando un factor α igual a cero en caso de saturación.

4. Consideraciones según modelación considerada

4.1. Proyectos Modelados con ESTR AUS

El Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA ha desarrollado un software especializado de emisiones en el marco del modelo ESTR AUS, denominado MODEM, que en su versión 6.0, es capaz de estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos del tráfico vehicular a partir de las modelaciones de transporte realizadas.

La metodología para la estimación de emisiones de contaminantes contenida en el módulo MODEM sigue el enfoque del tratamiento de la información tipo *bottom up*, es decir, la herramienta procesa información detallada, en este caso información a nivel de arco vial que entrega el modelo estratégico de transporte ESTR AUS para calcular las emisiones, los cuales se van enlazando por áreas geográficas hasta estimar las emisiones totales del sistema de transporte en su conjunto, labor que requiere ser complementada con información adicional para lograr el nivel de desagregación vehicular, espacial y temporal requerida por la metodología de estimación de emisiones (SECTRA, 2010).

Luego de dos décadas de implementación y actualizaciones del módulo MODEM, este ha especializado cada vez más el proceso de cálculos de las emisiones, en términos de cobertura de tipos de gases contaminantes, tipos de descargas de emisiones, tecnologías vehiculares consideradas y en expansión temporal de resultados. Lo anterior ha llevado a MODEM a consolidarse como la principal herramienta de gestión ambiental para estimar las emisiones del transporte urbano a un nivel estratégico, siendo empleado incluso por el Ministerio de Medio Ambiente para confeccionar inventarios de emisiones de las fuentes móviles en aquellas ciudades contaminadas del país, insumos necesarios para la confección o actualización de planes de descontaminación atmosféricos.

En la actualidad el módulo, en su versión 6.0 (SECTRA, 2019), es capaz de estimar las emisiones para 14 contaminantes, entre los que se encuentran: *PTS*, *MP₁₀*, *MP_{2,5}*, *CO*, *COV*, *NO_x*, *SO_x*, *NH₃*, *Hg*, junto con los gases de efecto invernadero *CH₄*, *N₂O*, *CO₂* y *CE*⁶, los cuales finalmente se agregan y expresan en términos de *CO₂* equivalente, además de los consumos de combustibles, desagregados en 460 categorías tecnológicas vehiculares, considerando 5 tipos de descargas de emisiones de los vehículos (salida tubo de escape, partidas en frío, emisiones evaporativas, desgaste de frenos y neumáticos, y emisiones de polvo re suspendido).

El Ministerio de Desarrollo Social y Familia, en conjunto con el Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, realizaron durante 2020 y 2021 un trabajo de pilotaje con el fin de incorporar la herramienta MODEM al SNI. En este proceso, se revisó y validó la metodología general que sustenta el modelo MODEM, incluyendo la calidad de los datos de entrada y salida, el cual requiere alrededor de 12 inputs necesarios para su funcionamiento, entre los que destacan: información de transporte, variables ambientales, emisiones de referencia, entre otros. Para llevar a cabo esta tarea se utilizaron 3 proyectos piloto, modelados con el software ESTR AUS: Proyecto Ferroviario

⁶ CE: Carbono elemental contaminante climático de vida corta, también conocido como hollín.

Tren Alameda-Melipilla, Plan de Transporte Urbano Temuco y Proyecto Línea 7 de Metro de Santiago.

En este pilotaje se evaluaron tres criterios: temperatura, factores de expansión y tipos de vehículos. Además, se analizaron dos factores que no requieren pilotaje: factores de emisión y parque vehicular. Como resultado de esta tarea, se concluyó que la corrección de factores de expansión será la única modificación solicitada para implementar la herramienta MODEM en el contexto de evaluación social del SNI, debiendo utilizar los factores de expansión propios del proyecto en análisis.

Factores de expansión

Las condiciones operacionales de la red vial varían dentro de una semana y también durante un mismo día, pues los flujos vehiculares cambian. El modelo MODEM realiza la estimación de emisiones ingresando a lo menos dos periodos de modelación de transporte Punta Mañana (PM) y Fuera Punta (FP). Para estimar los beneficios anuales de un proyecto que ha sido simulado con un software de transporte, es necesario expandir los resultados, requiriendo de un perfil de flujos semanal y otro mensual.

Para ello, se deberán corregir las salidas de los softwares utilizados, con factores de expansión para cada proyecto, basado en mediciones de flujos vehiculares propias del área de estudio, estimando beneficios anuales a partir de aquellos calculados para las horas representativas de los períodos modelados. Este proceso se sustenta en que la periodización definida es adecuada al tipo de proyecto y a las condiciones operacionales del área de referencia.

Para llevar a cabo este proceso el Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA desarrolló una guía procedimental denominada: "Estimación De Emisiones De Contaminantes Atmosféricos Para Proyectos Estratégicos De Transporte Con Modem 6.0, en el contexto del SNI" (noviembre 2021) en el que se establecen las reglas básicas de configuración del uso del modelo MODEM, para realizar los cálculos de las emisiones de contaminantes atmosféricos de los proyectos o medidas de transporte estratégicas y, de esta forma, incorporarlos en las evaluaciones sociales de proyectos en el marco del SNI. Dicho antecedente se incluye en el Anexo N°1 del presente instructivo.

4.2. Proyectos Modelados con SATURN

El Modelo de Asignación de Redes de Tráfico SATURN cuenta - de manera nativa - con un módulo interno de cálculo de emisiones de contaminantes atmosféricos del tráfico vehicular, como un indicador del desempeño ambiental de la red modelada. Los resultados de las emisiones obtenidos son expresados en kilogramos por periodo de análisis de la red completa, y, opcionalmente, pueden ser reportadas las emisiones por sección vial.

Aquellas Iniciativas de Inversión nuevas de vialidad urbana estructurante, que hayan sido modeladas con SATURN y que deseen incorporar dentro de su evaluación social beneficios (o desbeneficios) por emisión de contaminantes, deberán hacer uso del marco conceptual presente en este documento, en desmedro de utilizar el módulo

propio de emisiones que incorpora SATURN y después valorizar vía el Precio Social del Carbono. Las motivaciones de lo anterior corresponden a las siguientes:

- i. El módulo de emisiones nativo de SATURN considera un número limitado de contaminantes atmosféricos predeterminado (5), los que no incluyen las emisiones de material particulado en su fracción $MP_{2,5}$, principal contaminante dañino para la salud de la población. Sumado a lo anterior, no considera las principales emisiones de gases efecto invernadero, después de las emisiones de carbono, como el metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y carbono elemental (CE) los cuales tienen un papel preponderante en el calentamiento climático.
- ii. Respecto a los factores de emisiones considerados en el modelo nativo de SATURN de manera predeterminada, expresados en gr/pcu-km, gr/pcu-h y gr/pcu-parada, estos se estiman obsoletos ya que – según se informa en su manual – han sido calculados con datos del año 1988, analizados en un trabajo de tesis de doctorado en la Universidad de Leeds (*Model of Air Pollution from Road Traffic I and II, A. Matzoros and D. Van Vliet, Transportation Research, pp.315–335, Vol 26A, 1992*). Por otra parte, no existen antecedentes que permitan presumir algún proceso de actualización o mejora en la desagregación de los parámetros predeterminados.
- iii. Finalmente, el módulo nativo de SATURN no permite desagregar las emisiones según tipo de descarga; es decir, identificar las emisiones del tráfico en movimiento, las de ralentí y las emisiones relacionadas con detenciones. Esto puede resultar útil al momento de analizar alternativas de proyecto, pudiendo orientar la decisión desde un punto de vista de la sustentabilidad ambiental.

Como consecuencia, y por las razones antes expuestas, es que la División de Evaluación Social de Inversiones no considerará válidos los resultados del módulo nativo del software SATURN para efectos de la incorporación consideraciones ambientales en la evaluación social económica.

En este sentido, SECTRA se encuentra desarrollando una herramienta externa a SATURN, denominada EMISAT que, en su versión 2.0, será sometida prontamente a un proceso de marcha blanca, en conjunto con el MDSF. Esta permitirá realizar las estimaciones de emisiones de contaminantes de una modelación de transporte urbano con un mayor grado de especificidad, y ajustado a las necesidades propias en cobertura y desagregación de resultados. Una vez que sea validado el uso de EMISAT por parte de la División de Evaluación Social de Inversiones, dicha herramienta podrá ser empleada para estimar las emisiones de contaminantes en las modelaciones de transporte e incluir sus beneficios (o desbeneficios) en la evaluación social.

4.3. Proyectos modelados con otros softwares

Para proyectos que sean modelados con un software de transporte distinto a los anteriores, deberán considerar la aplicación del marco conceptual presentado en este instructivo, de acuerdo a los criterios de aplicación indicados en la sección 2 del presente documento; en caso de que se desee utilizar otro enfoque, deberá ser analizado y zanjado por la jefatura de la División de Evaluación Social de Inversiones en la evaluación particular de cada proyecto.

5. Anexo N°1 Procedimiento: “Estimación de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos para proyectos estratégicos de Transporte con MODEM 6.0, en el contexto del SNI” (SECTRA, 2021)



**PROCEDIMIENTO:
“ESTIMACIÓN DE EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PARA PROYECTOS
ESTRATÉGICOS DE TRANSPORTE CON MODEM 6.0,
EN EL CONTEXTO DEL SNI”**

SANTIAGO, NOVIEMBRE 2021

I INTRODUCCIÓN

Nuestro país cuenta con una vasta experiencia en la evaluación social de proyectos de infraestructura y medidas de gestión en los sistemas de transporte de las ciudades del país. Para garantizar que las inversiones públicas nacionales generen el mayor bienestar a la sociedad, se busca que los proyectos superen umbrales de rentabilidad social y económica.

En términos generales, la evaluación social de las iniciativas de transporte consiste en estimar las variaciones de los recursos consumidos en el sistema de transporte, debido a una intervención en el sistema para años de corte definidos. Para valorar estos recursos consumidos (tiempo, combustible y otros asociados a la operación vehicular), se utilizan los precios sociales definidos por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia, MDSyF, los cuales son actualizados periódicamente para ser utilizados en el Sistema Nacional de Inversiones, SNI.

En el año 2017 la División de Evaluación Social de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social y Familia, fijó el primer precio social de una variable de carácter ambiental relacionada con los efectos del cambio climático, representada por las emisiones de Dióxido de Carbono, CO₂¹, uno de los principales contaminantes responsables del cambio climático. Cabe destacar que el país ha suscrito compromisos internacionales de acción climática para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), como se estableció en el Acuerdo Climático de París del año 2015, explicitado en las distintas “Contribuciones Nacionalmente Determinadas”, NDC², de Chile año 2015 y su actualización año 2020.

El precio social del CO₂ definido por MDSyF es un importante instrumento económico coherente con la política ambiental para reducir las emisiones GEI y alcanzar la neutralidad de las emisiones al año 2050, de acuerdo a lo establecido en la NDC vigente. Sin embargo, para que este instrumento genere los efectos esperados, requiere ser complementado con metodologías oficiales capaces de estimar los cambios de las emisiones de carbono en las diferentes iniciativas de inversión pública.

En este contexto, el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones ha considerado pertinente el uso del modelo de cálculo de emisiones vehiculares MODEM en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte urbano a un nivel estratégico, para evaluar los potenciales beneficios ambientales por reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero responsable del cambio climático, a través del contaminante global CO₂eq³ utilizado como medida de carbono en la actual NDC.

El modelo MODEM, desarrollado por el Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, es un software especializado, recientemente actualizado en su versión 6.0, capaz de estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos del tráfico vehicular a partir de la modelaciones de transporte realizadas con los modelos ESTRAUS o VIVALDI.

¹ “Estimación del Precio Social del CO₂”, MDSyF año 2017.

² NDC de Chile 2020: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf.

³ CO₂eq: Corresponden a la unidad de medida global de la mezcla de gases de efecto invernadero, GEI, medida en masa, convertidos a su valor equivalente en dióxido de carbono (CO₂), multiplicando la masa de cada gas de efecto invernadero por su Potencial de Calentamiento Global (GWP).

El presente documento tiene como propósito establecer los criterios y reglas básicas de configuración del uso del modelo MODEM para cuantificar los beneficios ambientales de los proyectos de transporte urbanos o suburbanos, por reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, en las evaluaciones sociales de proyectos en el SNI.

II ANTECEDENTES

Dada la importancia del aporte del tráfico vehicular en la contaminación de las ciudades del país, es que el Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, en el año 2000, inició el desarrollo de una herramienta que permite cuantificar las emisiones asociadas al tráfico urbano, con el objetivo de incorporar la variable ambiental en los procesos de planificación de los sistemas de transporte urbano del país. El desarrollo inicial de esta herramienta, conocida como MODEM, corresponde a un caso exitoso del esfuerzo conjunto entre la administración pública y la academia, que hasta el día de hoy se encuentra vigente con una reciente versión.

La metodología para la estimación de emisiones de contaminantes contenida en el modelo MODEM sigue el enfoque del tratamiento de la información tipo *bottom up*, es decir, la herramienta procesa información detallada, en este caso información a nivel de arco vial proporcionada por el modelo estratégico de transporte ESTRAUS o VIVALDI, los cuales se van enlazando por áreas geográficas hasta estimar las emisiones totales del sistema de transporte. Esta labor requiere ser complementada con información adicional para lograr el nivel de desagregación vehicular, espacial y temporal, exigida por la metodología de estimación de emisiones (SECTRA, 2010).

En dos décadas de implementación y actualizaciones del modelo MODEM se han ido especializando cada vez más el proceso de cálculos de las emisiones de contaminantes en términos de cobertura de contaminantes, los tipos de descargas de emisiones, las tecnologías vehiculares incorporadas y las técnicas de expansión temporal de resultados. Lo anterior ha llevado al modelo a consolidarse como la única herramienta de gestión ambiental para estimar las emisiones del transporte urbano, siendo la elegida por la autoridad ambiental para confeccionar inventarios de emisiones de las fuentes móviles en aquellas ciudades contaminadas del país, insumos necesarios para la confección o actualización de planes de descontaminación atmosférica.

En la actualidad, el modelo en su versión 6.0 (SECTRA, 2019), es capaz de estimar las emisiones para 14 contaminantes, entre los que se encuentran: PTS, MP₁₀, MP_{2.5}, CO, COV, NO_x, SO_x, NH₃, Hg, junto con los gases de efecto invernadero CH₄, N₂O, CO₂, CO₂eq, y CE⁴, además de los consumos de combustibles, desagregados en 460 categorías tecnológicas vehiculares, considerando 5 tipos de descargas de emisiones de los vehículos (salida tubo de escape, partidas en frío, emisiones evaporativas, desgaste de frenos y neumáticos, y emisiones de polvo resuspendido). Este nivel de sofisticación que ha alcanzado el modelo ha sido realizado en forma progresiva en el transcurso de su desarrollo.

El empleo del modelo MODEM para complementar las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, urbano o suburbano, es una importante contribución que permite integrar las externalidades ambientales producidas por los sistemas de transporte en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, haciéndolas cada vez más completas.

⁴ CE: Carbono elemental contaminante climático de vida corta, también conocido como hollín.

La incorporación del modelo MODEM en los análisis de las evaluaciones sociales de los proyectos estratégicos de transporte, urbano o suburbano, dentro del SNI del Ministerio de Desarrollo Social y Familia exige definir los criterios y especificaciones para su implementación, esto con el propósito de mantener la consistencia técnica entre los análisis de los beneficios de transporte y ambientales que se obtendrán de los proyectos de transporte.

Los criterios y especificaciones para el uso del modelo MODEM dentro del contexto de las evaluaciones sociales, se detallan en el siguiente capítulo.

III CRITERIOS Y ESPECIFICACIONES PARA EL USO DEL MODELO MODEM

Esta sección presenta las especificaciones técnicas que deben ser consideradas en los análisis ambientales de los proyectos estratégicos de transporte urbanos o suburbanos, que formarán parte de las evaluaciones sociales de las iniciativas de inversión de transporte que ingresarán al Sistema Nacional de Inversión, (SNI), del Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

La versión del modelo MODEM que está validada para complementar las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte es la versión 6.0, y sus posteriores actualizaciones, para mayor detalle sobre la operación del modelo se puede consultar el Manual de Usuario MODEM 6.0 (SECTRA, 2019).

A continuación se presentan en detalle las principales consideraciones técnicas y configuración de parámetros del modelo MODEM, que deberán ser utilizados en las estimaciones de emisiones de contaminantes atmosféricos en los proyectos de transporte urbano o suburbano, para integrar los beneficios ambientales en las evaluaciones sociales de proyectos de transporte.

En atención a la necesidad de establecer las configuraciones específicas en el modelo MODEM, para su utilización en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, se ha considerado pertinente en una próxima actualización de la herramienta computacional MODEM, incluir un módulo exclusivo para que realice dichos cálculos de las emisiones de contaminantes, en forma directa y con menores tiempos de ejecución, de manera de facilitar la obtención de los beneficios ambientales que se integrarán en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte.

1. Tipología de Proyectos de Transporte

Todos los proyectos de infraestructura o medidas de gestión de transporte urbanos o suburbanos que utilicen como herramienta de análisis de transporte el modelo ESTRAUS (empleado para las simulaciones en las que se basan las evaluaciones sociales de los proyectos exigidas por el SNI), pueden complementarse con los análisis ambientales a través del modelo de emisiones MODEM. Esto permite integrar los beneficios ambientales a las evaluaciones sociales de los proyectos, en particular, por las reducciones de las emisiones de gases GEI, a través del CO₂eq, y, en un futuro, podrían agregarse otros contaminantes, en la medida que se disponga de valores sociales.

Dentro de la amplia gama de tipología de proyectos de transporte, urbanos o suburbanos, analizados con los modelos estratégicos, cuyos beneficios ambientales pueden ser estimados con MODEM se encuentran los siguientes: Tarificación Vial, Líneas de Metro, Tranvías, Planes de corredores de buses, Planes de Líneas de Metro, Trenes Suburbanos, Planes de Conexiones de Autopistas Urbanas.

2. Modelaciones de Proyectos de Transporte

Hoy en día, los análisis de las emisiones de contaminantes atmosféricos generados por el transporte urbano o suburbano se realizan a partir de la aplicación de la secuencia metodológica que emplea el uso de las modelaciones estratégicas de transporte, seguido del modelo de emisiones vehiculares MODEM, complementada con información adicional para ampliar la desagregación vehicular y expansión temporal de las emisiones.

Los principales modelos estratégicos de transporte que operan con el modelo MODEM son aquellos relacionados con el modelo ESTRAUS, como VIVALDI, DIRTTP, y el submodelo MAITE.

Las simulaciones de transporte son ingresadas al modelo de emisiones MODEM a través del archivo resumen de la simulación de transporte, según período de modelación, generado por el utilitario del modelo ESTRAUS "*prepara_emisiones*", descrito detalladamente en el manual del modelo de transporte (SECTRA, 2016).

Además de estos archivos, el modelo MODEM requiere la información de las coberturas geográficas, en formato *shape*, de la red vial de modelación y los arcos de acceso vial contenidos en la modelación de transporte, según período y corte temporal. Toda esta información es ingresada al modelo MODEM para realizar las estimaciones de las emisiones, ingresando a lo menos dos periodos de modelación de transporte Punta Mañana (PM) y Fuera Punta (FP). Opcionalmente, puede considerar un tercer período de modelación, tal como lo muestra la Figura N°1.

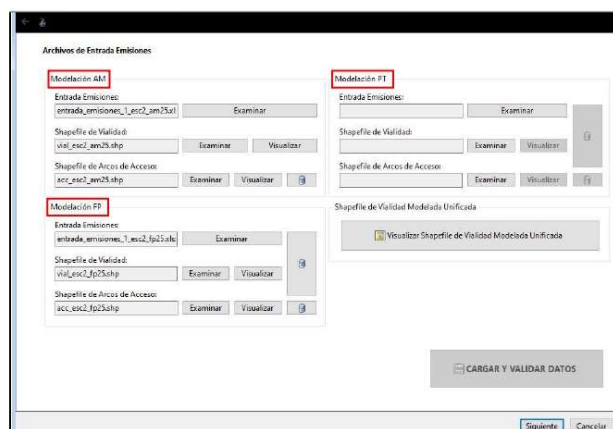


Figura N°1: Vista carga de archivos entrada emisiones y coberturas geográficas por periodos de modelación de transporte.

Sin perjuicio de lo anterior, en el caso de que esté disponible solo el periodo de modelación de transporte PM, en el contexto de una evaluación social de un proyecto de transporte, es posible realizar la estimación de emisiones del periodo ingresando al modelo MODEM el archivo resumen de modelación del periodo PM y el mismo archivo resumen cargarlo en el periodo FP, una vez efectuado el cálculo se debe tener la precaución de considerar sólo los resultados para el periodo PM.

3. Tipo de Emisiones a Calcular

El modelo de emisiones MODEM como se ha mencionado anteriormente, tiene la capacidad de estimar 5 tipos de descargas de contaminantes asociados al tráfico vehicular (emisiones por tubo de escape; desgaste de frenos y neumáticos; emisiones por partida en frío; emisiones evaporativas y las de polvo resuspendidos), los cuales pueden estar asociados a uno o un conjunto de contaminantes.

Para los efectos de la incorporación de los beneficios ambientales por la reducción de las emisiones de carbono a través del CO₂eq, en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, se considerará solo los cálculos de las emisiones por tubo de escape, donde se pueden contabilizar las emisiones de CO₂eq, junto a otros contaminantes atmosféricos.

Sin perjuicio de lo anterior, si la División de Evaluación Social de Inversiones del Ministerio de Desarrollo Social y Familia, fija otros valores sociales u otro método de cuantificación de beneficios para otros contaminantes atmosféricos, podrán ser considerados en los análisis al igual que las emisiones de CO₂eq.

4. Factores de Emisiones por Tubo de Escape y Contaminante

Los factores de emisiones según contaminante es una de las principales variables que emplea el modelo MODEM para realizar las estimaciones de emisiones del transporte, en general éstas corresponden a tasas de emisiones básicas expresadas en gramos por kilómetros (g/km), que dependen de la velocidad promedio de circulación de los vehículos en las vías, información proporcionada por las simulaciones de transporte para cada arco vial según periodo y corte temporal.

El modelo MODEM 6.0 cuenta con un conjunto de factores de emisiones, recientemente actualizados (SECTRA, 2020), para 460 categorías tecnológicas de vehículos los que pueden ser modificados o eliminados a través de un módulo o formulario, en el mismo sistema MODEM, como se muestra en la Figura N°2.

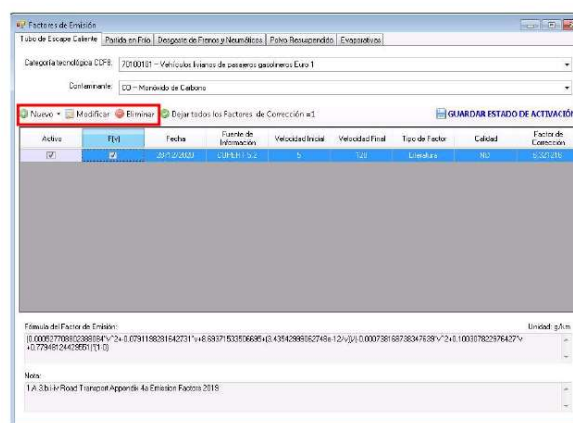


Figura N°2: Ventana de presentación del módulo de factores de emisiones de tubo de escape.

Los factores de emisiones además incluyen un indicador de corrección, que representa el efecto de deterioro por la antigüedad de la categoría del vehículo, muy utilizado en la elaboración de inventarios de emisiones de las ciudades. Un valor de corrección 1.0 indica que el factor no considera deterioro.

La actual versión del modelo MODEM, considera un conjunto acotado de categorías vehiculares con un indicador de corrección mayor al valor 1.0, obtenidos a partir de información empírica de un estudio específico⁵.

Para los efectos de la incorporación de los beneficios ambientales por la reducción de las emisiones de CO₂eq, en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, el usuario no deberá modificar ningún factor de emisiones del sistema MODEM, en caso que se requiera deberá estar debidamente fundado y reportado en la evaluación social de dicho proyecto.

⁵ Análisis y Desarrollo de Factores de Deterioro y Caracterización de las Emisiones de la Flota Mediante el Sistema Remote Sensing Devices (RSD), SECTRA 2015.

Además, no se considerarán en los cálculos de las emisiones correcciones por deterioro, por lo tanto el usuario deberá considerar esta especificación previo a los cálculos, para estos efectos el modelo MODEM cuenta con una funcionalidad que permite automáticamente al usuario convertir todos los factores de corrección igual al valor 1.0, con solo aplicar el botón ubicado en la ventana de factores de emisiones, como se muestra en la Figura N°3.

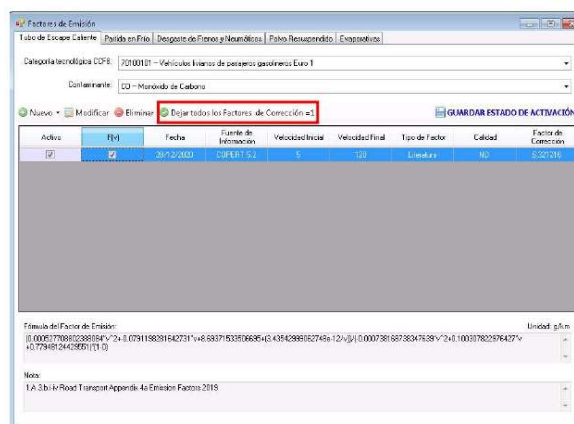


Figura N°3: Ventana de presentación del módulo de factores de emisiones de tubo de escape, botón sin deterioro.

5. Matriz de Equivalencia Horaria

Este parámetro del modelo MODEM asigna las velocidades de los periodos de modelación de transporte, a las distintas horas del día de una semana normal para realizar los cálculos de las emisiones diarias, esenciales para generar inventarios de emisiones.

La Figura N°4 muestra la matriz de equivalencia. Es importante señalar que los horarios marcados con el símbolo (*) indican que se utilizarán en dicho horario las velocidades y los flujos modelados, contenidos en los archivos resúmenes “entrada de emisiones” ingresados a MODEM.

La configuración requerida en la matriz de equivalencia en el contexto de la evaluación social de proyectos, sólo debe ubicar los símbolos (*) en los horarios de la columna *Lunes-Jueves* en los horarios correspondientes a los periodos de modelación disponibles.

A modo de ejemplo, si se dispone solo de modelaciones para los periodos Punta Mañana y Fuera Punta, el símbolo (*) debe ubicarse en el horario PM (08:00hr a 09:00hr) y FP (10:00 hr a 11:00hr).

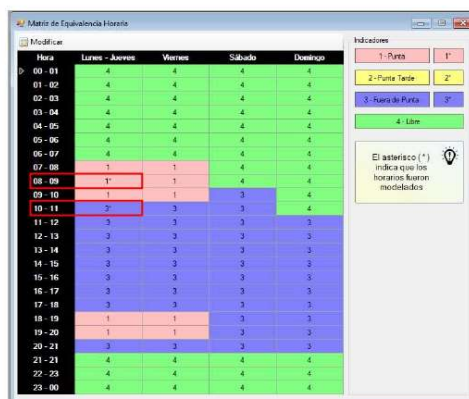


Figura N°4: Vista matriz de equivalencia horaria.

6. Perfiles de Flujos Normalizados

El modelo de emisiones MODEM utiliza un sofisticado método de expansión anual de los cálculos de emisiones de contaminantes, el cual considera dos tipos de perfiles de flujos normalizados, uno mensual y otro semanal, los cuales forman parte de los parámetros del modelo. El detalle de la estructura de los archivos de perfiles de flujos mensual y semanal se encuentra en el Manual de Usuario MODEM 6.0 (SECTRA, 2019).

La función principal del uso de ambos perfiles de flujos en el modelo MODEM, tiene relación con el procedimiento de expansión de las emisiones horarias del día y luego para los 365 días del año, requerimientos característicos para los análisis en los inventarios de emisiones de los centros urbanos del país.

Dado que la metodología de expansión anual de los beneficios de transporte está basada en el empleo de factores de expansión según periodo de modelación, centrada en el consumo de recursos en el sistema, un enfoque muy distinto al implementado en el modelo MODEM para obtener resultados anuales, es que se hace necesario establecer un procedimiento de ajuste en los parámetros del modelo MODEM (perfiles de flujos mensuales y semanales) para replicar el método de expansión de los beneficios de transporte aplicado en la evaluación social de proyectos. Los ajustes requeridos se detallan a continuación:

i) Ajuste Perfil de Flujo Mensual

El archivo correspondiente a perfil de flujo mensual debe contener el valor unitario "1" solo en la columna mes "Marzo", mientras que el resto de meses debe contener el valor nulo "0", una vez cargado el archivo de perfil de flujo mensual en el modelo MODEM se debe verificar la siguiente vista en el modelo:

Cod. CCPS	Nome CCPS	Jan	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
701001	Particulares	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701002	Aluguel	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701003	Comerciais uso particular	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701004	Camionetas leves	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701005	Camionetas pesadas	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701006	Microônibus	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701007	Buses interurbanos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701008	Taxi coletivo	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701009	Buses urbanos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701010	Caminhões pesados	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701011	Buses Troncal 1 Rigidos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701012	Buses Troncal 2 Rigidos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701013	Buses Troncal 3 Rigidos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701014	Buses Troncal 4 Rigidos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701015	Buses Troncal 5 Rigidos	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701016	Buses Troncal 1 Articulados	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701017	Buses Troncal 2 Articulados	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701018	Buses Troncal 3 Articulados	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701019	Buses Alimentados 1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701020	Buses Alimentados 2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701021	Buses Alimentados 3	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701022	Buses Alimentados 4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701023	Buses Alimentados 5	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701024	Buses Alimentados 6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
701025	Buses Alimentados 7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura N°5: Vista perfil de flujos normalizados mensual.

ii) Ajuste Perfil de Flujo Semanal

El archivo correspondiente al perfil de flujo semanal, desagregado por día y hora, debe contener el valor unitario "1" en los horarios que corresponden a los periodos de análisis de transporte (Punta Mañana, Fuera Punta u otro) disponibles, solo en la columna días *Lunes-Jueves*. El resto de las columnas de los días de la semana y las horas deben contener el valor nulo "0".

Una vez preparado el archivo debe ser cargado en el sistema MODEM y se debe verificar la siguiente vista del perfil en el modelo:

Zona	Horas	Semana	L	V	S	D
Z1	00-01	DE	0	0	0	0
Z1	01-02	DE	0	0	0	0
Z1	02-03	DE	0	0	0	0
Z1	03-04	DE	0	0	0	0
Z1	04-05	DE	0	0	0	0
Z1	05-06	DE	0	0	0	0
Z1	06-07	DE	0	0	0	0
Z1	07-08	DE	0	0	0	0
Z1	08-09	DE	1	0	0	0
Z1	09-10	DE	0	0	0	0
Z1	10-11	DE	1	0	0	0
Z1	11-12	DE	0	0	0	0
Z1	12-13	DE	0	0	0	0
Z1	13-14	DE	0	0	0	0
Z1	14-15	DE	0	0	0	0
Z1	15-16	DE	0	0	0	0
Z1	16-17	DE	0	0	0	0
Z1	17-18	DE	0	0	0	0
Z1	18-19	DE	0	0	0	0
Z1	19-20	DE	0	0	0	0
Z1	20-21	DE	0	0	0	0
Z1	21-22	DE	0	0	0	0
Z1	22-23	DE	0	0	0	0
Z1	23-00	DE	0	0	0	0

Figura N°6: Vista perfil de flujos normalizados semanal.

Cabe señalar que los horarios habilitados con valor “1”, que representan los horarios de los periodos de modelación de transporte, deben coincidir con los mismos horarios seleccionados en la “Matriz de Equivalencia Horaria”, expuesto anteriormente en el punto 5 de este documento.

7. Ingreso de Datos de la Metodología de Tipo Arco en MODEM 6.0

Una vez aplicados: el criterio sobre el deterioro en los factores de emisiones; el ajuste a la matriz de equivalencia horaria; los ajustes en los archivos de los perfiles de flujos normalizados mensuales y semanales y los archivos de entrada provenientes de las modelaciones de transporte, con sus respectivos shape de la red de modelación (todos estos aspectos tratados en los puntos anteriores de este documento), se está en condiciones de cargar los datos a MODEM a través del sub menú “Ingreso de Datos” de la metodología de tipo de arco (ver Figura N°7). Cabe señalar que el resto de los archivos solicitados en este sub menú, no requieren modificaciones específicas en el contexto de las evaluaciones sociales de proyectos del SNI.



Figura N°7: Vista módulo de carga de datos tipo arco

La carga de la información en el módulo “Ingreso de Datos” está conformada por 3 visores o ventanas de carga de datos, estas son las siguientes:

i) Archivos de Entrada Emisiones

Espacio donde se ingresan las modelaciones de transporte Punta Mañana (PM) y Fuera Punta (FP). Opcionalmente, puede considerar un tercer periodo de modelación, tal como lo muestra la figura siguiente:

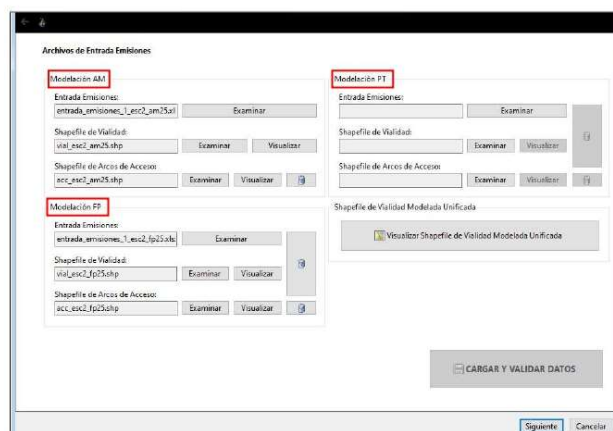


Figura N°8: Ventana de carga de datos de modelación de transporte según periodo

Procedimiento: Estimación de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos para Proyectos Estratégicos de Transporte con MODEM 6.0

ii) Información de Zonas

La Figura N°9 presenta la ventana para la carga de los archivos relacionados con información de zonas del modelo MODEM, los cuales incluyen los archivos ajustados de perfiles de flujos normalizados mensual y semanal, tratado en el punto 6 de este documento.

Figura N°9: Ventana de carga de información por zonas

iii) Homologación de CCF6 con Categorías de ESTRAS

Finalmente, en esta sección se realiza la homologación de los flujos modelados en ESTRAS con la clasificación vehicular considerada por MODEM. En esta sección el modelo ofrece una opción al usuario para realizar ajustes de los flujos modelados por ESTRAS, con el propósito de compensar los flujos de las categorías vehiculares no considerados por la modelación de transporte, ejemplo, la categoría motocicleta (ver Finura N°10).

En el contexto de la evaluación social de proyectos de transporte, esta opción de ajuste de los flujos modelados por ESTRAS no debe ser aplicada, por lo tanto, las casillas deben quedar sin marcar. Esta especificación tiene como objeto, evitar inconsistencias entre los niveles de servicio de transporte y los niveles de emisiones de contaminantes, obtenidos a partir del mismo nivel de tráfico modelado por ESTRAS, sin intervención.

CCF	Descripción	Categoría	ajuste por conteo
701001	Particulares	F_VAR	☐
701002	Alquiler	F_VAR	☐
701003	Comerciales uso particular	F_VAR	☐
701004	Camiones livianos		☐
701005	Camiones medianos		☐
701006	Motocicletas	F_VAR	☐
701007	Buses interurbanos	F_BUSI	☐
701008	Taxis colectivos		☐
701009	Buses urbanos		☐
701010	Camiones pesados		☐
701017	Buses Troncal 1 Rígidos	F_BUSU_3011	☐
701018	Buses Troncal 2 Rígidos	F_BUSU_3012	☐
701019	Buses Troncal 3 Rígidos	F_BUSU_3013	☐
701020	Buses Troncal 4 Rígidos	F_BUSU_3014	☐
701021	Buses Troncal 5 Rígidos	F_BUSU_3015	☐
701022	Buses Troncal 1 Articulados	F_BUSU_3011	☐

Figura N°10: Ventana de homologación de los flujos de ESTRAS con las categorías vehiculares de MODEM y ajustes de conteos.

8. Cálculo de las Emisiones de CO2eq en MODEM 6.0

Una vez realizada la carga de toda la información en el módulo “Datos Metodología Tipo de Arco” del modelo MODEM, corresponde realizar el cálculo de las emisiones de contaminantes para incorporar los beneficios ambientales en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, para ello se considerarán solo los cálculos de las emisiones por tubo de escape, donde se contabilizan las emisiones de CO2eq.

Sin perjuicio de lo anterior, el usuario podrá considerar otros contaminantes para realizar los análisis de beneficios ambientales, solo si cuentan con valores sociales u otro método de cuantificación de beneficios oficializado por el SNI, como es el caso de las emisiones de carbono.

Por otra parte, solo con el propósito de conocer el desempeño ambiental del proyecto de transporte, pueden ser seleccionados otros contaminantes para ser incluidos en calidad de anexo sobre los ahorros o aumentos de las emisiones de contaminantes.

En cuanto a las emisiones tipo zonas calculadas por el modelo MODEM, no serán consideradas en los análisis de los beneficios ambientales en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte, por cuanto este tipo de emisiones no contabiliza las emisiones GEI, por lo tanto, no es necesario realizar la carga de información al módulo “Datos Metodología Tipo de Zona” del modelo MODEM.

El módulo “Cálculo” del modelo MODEM 6.0 cuenta con un detallado y flexible formulario de configuración para el cálculo de las emisiones, donde el usuario puede especificar el tipo de descarga y los contaminantes considerados en los cálculos (Ver Figura 11).

Como se ha indicado previamente en el capítulo “Antecedentes”, el modelo cuenta con la capacidad de calcular 5 tipos de descargas de las emisiones vehiculares y un set de contaminantes dentro de

las cuales se encuentran: *PTS, MP₁₀, MP_{2,5}, CO, COV, NO_x, SO_x, NH₃, Hg, junto con los gases GEI, CH₄, N₂O, CO₂, CO_{2eq}, y CE, además de los consumos de combustibles.*

La configuración específica para el cálculo de emisiones de los proyectos de transporte, para integrar los beneficios ambientales por reducción de carbono es la siguiente:

i) Selección de tipos de emisiones y contaminantes

En la ventana de configuración del cálculo de emisiones se debe seleccionar en las emisiones de tubo de escape el contaminante “Dióxido de Carbono Equivalente”, tal como se presenta en la figura siguiente:

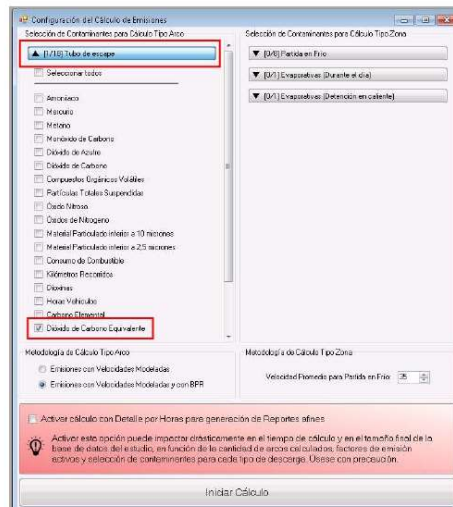


Figura N°11: Módulo de selección de tipo de descarga y contaminantes, selección en tubo de escape las emisiones CO_{2eq} MODEM 6.0.

ii) Método de Cálculo Tipo Arco

Luego se deberá seleccionar el método de cálculo de las emisiones disponible en MODEM, en nuestro caso se deberá seleccionar la primera opción, es decir, “Emisiones con Velocidad Modelada” y activar la opción “Cálculo con Detalle por Horas para generación de Reportes afines”, tal como se visualiza en la Figura N°12.

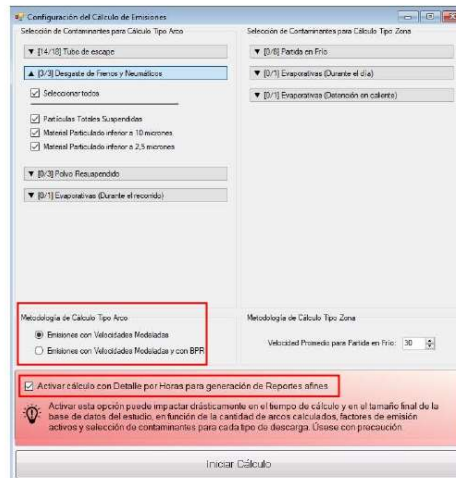


Figura N°12: Selección del método de cálculo de las emisiones en el modelo MODEM 6.0.

Una vez realizada estas especificaciones se está en condiciones de ejecutar el cálculo de emisiones, pulsando el botón “Inicio Cálculo” ubicado al final del módulo.

9. Reporte de Resultados de Emisiones

Una vez finalizado el cálculo de emisiones de contaminantes atmosféricos, el modelo MODEM pone a disposición del usuario un set de reporte de salidas predefinidas gestionadas a través de un formulario “Reporte de Emisiones”, donde el usuario podrá seleccionar el o los reportes de su interés para exportarlos en archivos individuales.

Dada las especificaciones descritas para realizar los cálculos de las emisiones, solo se requiere seleccionar el reporte asociado al archivo “mh_model.xlsx”, identificado en el recuadro rojo de la Figura N°13.

Este reporte entrega un *proxy* de las emisiones de contaminantes para cada período de la modelación de transporte que ingresó al modelo MODEM, por lo que requiere ser ajustado por un factor de corrección específico y fijo, FC.

El factor de corrección, FC, es un valor fijo independiente del proyecto que se analice y se aplica a los resultados de emisiones de contaminantes por periodos, contenidos en el archivo “mh_model.xlsx”, el valor FC: $1/(365/7)/4$. Este factor permitirá transformar las emisiones calculadas anual a la unidad temporal semanal (365/7) y luego al día laboral normal Lunes-Jueves (4). Al aplicar esta corrección se obtiene las emisiones de contaminantes para cada periodo de una hora de un día laboral normal, expresados en toneladas.

Opcionalmente, se puede exportar el reporte asociado al archivo “mh_comuna_hora_ccf6.dbf” (ver recuadro azul de la Figura N° 13) archivo que desagrega las emisiones de contaminantes por categoría vehicular según periodos, el que deberá aplicar el mismo FC ya señalado.

The screenshot shows a software window titled "Reportes de Emisiones". It contains three main sections for selecting report types and their corresponding file names:

- Area:**
 - Tipo de reporte:**
 - ☐ Emisiones Anuales por Area y CCF6 (t)
 - ☐ Emisiones Anuales por Comuna y CCF6 (t)
 - ☐ Emisiones Anuales por CCF6 (t)
 - ☐ Emisiones Anuales por Comuna y CCF6 (t)
 - ☐ Emisiones Anuales de polvo resuspendido por Area
 - ☐ Emisiones Anuales por Area, CCF6
 - ☐ Emisiones Anuales por CCF6
 - Nombre del Archivo:**
 - na_ccf6.dbf
 - na_emision_comuna_ccf6.xls
 - na_emision_ccf6.xls
 - na_comuna_ccf6.xls
 - na_polvo.xls
 - na_ccf6.dbf
 - na_emision_ccf6.xls
- Zona:**
 - Tipo de reporte:**
 - ☐ Emisiones Anuales por Comuna y CCF6 (t)
 - ☐ Emisiones Anuales por CCF6 (t)
 - ☐ Emisiones Anuales por Contaminante (t)
 - ☐ Emisiones Anuales por Comuna, CCF6
 - ☐ Emisiones Anuales por CCF6
 - Nombre del Archivo:**
 - na_comuna_ccf6.xls
 - na_contaminante_ccf6.xls
 - na_comuna_ccf6.xls
 - na_comuna_ccf6.xls
 - na_comuna_ccf6.xls
- Hora:**
 - Tipo de reporte:**
 - ☐ Emisiones Anuales por Comuna (Hora) (t)
 - ☒ Emisiones Anuales por Hora Modestiza (t)
 - ☒ Emisiones Anuales por Comuna, Dia, Hora, CCF6
 - ☐ Emisiones Anuales por Comuna, Dia, Hora, CCF6
 - Nombre del Archivo:**
 - na_comuna_hora.xls
 - na_modestiza.xls
 - na_comuna_hora_ccf6.dbf
 - na_comuna_hora_ccf6.dbf

Below these sections, there is a note: "Los reportes en formato DBF (destacados en color rojo) podrian demandar un tiempo extendido para su generacion, ademas de ocupar un elevado espacio en disco, en funcion de la cantidad de areas participantes, categorias CCF6 homologadas y CCF6 dependientes, factores de emision activos y seleccion de contaminantes para cada tipo de descarga, que fueron configurados al realizar el calculo. Considere esto al momento de seleccionar dichos reportes."

At the bottom right, there is a blue button labeled "EXPORTAR".

Figura N°10: Selección de reportes de resultados de emisiones de contaminantes según periodo.

Una vez realizado el ajuste, se obtendrán las emisiones de CO2eq para cada uno de los periodos de modelación de transporte, expresadas en toneladas. De este modo, los niveles de emisiones por periodo podrán ser tratados de la misma forma que los niveles de servicios y costos operacionales de transporte, cuando estos son anualizados a través de factores de expansión utilizados en las evaluaciones sociales de los proyectos.

Finalmente, se ha considerado pertinente en una próxima actualización del modelo MODEM, incluir un módulo exclusivo para que realice el cálculo de las emisiones de contaminantes en forma directa, por periodo de análisis, para facilitar la obtención de los beneficios ambientales que se integrarán en las evaluaciones sociales de los proyectos de transporte.

10. REFERENCIA:

SECTRA, 2010. Actualización metodológica MODEM - MODEC para el Gran Santiago.

SECTRA, 2016. Manual del Usuario del Modelo de Diseño Operacional versión 8.

SECTRA, 2019. Actualización de las Plataformas Computacionales de los Modelos Ambientales y de Evaluación.

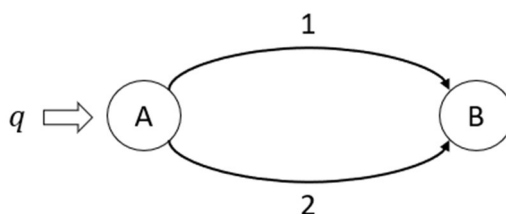
6. Anexo N°2 Ejemplo de aplicación del marco conceptual

En el análisis a nivel de preinversión de las iniciativas de inversión contextualizadas en transporte urbano, por lo general se define y trabaja sobre una red de transporte, que considera tanto las vías como los distintos tipos de intersecciones (e.g. prioridad, semaforizadas), ya que los impactos de las intervenciones generan efectos a nivel de dicha red; es decir, pueden generar cambios en los flujos y niveles de servicio en arcos que no son parte de la intervención en estudio.

Es por ello que este tipo de análisis se realizan en base al uso de *softwares* de modelación (estática) de transporte, que permiten determinar las condiciones de equilibrio producto de la intervención estudiada. Esta modelación puede ser del tipo *estratégico* (cuando se producen variaciones en la demanda por transporte) o *táctica* (cuando solo involucra cambios en la asignación del flujo en la red de transporte), lo que dependerá de acuerdo a las características que presente la intervención en estudio.

A un nivel estratégico, típicamente involucra el análisis de la red completa de transporte urbano (o una porción significativa de esta), producto de los cambios a nivel de demanda que experimenta el sistema. En cambio, en análisis de tipo táctico, puede considerarse una porción limitada de la red de transporte urbano, en la cual se estima que ocurrirán los efectos de reasignación producto de la intervención.

Ahora bien, a modo de ilustrar la utilización del marco conceptual propuesto en la sección 3 se considerará una red que consta de solamente dos arcos y dos nodos y en donde uno de estos arcos, el arco 1, será intervenido con un proyecto de vialidad; por ejemplo, una ampliación de capacidad de una a dos pistas por sentido.



Considerando una demanda fija q , la realización de un proyecto de tales características implica que - en el nuevo equilibrio - dicho arco verá aumentado sus flujos, en desmedro de otras rutas alternativas, respecto de la situación sin proyecto (sbo). Finalmente, se asumirá un único periodo de análisis y un único tipo de vehículo, automóvil liviano, por lo que se omitirán los subíndices asociados de la fórmula (I)⁷.

Así, se considerarán los siguientes datos:

$$q = 100 \text{ veh/h.}$$

$$FE = 5512 \text{ h/año.}$$

$$L_1 = 10 \text{ km.}$$

$$L_2 = 12 \text{ km.}$$

⁷ En este sentido, el cálculo para más periodos y tipos de vehículo es simplemente por agregación.

Situación sin proyecto

$$q_1^{SP} = 60 \text{ veq/h.}$$

$$q_2^{SP} = 40 \text{ veq/h.}$$

$$v_1^{SP} = 45 \text{ km/h.}$$

$$v_2^{SP} = 54 \text{ km/h.}$$

$$h_1^{SP} = 5 \text{ det/veh.}$$

$$h_2^{SP} = 5 \text{ det/veh.}$$

$$d_1^{SP} = 0,2 \text{ h/veh.}$$

$$d_2^{SP} = 0,2 \text{ h/veh.}$$

Situación con proyecto

$$q_1^{CP} = 80 \text{ veq/h.}$$

$$q_2^{CP} = 20 \text{ veq/h.}$$

$$v_1^{CP} = 50 \text{ km/h.}$$

$$v_2^{CP} = 60 \text{ km/h.}$$

$$h_1^{CP} = 4 \text{ det/veh.}$$

$$h_2^{CP} = 4 \text{ det/veh.}$$

$$d_1^{CP} = 0,1 \text{ h/veh.}$$

$$d_2^{CP} = 0,1 \text{ h/veh.}$$

Respecto a los factores de emisión unitaria, tanto para movimiento, detenciones y ralentí, estos se determinan como se muestra a continuación; se ilustrará en detalle el procedimiento para el caso del arco 1 en situación sin proyecto, siendo totalmente análogo en el resto de los casos.

Movimiento

La emisión unitaria de vehículos livianos en movimiento, para una velocidad de 45 km/h en el arco 1 en situación sin proyecto, corresponde a $em(v_1^{SP}) = 198,04$ gramos de CO₂eq por kilómetro recorrido, de acuerdo a la Tabla 1 (valor para el rango de 40-50 km/h).

Detenciones

En la tabla 2 no hay directamente un valor para las emisiones unitarias de vehículos livianos asociadas a una velocidad de 45 km/h, por lo que será necesario calcularlo mediante interpolación entre los valores a 40 y 50 km/h, que si están disponibles. Dado que 45 es el punto medio entre 40 y 50, el resultado será simplemente el promedio simple de ambos valores, por tanto $ed(v_1^{SP}) = \frac{28,09+42,02}{2} = 35,055$ gramos de CO₂eq por detención.

Ralentí

De acuerdo a la tabla 3, la emisión unitaria de contaminantes en ralentí para vehículos livianos corresponde a $er = 1869,89$ gramos de CO₂eq por hora.

Luego de repetir este mismo procedimiento para el arco 1 en situación con proyecto, así como para el arco 2 en ambas situaciones, se llegan a los siguientes valores:

Emisiones unitarias		Situación sin proyecto (sbo)	Situación con proyecto
Arco 1	Movimiento	198,04	181,41
	Detenciones	35,055	42,02
	Ralentí	1869,89	1869,89
Arco 2	Movimiento	181,41	172,09
	Detenciones	47,736	56,31
	Ralentí	1869,89	1869,89

El valor vigente del PSC es de \$23.926 por ton CO₂ eq (moneda 30 dic 2020)

De esta manera, el VAE anual de la situación sin proyecto se calcula como sigue:

$$\begin{aligned}
 VAE^{SP} &= \frac{PSC}{\alpha} \cdot FE \cdot (q_1 \cdot [L_1 \cdot em(v_1^{SP}) + h_1^{SP} \cdot ed(v_1^{SP}) + d_1^{SP} \cdot er] + q_2 \cdot [L_2 \cdot em(v_2^{SP}) + h_2^{SP} \cdot ed(v_2^{SP}) + d_2^{SP} \cdot er]) \\
 &= \frac{\$23.926}{10^6} \cdot 5512 \cdot (60 \cdot [10 \cdot 198,04 + 5 \cdot 35,055 + 0,2 \cdot 1869,89] + 40 \cdot [12 \cdot 181,41 + 5 \cdot 47,736 + 0,2 \cdot 1869,89]) \\
 &= \$34.732.250
 \end{aligned}$$

Siguiendo un cálculo análogo, se obtiene $VAE^{CP} = \$29.419.776$ al año, por lo que la valorización neta de emisiones anuales resulta igual a

$$\Delta VAE = VAE^{SP} - VAE^{CP} = \$34.732.250 - \$29.419.776 = \$5.312.474 \text{ al año}$$

Dado que esta valorización neta es positiva, se trata de un beneficio asociado a la implementación del proyecto.

7. Bibliografía

- Gobierno de Chile, 2020. *Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile*. Recuperado el 15 de febrero de 2022 de https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia, 2017. *Estimación del Precio Social del CO₂*.
- Ministerio de Desarrollo Social - Ministerio de Hacienda, 2020. *Normas, Instrucciones y Procedimientos para el proceso de Inversión Pública (NIP)*.
- Ministerio de Desarrollo Social- Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, 2013. *MESPIVU Manual de Evaluación Social de Proyectos de Vialidad Urbana*.
- Ministerio de Energía, 2018. *Balance Nacional de Energía*.
- Ministerio de Energía, 2019. *Balance Nacional de Energía*.
- Ministerio de Medio Ambiente, 2020. *Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (INGEI)*.
- Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2010. *Actualización metodológica MODEM-MODEC para el Gran Santiago*.
- Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2019. *Actualización de las plataformas computacionales de los modelos Ambientales y de Evaluación*.
- Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2021. *Procedimiento: "Estimación De Emisiones De Contaminantes Atmosféricos Para Proyectos Estratégicos De Transporte Con Modem 6.0, en el Contexto del SNI"*.