

Documento de Trabajo No.57¹

Modelos de simulación de huella de carbono para la construcción de rutas

I.- Síntesis

1.- Los desafíos ambientales que enfrenta el planeta vinculados al calentamiento global han llevado, durante los últimos años, a que las **mediciones de huella de carbono** de distintos productos y actividades hayan ido cobrando cada vez mayor importancia ante consumidores y productores, y a que los países las utilicen como indicadores relevantes para la gestión de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

2.- Desde la firma del Protocolo de Kioto en 1997, han ido desarrollándose **metodologías de medición de la huella de carbono**, definida como 'la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, evento o producto'.

3.- En el caso del sector de la construcción, existen protocolos de emisión de GEI aplicables a empresas y/o proyectos, como el de la **European Network of Construction Companies for Research and Development (ENCORD)**, elaborado como complemento de la metodología del 'Greenhouse Gas Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard' del World Resources Institute (SRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), conocido habitualmente como '**GHG Protocol**'.

4.- El protocolo ENCORD establece **3 niveles de alcance**: **emisiones directas** (producidas por fuentes propiedad de la organización reportante o bajo su control), **emisiones indirectas** (producidas por fuentes de emisión propiedad de terceras partes, o bajo el control de terceras partes, pero cuyas emisiones son influenciadas por la reportante) y **otras emisiones indirectas** (producidas por fuentes no controladas por la compañía, pero correspondientes a la cadena de valor).

5.- En cada uno de estos niveles de alcance, la lógica de cálculo es similar: **computar la cantidad de cada ítem generador de emisión de GEI** (por ejemplo, litros de gasoil consumidos por cada equipo en la obra) y **multiplicarla por el factor de emisión** correspondiente (siguiendo con el ejemplo, la cantidad de CO₂ emitido por cada litro de consumo de gasoil), factores de emisión que provienen de estudios técnicos como los realizados por el WRI.

6.- En este documento de trabajo se **aplica el protocolo de ENCORD** a la **construcción de rutas**, según la modelización del **Sistema Estadístico de Costos de la Construcción**, cuyos parámetros técnicos permiten obtener, de manera rigurosa y objetiva, estimaciones de emisiones de GEI a través de su combinación con los factores de emisión correspondientes, provenientes de estudios técnicos del WRI.

¹ Documento de Trabajo elaborado en agosto de 2022. Última revisión: diciembre de 2022.

II.- Metodología de medición de huella de carbono en la construcción

Los desafíos ambientales que enfrenta el planeta vinculados al calentamiento global han llevado, durante los últimos años, a que las mediciones de huella de carbono de distintos productos y actividades hayan ido cobrando cada vez mayor importancia ante consumidores y productores, y a que los países las utilicen como indicadores relevantes para la gestión de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

En este contexto, desde la firma del Protocolo de Kioto en 1997, han ido desarrollándose metodologías de medición de la huella de carbono, definida comúnmente como 'la totalidad de GEI emitidos por efecto directo o indirecto de un individuo, evento o producto', aunque no existen todavía enfoques y herramientas metodológicas uniformes (ver CEPAL, 2010)².

En el caso del sector de la construcción, existen protocolos de emisión de GEI aplicables a las empresas y/o a los proyectos, como el de la **European Network of Construction Companies for Research and Development (ENCORD)**³, elaborado como complemento de la metodología del 'Greenhouse Gas Protocol Corporate Accounting and Reporting Standard' del World Resources Institute (SRI) y el World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), conocido habitualmente como '**GHG Protocol**'.

El protocolo de ENCORD distingue cuatro áreas claves de operación: (a) la **fabricación de materiales**, que incluye la producción de materias primas, la transformación en materiales de construcción y el transporte del producto hasta el lugar de la obra, (b) la **actividad de la construcción**, (c) la **operación** posterior de la infraestructura construida, durante su vida útil, y (d) la **actividad de la construcción** vinculada a la demolición luego de la vida útil, o a las reformas o remodelación durante dicha vida útil.

Al mismo tiempo, el protocolo recomienda la distinción entre **sectores y proyectos**, incluyendo en los primeros a (a) infraestructura, (b) construcción residencial y (c) construcción no residencial y, entre los segundos, a (a) infraestructura vial, (b) oficinas comerciales, (c) educación, (d) edificios públicos, (e) infraestructura ferroviaria, (f) comercio minorista, (g) salud, (h) usos mixtos, (i) residencial, (j) otros comerciales, (k) ocio, (l) industrial, (m) otros tipos de construcción.

A los fines de la medición, en cualquiera de los segmentos mencionados, establece **3 niveles de alcance**:

² CEPAL (2010): "Metodologías de cálculo de la Huella de Carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina", Documentos de Proyectos, Estudios e Investigaciones, División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

³ ENCORD (2012): "Construction CO₂e Measurement Protocol. A Guide to reporting against the Green House Gas Protocol for construction companies", European Network of Construction Companies for Research and Development.

Alcance 1: Emisiones directas. Emisiones producidas por fuentes propiedad de la organización reportante o bajo su control. Por ejemplo, emisiones por consumos de combustibles de camiones y demás equipamiento utilizados en la etapa de construcción.

Alcance 2: Emisiones indirectas. Emisiones producidas por fuentes de emisión propiedad de terceras partes, o bajo el control de terceras partes, pero cuyas emisiones son influenciadas por la compañía reportante. Por ejemplo, emisiones por generación de energía eléctrica utilizada por la empresa constructora.

Alcance 3: Otras emisiones indirectas. Otras emisiones producidas por fuentes no controladas por la compañía, pero correspondientes a la cadena de valor de la construcción. Por ejemplo, emisiones por extracción de materias primas y por transformación de materias primas en materiales utilizados en la construcción.

En cada uno de estos niveles de alcance, la lógica de cálculo es similar: **computar la cantidad de cada ítem generador de emisión de GEI** (por ejemplo, litros o m³ de gasoil consumidos por cada equipo en la obra) y **multiplicarla por el factor de emisión** correspondiente (siguiendo con el ejemplo, la cantidad de CO₂ emitido por cada litro o m³ de consumo de gasoil), factores de emisión que provienen de estudios técnicos como los realizados por el WRI.

Una vez obtenida una estimación de emisión de GEI, por ejemplo emisiones de CO₂, es posible construir una serie de **indicadores clave de desempeño** ('key performance indicators') que, en el caso de la construcción, pueden expresarse como kg o Tn de CO₂ emitidos por cada metro o km de un acueducto, de una línea de transmisión eléctrica o de una infraestructura vial, para mencionar algunos tipos de construcción. Es habitual también que estos indicadores se expresen como **cantidad de CO₂ emitido por cada millón de pesos o dólares**, es decir, por unidades monetarias. Si bien se trata de un tipo de indicador habitual por el sentido que tienen las unidades monetarias en cuestiones económicas, son **indicadores que sufren alta volatilidad y distorsiones en una economía con alta volatilidad de precios relativos como lo es la economía argentina**.

En las próximas secciones, se **aplicará el protocolo de ENCORD** a la construcción de rutas, según la modelización matemática del **Sistema Estadístico de Costos de la Construcción**⁴, cuyos parámetros técnicos permiten obtener, de una manera rigurosa y objetiva, estimaciones de emisiones de GEI a través de su combinación con los factores de emisión correspondientes, provenientes de estudios técnicos del WRI.

⁴ El Sistema Estadístico de Costos de la Construcción es una modelización matemática, desarrollada con algoritmos escritos en lenguaje de programación Python, de la construcción de distintos tipos de infraestructura, incluyendo la construcción de rutas. Ver sección de notas metodológicas.

Próximos documentos de trabajo se ocuparán de simular impactos sobre huella de carbono de distintos supuestos de equipos, antigüedad de los mismos, parámetros de productividad, entre otros factores con incidencia en el nivel de emisiones de GEI, y de extender el análisis a otros tipos de infraestructura.

III.- Huella de carbono en la construcción de rutas

El modelo de simulación de costos de rutas⁵, uno de los modelos incluidos en el Sistema Estadístico de Costos de la Construcción, permite obtener las siguientes estimaciones de fuentes de emisión directa e indirecta:

1.- Fuentes de emisión directa.

La tabla 1 sintetiza los equipos utilizados en cada etapa de la construcción de rutas, la cantidad de cada equipo, la utilización diaria de cada uno (horas por jornada), la productividad (km de ruta por día), la potencia de cada equipo (hph) y el parámetro de consumo de gasoil (litros por hph). La última columna de la tabla contiene la estimación total de consumo de gasoil de cada equipo en cada etapa de construcción, medida en litros por km de ruta.

Los equipos y parámetros técnicos sintetizados en tabla 1 permiten obtener un **consumo de gasoil de 69,121.17 litros por km de ruta**. Con un factor de emisión de gasoil de 2.61 kg de CO₂ por litro⁶, la **emisión generada es de 180.4 Tn de CO₂ por km de ruta**.

Tabla 1. Estimación de emisiones directas por consumo de gasoil

Equipo	Cantidad	hs/día	km / día	hph	litros gasoil/hph	litros gasoil / km
Etapas de limpieza de terreno						
Motoniveladora 140K	1	8	2	180	0.12	86.4
Cargador frontal 924K	0.25	8	2	140	0.12	16.8
Camión volcador	0.25	8	2	180	0.12	21.6
Etapas construcción de alambrados						
Tractor	0.25	8	0.35	70	0.12	48.0
Etapas provisión y colocación de tranqueras						
Tractor	0.25	8	4	70	0.12	4.2
Etapas excavación para fundaciones de alcantarillas						
Retropala BL60	0.2	8	2.8	80	0.12	5.4

⁵ Ver Documento de Trabajo No.50: 'Modelo de simulación de construcción de infraestructura vial, Foro de Análisis Económico de la Construcción, mayo de 2022.

⁶ Fuente de este factor de emisión y los siguientes: Greenhouse Gas Protocol, cross-sector calculation tool.

Tabla 1. Estimación de emisiones directas por consumo de gasoil (cont.)

Equipo	Cantidad	hs/día	km / día	hph	litros gasoil/hph	litros gasoil / km
Etapa hormigón simple tipo 'D' para alcantarillas						
Vibrocompactador	1	8	0.2595	8	0.12	29.6
Minicargador compacto	0.2	8	0.2595	58	0.12	42.9
Vibradores de inmersión	1	8	0.2595	8	0.12	29.6
Etapa hormigón armado tipo 'B' para alcantarillas						
Minicargador compacto	0.2	8	0.9772	58	0.12	11.4
Vibradores de inmersión	1	8	0.9772	12	0.12	11.8
Etapa colocación alcantarillas						
Cargador frontal 924K	0.25	8	0.1961	140	0.12	171.4
Retropala BL60	0.25	8	0.1961	80	0.12	97.9
Etapa terraplén compacto						
Retroexcavadora EC220	0.5	8	0.0373	170	0.12	2,185.1
Motoniveladora 140K	2	8	0.0320	180	0.12	10,797.1
Compactador CS54B	1	8	0.0320	130	0.12	3,899.0
Rod.Autop.RN 7.23	0.5	8	0.0320	90	0.12	1,349.6
Tractor	1	8	0.0320	120	0.12	3,599.0
Camión regador	2	8	0.0320	180	0.12	10,797.1
Camión volcador	1	8	0.0111	180	0.12	15,547.9
Etapa construcción de base granular e: 0.20m						
Rod.Autop.RN 7.23	1	8	0.1400	90	0.12	617.1
Cargador frontal 924K	1	8	0.1400	140	0.12	960.0
Tractor	0.5	8	0.1400	120	0.12	411.4
Rodillo Vibr.Autoprop.	0.5	8	0.1400	130	0.12	445.7
Camión regador	1	8	0.1400	180	0.12	1,234.3
Motoniveladora 140K	1	8	0.1400	180	0.12	1,234.3
Etapa construcción de base granular e: 0.18m						
Cargador frontal 924K	1	8	0.1500	140	0.12	896.0
Rod.Autop.RN 7.23	1	8	0.1500	90	0.12	576.0
Tractor	0.5	8	0.1500	120	0.12	384.0
Rodillo Vibr.Autoprop.	0.5	8	0.1500	130	0.12	416.0
Camión regador	1	8	0.1500	180	0.12	1,152.0
Motoniveladora 140K	1	8	0.1500	180	0.12	1,152.0
Etapa ejecución de riegos asfálticos						
Tractor	0.33	8	0.3947	70	0.12	56.2
Barredora sopladora	0.33	8	0.3947	50	0.12	40.1
Regador de asfalto	0.33	8	0.3947	200	0.12	160.5
Etapa provisión de concreto asfáltico para base negra						
Camión volcador	2	8	0.5265	180	0.12	656.4
Etapa construcción de base negra						
Terminadora Asff. F25000	0.5	8	0.4212	150	0.12	170.9
Rod.Autop.RN 7.23	0.5	8	0.4212	90	0.12	102.6
Aplanadora CC4200	0.5	8	0.4212	130	0.12	148.1
Camión regador	0.25	8	0.4212	180	0.12	102.6

Tabla 1. Estimación de emisiones directas por consumo de gasoil (cont.)

Equipo	Cantidad	hs/día	km / día	hph	litros gasoil/hph	litros gasoil / km
Etapa provisión de concreto asfáltico para carpeta						
Camión volcador	2	8	0.5265	180	0.12	656.4
Etapa construcción de carpeta asfáltica						
Terminadora Asff. F25000	0.5	8	0.4212	150	0.12	170.9
Rod.Autop.RN 7.23	0.5	8	0.4212	90	0.12	102.6
Aplanadora CC4200	0.5	8	0.4212	130	0.12	148.1
Camión regador	0.25	8	0.4212	180	0.12	102.6
Etapa construcción base granular de suelo-arena-cemento e: 0.15m						
Cargador frontal 924K	1	8	0.1333	140	0.12	1,008.0
Rod.Autop.RN 7.23	0.5	8	0.1333	90	0.12	324.0
Tractor	0.5	8	0.1333	120	0.12	432.0
Rodillo Vibr.Autoprop.	0.5	8	0.1333	130	0.12	468.0
Camión regador	1	8	0.1333	180	0.12	1,296.0
Motoniveladora 140K	1	8	0.1333	180	0.12	1,296.0
Etapa pavimento de hormigón e: 20 cm						
Paviment.moldes desl.	1	8	0.0959	80	0.12	800.9
Aserradora de juntas	1	8	0.0959	12	0.12	120.1
Juego de moldes y regla	1	8	0.0959	12	0.12	120.1
Tractor	0.25	8	0.0959	70	0.12	175.2
Etapa baranda metálica cincada para defensa						
Minicargador c/hoyadora	0.5	8	0.0200	58	0.12	1,392.00
Tractor	0.25	8	0.0200	70	0.12	840.00
Consumo de gasoil (litros por km)						69,121.17
Parámetro técnico de emisión de gasoil (Kg CO2 por litro)						2.61
Huella de carbono de construcción de acueducto (Tn CO2 por km)						180.4

Fuente: Economic Trends con parámetros del Sistema Estadístico de Costos de la Construcción y de Greenhouse Gas Protocol.

El gráfico 1 muestra la evolución, entre enero de 2016 y abril de 2022, de la emisión directa expresada como Tn de CO₂ por cada millón de dólares de costo de la infraestructura.

Tal como se advirtió en la sección II, **la volatilidad de precios relativos de la economía argentina hace que el indicador de emisión por unidad monetaria sea altamente inestable** ya que, para un mismo indicador 'físico' de emisión por metro de construcción de acueducto, **el indicador 'monetario' de emisión por dólar de construcción varía a medida que se modifican los precios relativos**. En el periodo analizado, el indicador de emisión directa varió entre un mínimo de 139.63 Tn de CO₂ por millón de dólares y un máximo de 202.75 Tn de CO₂ por millón dólares, una **diferencia del 45.2%**.

Esto significa que, en cualquier esquema que el Estado decida incluir en sus licitaciones de obra pública parámetros de huella de carbono, **debería hacerlo mediante**

indicadores ‘físicos’, como Tn de Co2 por km, por ejemplo, en lugar de hacerlo mediante indicadores ‘monetarios’ como Tn por cada dólar o peso.

Gráfico 1
Huella de carbono en la construcción de rutas
Tn Co2 por millón de dólares



Fuente: Economic Trends S.A - Sistema Estadístico de Costos de la Construcción

2.- Fuentes de emisión indirecta.

La tabla 2 detalla los principales materiales utilizados en las distintas etapas de construcción y sus respectivos coeficientes de emisión, lo que implica una **estimación de emisión indirecta de 762.3 Tn de CO₂ por km de ruta.**

Con esta estimación, de las emisiones de CO₂ generadas por la construcción de una ruta de las características detalladas, el 19.1% corresponde a las emisiones directas, producidas por la utilización de equipamiento con motores a combustión, y el 80.9% restante corresponde a las emisiones indirectas, producidas por la utilización de materiales con distintos coeficientes de emisión.

Tabla 2. Estimación de emisiones indirectas por utilización de materiales

Material	Cantidades por km			Coeficientes de emisión		Coef.Conv.	Huella carbono
	m3/km	m/km	Tn/km	kgCO2/kg	Fuente		
Hormigón simple tipo 'D' H-13	14.2			0.10500	ICE (Inventory of Carbon Energy)	2.4	3,573.2
Hormigón armado tipo 'B' H-21	3.4			0.13400	ICE (Inventory of Carbon Energy)	2.4	1,086.0
Caño diám 800 mm		61.2					
Arena sílicea para sub-base granular e: 0.20 m			2,886.0	0.00747	ICE (Inventory of Carbon Energy)		21,558.4
Arena sílicea para base granular e: 0.18 m			1,596.0	0.00747	ICE (Inventory of Carbon Energy)		11,922.1
Triturado 6-25 para base granular e: 0.18 m			1,596.0	0.00618	National Stone Sand & Gravel Association		9,863.3
Riegos asfálticos				0.05420	ICE (Inventory of Carbon Energy)		
Concreto asfáltico para base negra							
Triturado 6-19	172.6			0.00618	National Stone Sand & Gravel Association	2.31	2,464.7
Triturado 6-25	85.5			0.00618	National Stone Sand & Gravel Association	2.31	1,220.2
Arena sílicea	99.1			0.00747	ICE (Inventory of Carbon Energy)	1.52	1,125.7
Triturado 0-6	185.8			0.00618	National Stone Sand & Gravel Association	2.31	2,651.8
Cemento asfáltico	26.8			0.05420	ICE (Inventory of Carbon Energy)	1.05	1,524.1
Concreto asfáltico para carpeta							
Triturado 6-19	219.4			0.00618	National Stone Sand & Gravel Association	2.31	3,131.7
Arena sílicea	98.6			0.00747	ICE (Inventory of Carbon Energy)	1.52	1,119.3
Triturado 0-6	219.4			0.00618	National Stone Sand & Gravel Association	2.31	3,131.7
Cemento asfáltico	32.5			0.05420	ICE (Inventory of Carbon Energy)	1.05	1,848.4
Base granular suelo-arena-cemento e: 0.15 m							
Cemento			165.0	0.83200	ICE (Inventory of Carbon Energy)		137,280.0
Arena sílicea			2,055.0	0.00747	ICE (Inventory of Carbon Energy)		15,350.9
Pavimento de hormigón e: 20 cm							
Hormigón H25	1,606.0			0.14100	ICE (Inventory of Carbon Energy)	2.4	543,470.4
Total							762,321.9
TnCO2/km							762.3

Fuente: Economic Trends con parámetros del Sistema Estadístico de Costos de la Construcción y de Greenhouse Gas Protocol.

IV.- Notas metodológicas

1.- El modelo de simulación de costos de construcción de rutas es uno de los componentes del Sistema Estadístico de Costos de la Construcción, diseñado y ejecutado por Economic Trends, con metodología propia, para el Foro de Análisis de la Construcción.

2.- El modelo está desarrollado en lenguaje de programación Python, y permite (a) generar estadísticas de costos, (b) realizar proyecciones de costos bajo diferentes escenarios, (c) realizar simulaciones de impacto de cambios en cualquier factor con incidencia sobre los costos de construcción de rutas, (d) generar reportología de manera automatizada.

3.- Todos los supuestos de trabajo son parámetros que se mantienen fijos a los fines de la generación de estadísticas, pero son modificables para la realización de simulaciones.

4.- La metodología utilizada no sufre la distorsión que, en una economía volátil como lo es la economía argentina, se produce cuando se modifican abruptamente los precios relativos y se utilizan metodologías tradicionales de generación de estadísticas de

costos, basadas en promediar variaciones porcentuales de costos de distintos ítems con ponderadores fijos en el tiempo, que suponen participaciones constantes cuando éstas se modifican mientras cambian los precios relativos. Por el contrario, la metodología utilizada da cuenta de todos los impactos vinculados a la volatilidad de precios relativos, ya que computa, desde 'base cero', todos los costos, sin presuponer participaciones determinadas en la estructura de costos.

5.- El Sistema Estadístico de Costos de la Construcción no genera valores de cotización de obras específicas, sino un modelo para evaluar la evolución de los costos, la proyección de los mismos bajo distintos supuestos y la simulación de impactos de distintos factores con incidencia sobre los costos.

6.- El modelo utilizado no incluye análisis de costos financieros y de redeterminaciones de costos, para lo cual el Foro de Análisis Económico de la Construcción desarrolló un modelo complementario para simular dichos costos bajo distintos supuestos de trabajo⁷.

Informe elaborado por
el **Comité de Análisis del Foro de Análisis Económico de la Construcción**,
con la asistencia técnica de **Economic Trends S.A.**

El **Foro de Análisis Económico de la Construcción** es un espacio de **investigación continua** (cada análisis genera inquietudes que realimentan el proceso), **integrada** (integra a economistas y empresarios de la construcción en un Comité de Análisis) y **focalizada** (pretende la rigurosidad propia de la actividad académica, pero con foco en temas específicos de interés para el sector).

⁷ Ver Documento de Trabajo No.17: 'Incidencia de inflación, esquemas de redeterminación y plazos de pago sobre los costos de construcción', Foro de Análisis Económico de la Construcción, octubre de 2018.

También Documento de Trabajo No.55: 'Análisis de la necesidad de indexación por inflación en obras públicas', Foro de Análisis Económico de la Construcción, julio de 2022.