

UNIVERSIDAD ESTATAL A DISTANCIA
VICERRECTORÍA ACADÉMICA
ESCUELA DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES
MAESTRÍA ACADÉMICA EN MANEJO DE RECURSOS NATURALES
CON ENFÁSIS EN GESTIÓN AMBIENTAL

**Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases
efecto invernadero para vehículos en Costa Rica en el año 2014**

Tesis presentada al Tribunal Examinador del Programa de Maestría Académica
en Manejo de Recursos Naturales de la Escuela de Ciencias Exactas y
Naturales para optar por el grado de *Magister Scientiae* con énfasis en gestión
ambiental

Priscila Picado Valenzuela

Director de tesis: Javier Rodríguez, urutico@gmail.com
Lector de tesis: Ricardo Román, rroman@cenat.ac.cr
Lector de tesis: José Pablo Sibaja Brenes, jose.sibaja.brenes@una.cr

San José, Costa Rica

AGOSTO, 2022

Dedicatoria

A quienes iniciaron este proyecto conmigo y no lograron ver su finalización. A quienes estuvieron siempre presentes y a quienes se unieron en la última parte del camino.

ÍNDICE

TÍTULO.....	6
RESUMEN	6
ABSTRACT.....	6
INTRODUCCIÓN	5
MATERIALES Y MÉTODOS	7
RESULTADOS	11
DISCUSIÓN.....	15
AGRADECIMIENTOS	16
ÉTICA, CONFLICTO DE INTERESES Y DECLARACIÓN DE FINANCIAMIENTO	17
REFERENCIAS	17
ANEXOS	19

Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica en el año 2014

Priscila Picado Valenzuela

Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales, UNED. CP 840-2300 San José ppicado@icloud.com, ORCID 0000-0001-5676-2723

(Este trabajo fue sometido a la revista CUADERNOS DE INVESTIGACION para su publicación formal. Debe buscarse como: Priscila Picado Valenzuela, Javier E. Rodríguez Yáñez, Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica en el año 2014. Anexo).

RESUMEN. Introducción: Contar con métodos confiables para estimar las emisiones antropogénicas de Gases de Efecto Invernadero (GEI) es de vital importancia para diseñar estrategias eficientes para mitigar los efectos del cambio climático. Uno de estos métodos es el software MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator* – Simulador de Emisiones de Vehículos Motorizados) diseñado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés). Otra metodología es la implementada por el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica, la cual se basa en las directrices del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). **Objetivo:** Determinar la factibilidad de utilizar MOVES en el contexto costarricense para la obtención de factores locales que mejoren las estimaciones de emisiones de GEI para fuentes móviles vehiculares en Costa Rica en el año 2014. **Métodos:** Se evaluaron dos escenarios de emisiones estimadas de GEI calculados mediante el software de modelado MOVES y la metodología de cálculo implementada por el IMN. Para esto se recopiló información de diferentes fuentes oficiales para suplir de datos a ambas metodologías y realizar el análisis. Asimismo, se realizó una comparación cuantitativa con una escala Likert para determinar la confiabilidad de los dos métodos. **Resultados:** Se encontró que MOVES calcula valores de emisión de GEI más altos que la metodología del IMN. Relacionado a esto, el análisis con las categorías Likert demostró que la confiabilidad de los datos de la metodología MOVES para Costa Rica es menor que los utilizados por el IMN. **Conclusión:** Se encontró que la metodología de cálculo de emisiones de GEI por MOVES y por el IMN brindan un rango superior e inferior al cálculo de emisiones de GEI. Asimismo, ambas metodologías plantean aproximaciones complementarias al estudio de las emisiones de GEI. MOVES permite la caracterización de la emisión y el método del IMN permite comparaciones históricas e intersectoriales. La categorización Likert, en el software MOVES es inferior debido a la falta de información detallada. **Palabras clave:** factores de emisión, inventario, transporte, modelado, automotores.

ABSTRACT. “Comparison of two methodologies for calculating greenhouse gas emissions for vehicles in Costa Rica in 2014” **Introduction:** Having reliable methods to estimate anthropogenic emissions of Greenhouse Gases (GHG) is of vital importance to design efficient strategies to mitigate the effects of climate change. One of these methods is the MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) software designed by the United States Environmental Protection Agency (EPA). Another methodology is the one implemented by the National Meteorological Institute (NMI) of Costa Rica, which is based on the guidelines of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). **Objective:** To determine the feasibility of using MOVES in the Costa Rican context to obtain local factors that improve GHG emission estimates for vehicular mobile sources in Costa Rica in 2014. **Methods:** Two scenarios of estimated GHG emissions calculated using the MOVES modeling software and the calculation methodology implemented by the NMI. For this, information was collected from different official sources to supply data to both methodologies and perform the analysis. Likewise, a quantitative comparison was made with a Likert scale to determine the reliability of the two methods. **Results:** It was found that MOVES calculates higher GHG emission values than the IMN methodology. Related to this, the analysis with the Likert scale showed that the reliability of the data used for MOVES methodology for Costa Rica is lower than that data used by the IMN. **Conclusion:** It was found that the methodology for calculating GHG emissions by MOVES and by the IMN provide an upper and lower range for the calculation of GHG emissions. Likewise, both methodologies propose complementary approaches to the study of GHG emissions. MOVES allows the characterization of the emission and the IMN method allows historical and intersectoral comparisons. The Likert categorization in the MOVES software is inferior due to the lack of detailed information. **Keywords:** Emission factors, inventory, transport, modeling, automobiles.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la crisis más importante de nuestra era (von Stechow et al., 2015). Se estima que para el año 2030 la temperatura promedio global podría llegar a aumentar 1,5°C con respecto a los niveles preindustriales (World Economic Forum, 2022). Según el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus en inglés), un aumento de 2 °C pone en riesgo la supervivencia de un sinnúmero de especies en el planeta, entre ellas la especie humana (IPCC, 2018). De las distintas formas de emisiones que se dan en el planeta, las emisiones antropogénicas producidas por el transporte aportaron un 14 % de las emisiones globales de Gases Efecto Invernadero (GEI) para el año 2010 (IPCC, 2014). Los GEI más comunes son CO₂, CH₄ y N₂O (IPCC, 2018). Para estos, es importante cuantificar la cantidad de emisiones, considerando también el potencial de calentamiento global (PCG). Las directrices del IPCC (2006) sugieren un PCG de 1 para CO₂, 21 para CH₄ y 310 para N₂O, generando su correspondencia en CO₂ equivalente.

El transporte de personas y mercancías es uno de los ejes centrales de las economías globalizadas. Las emisiones de los GEI procedentes de fuentes móviles se clasifican según el tipo de transporte: terrestre por carretera, ferrocarril, aéreo, marítimo y fluvial (IPCC, 2006). En la actualidad, los vehículos en carretera son la principal fuente de GEI del sector transporte, estos aportan cerca de un 25 % del total de las emisiones de CO₂ (Edelenbosch et al., 2017). Los vehículos que circulan por carretera pueden ser automóviles, motocicletas, vehículos de carga liviana, camiones de carga pesada, tractores, grúas y autobuses (IPCC, 2006).

Recientemente, se han desarrollado herramientas de modelación para cuantificar las emisiones de GEI (Edelenbosch et al., 2017). Estos modelos utilizan algoritmos para representar la realidad y establecer causalidad entre un conjunto de parámetros y la emisión de GEI (Reynolds & Broderick, 2000). En otras palabras, se ha definido la emisión como una variable dependiente vinculada a otros factores tales como lo son el combustible utilizado o la velocidad del movimiento realizado o el tipo de vehículo; donde uno o varios de los factores afectan la variación de estas emisiones (K. Zhang et al., 2013). Para esto, se toman datos del parque vehicular (cantidad y tipo de vehículos), de su nivel de actividad (kilómetros recorridos, consumo de combustible) y de factores locales (p.ej., humedad relativa, tipo de carretera), a fin de determinar los factores de emisión y/o estimar las emisiones de GEI (United States Environment Protection Agency [US-EPA], 2012).

Las metodologías para estimar emisiones de GEI varían según el grado de complejidad y el nivel de detalle de los datos que requieren. Metodologías como las *Tier 1* son las más

simples, las del tipo *Tier 2* son intermedias y las *Tier 3* son las más complejas y necesitan de datos muy específicos (IPCC, 2006). La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA, por sus siglas en inglés) desarrolló el software MOVES (*Motor Vehicle Emission Simulator – Simulador de Emisiones de Vehículos Motorizados*) para estimar las emisiones de GEI provenientes de vehículos en carretera (USEPA, 2012). MOVES es una metodología nivel *Tier 3* e integra las herramientas, los algoritmos, los datos y los conocimientos necesarios para realizar análisis de emisiones de fuentes vehiculares asociados al desarrollo de regulaciones, normas, inventarios y proyecciones, tanto regionales como nacionales (Tolvett et al., 2009).

A nivel mundial, las directrices del IPCC para la elaboración de Inventarios Nacionales de GEI son el estándar para el cálculo y el reporte de emisiones (Vicuña, 2014). En América Latina se han utilizado distintas metodologías para estimar emisión de GEI. En el 2005, Chile realizó su inventario de emisiones con los softwares de modelado COPERT III y MODEM (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2009). El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) utiliza una metodología *Tier 2 simplificada* para los Inventarios de GEI de Costa Rica (INGEI-CR), donde los factores de emisión se expresan en función del tipo combustible y tipo de tecnología de control de la contaminación (con o sin control), sin asociarlo con el tipo de vehículos (Ministerio del Ambiente y Energía [MINAE], 2019). La cantidad de vehículos que circulan en las carreteras de Costa Rica ha aumentado significativamente durante los últimos 30 años. En 1980 había alrededor de 181 000 vehículos, para el 2014 esta cifra aumentó aproximadamente a 1 400 000 unidades (Dirección Sectorial de Energía [DSE], 2015). Loría Salazar (2014) indica que la flota vehicular del 2014 estaba conformada por 73,4 % de automóviles particulares y de carga liviana, un 20,6 % de motocicletas, un 2,7 % de vehículos de carga pesada, un 2,1 % de autobuses y taxis y un 1,2 % de otros equipos. El 83 % vehículos con motor de gasolina (1 160 897 unidades) y 17 % con motores diésel (238 186 unidades) (DSE, 2015).

En el caso de Costa Rica, el transporte es la principal fuente neta de emisiones del sector energía y del INGEI-CR (MINAE, 2019). En el año 2014 el transporte contribuyó con un 75 % de las emisiones del sector, de las cuales el 95 % correspondieron al transporte terrestre. Los mayores responsables de estas emisiones son los vehículos particulares (48 %), seguidos por los camiones de servicio pesado y autobuses (27 %) y carga liviana con un (21 %) (MINAE, 2021). Estas fuentes emiten; entre otros contaminantes, 4 532,41 Gg de CO₂, 1,187 Gg de CH₄ y 0,314 Gg de N₂O (MINAE, 2019). Esta cantidad de vehículos emiten una serie de GEI que significan un importante aporte a huella de carbono de Costa Rica y afecta en la calidad de aire, sobre todo del Gran Área Metropolitana (GAM) (Steinvorth Álvarez, 2016).

El presente estudio busca determinar la factibilidad de utilizar MOVES en el contexto costarricense para la obtención de factores locales que mejoren las estimaciones de emisiones de GEI para fuentes móviles vehiculares en Costa Rica en el año 2014. Para esto se desarrollaron bases de datos que integraron los requerimientos para el cálculo de emisiones con el software MOVES y los factores de emisión utilizados por el IMN para fuentes móviles vehiculares en Costa Rica en el año 2014. Asimismo, se realizó una comparación cuantitativa de los dos métodos para determinar su confiabilidad y aplicabilidad para el contexto costarricense.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recopilaron datos meteorológicos y de características técnicas del parque vehicular con el propósito de estimar las emisiones de GEI generadas por las fuentes automotores que circularon en carretera en Costa Rica durante el año 2014. La recolección de los datos abarcó todo el año, considerando todos los días de la semana y en todos los horarios, para todo el territorio del país. Para los análisis con el software MOVES (USEPA, 2012) y la metodología utilizada por el IMN (MINAE, 2021) se utilizan variables diferenciadas (Tabla 1).

TABLA 1

Lista de variables utilizadas para la estimación de GEI emitidos por el parque vehicular costarricense para el año 2014 con el software MOVES y con la metodología del IMN.

MOVES	IMN
1. Parámetros meteorológicos.	1. Consumo de combustible (L).
2. Parámetros vehiculares técnicos.	2. Factor de emisión de los gases contaminantes.
3. Parámetros fisicoquímicos del combustible y consumo.	3. Potencial de Calentamiento Global de los gases.
4. Parámetros de circulación de los vehículos.	
5. Procesos de emisión.	

Estimación de GEI con MOVES

MOVES utiliza un sistema de manejo de base de datos con relaciones MYSQL para el ordenamiento de los datos. Los parámetros recopilados para el análisis fueron las siguientes:

1. Parámetros meteorológicos:

- a. Temperatura horaria promedio: temperatura promedio de cada hora de las estaciones meteorológicas automáticas distribuidas a lo largo de Costa Rica. Los datos fueron aportados por el IMN y el ICE.
- b. Humedad relativa promedio: humedad relativa promedio de cada hora de las mismas estaciones meteorológicas. Esta información fue facilitada por el IMN y el ICE.
- c. Presión barométrica: se asumió una presión barométrica a baja altura de 29,8 in Hg debido a que la mayoría de las carreteras de circulación están a menos de 1 680 m.s.n.m., los datos fueron aportados por el IMN y el ICE.

2. Parámetros vehiculares técnicos:

Los datos vehiculares se clasificaron según el año del modelo, el tipo de vehículo y el combustible, con una antigüedad máxima de 30 años (de 2014 a 1984, los vehículos anteriores a 1984 se incluyen en ese año). Estos datos se obtuvieron del registro del pago del impuesto de circulación recolectado por el Instituto Nacional de Seguros (INS) en el año 2015, vehículos que no pagaron el derecho de circulación correspondiente a ese año no fueron contabilizados. Las categorías vehiculares del INS se reclasificaron según la categorización de MOVES (Anexo Tabla 1).

3. Parámetros fisicoquímicos del combustible y consumo:

Los combustibles considerados son gasolina (regular y super) y diésel. No se tomaron en cuenta los datos de vehículos cuyo combustible es Gas Licuado de Petróleo (GLP), debido a la reducida información disponible en cuanto al consumo de combustible y la cantidad de vehículos en el año de estudio. No se consideraron otros combustibles como el etanol y el gas natural, ni datos de vehículos eléctricos. Los valores de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles (Anexo Tabla 2) se promediaron según el consumo de cada gasolina a nivel anual. Los datos de consumo de combustible fueron aportados por la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos (ARESEP), mientras que los datos de caracterización fisicoquímica fueron aportados por la Refinadora Costarricense de Petróleo (RECOPE).

4. Parámetros de circulación de los vehículos:

- a. Tipos de ruta: las carreteras de la Red Vial Nacional se clasifican en rutas primarias, secundarias y terciarias (Anexo Tabla 3). Dichas categorías se reclasificaron como rural y urbana en MOVES. Los datos fueron obtenidos del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT, 2015).
- b. Distancia recorrida por cada una de las categorías vehiculares: como medida de distancia recorrida se utilizó el valor promedio de las lecturas de los tacómetros de cada categoría vehicular. Estos datos se recopilaron a partir de las inspecciones periódicas realizadas por Revisión Técnica Vehicular (RTV) durante el 2016 (Anexo Tabla 4) y el anuario de información del MOPT (MOPT, 2015).
- c. Velocidad promedio de circulación por categoría vehicular y por tipo de ruta. Esta información se obtuvo de datos recolectados de las estaciones de conteo de tránsito del MOPT a través de la Dirección de Cambio Climático (Anexo Tabla 6).

5. Procesos de emisión:

Se contabilizaron las emisiones al momento del arranque y durante la circulación por carretera en vehículos con o sin cárter. Los valores de emisión de gases fueron estimados y fijados por el programa. Además de estos parámetros, MOVES requiere de otros tipos de datos, como: tiempos de reposo, arranque y uso por categoría vehicular. Estos parámetros no se incluyeron en el modelo por falta de información para el año de estudio. Asimismo, MOVES acepta datos de normativas de circulación e inspección vehicular. Sin embargo, estos parámetros tampoco se tomaron en cuenta para el análisis debido a que están asociados con la normativa de EE. UU. Ninguno de estos datos es de uso obligatorio para correr el modelo.

Todos los parámetros fueron ingresados en el programa MOVES y se estimaron las emisiones totales en toneladas de CO₂ equivalente (t CO₂eq) y el factor de emisión promedio (en g/km) de tres GEI: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Dichos GEI se calcularon según el tipo de combustible, tipo de vehículo y por año del modelo. Todos los valores fueron calculados anualmente.

Estimación de GEI según el IMN:

El IMN sigue las directrices metodológicas del IPCC para la estimación de emisiones de GEI (MINAE, 2021). El cálculo de las emisiones de GEI para el parque vehicular se estimó con la siguiente fórmula:

$$T \text{ CO}_2 \text{ eq} = (L_{\text{comb}} \times FE_{\text{CH}_4} \times 21 + L_{\text{comb}} \times FE_{\text{CO}_2} \times 1 + L_{\text{comb}} \times FE_{\text{N}_2\text{O}} \times 310) / 1000$$

donde T CO₂ eq son las toneladas de dióxido de carbono equivalente, L_{comb} es la cantidad de combustible (gasolina o diésel) en litros, FE_{gas} es el factor de emisión del gas en la combustión (Tabla 2) y los valores 21, 1 y 310 corresponden al potencial de calentamiento global de cada gas a un horizonte de 100 años (IPCC, 2006). El cálculo se realizó para gasolina y diésel.

TABLA 2

Factores de emisión de GEI utilizados por el IMN para fuentes móviles (IMN, 2021).

Combustible	GEI		
	CO ₂ (kg/L)	CH ₄ (g/L)	N ₂ O (g/L)
Gasolina	2,231	1,176 *	0,116 *
		0,907 **	0,283**
Diésel	2,613	0,149	0,154

*Sin catalizador. **Con catalizador

Los datos correspondientes al consumo de combustible se obtuvieron del portal de datos abiertos de la Refinadora Costarricense de Petróleo RECOPE, (2017) y del Balance Energético para el año 2014 elaborado por la Secretaría de Planificación del Subsector Energía (SEPSE, 2018). Se utilizaron los factores de emisión de GEI publicados por el IMN para el año 2021. La elección del factor de emisión se determinó según la tecnología del vehículo con o sin catalizador. Para vehículos anteriores al año 1990 se asumió que no tenían catalizador, mientras que para vehículos posteriores a 1991 se asumió que sí tenían catalizador. Esto debido a que la Normativa EURO 0 para Estándares de Emisión determinó la obligatoriedad de la presencia del catalizador en la manufactura de vehículos a partir de 1991 (Hooftman et al., 2018).

Comparación cuantitativa de las estimaciones de GEI calculadas con MOVES y según el IMN:

Se realizó una comparación cuantitativa tipo Likert (Cremades & Rincón, 2011) de las dos metodologías de estimación de GEI. Para esto, se aplicó una escala Likert adaptada por Rodríguez-Yáñez (2018) a gases contaminantes tóxicos. Se definieron cinco rangos, que abarcan desde parámetros con alta precisión, exactitud y el alcance adecuado, hasta parámetros con datos insuficientes (Tabla 3). Estos rangos se definieron con valores entre cero a uno y se utilizó la siguiente fórmula para estimar la confiabilidad total de los parámetros:

$$\text{Confiabilidad} = \frac{\sum(n_{\text{categoría}} \times \text{Valor categoría Likert})}{n_{\text{metodología}}}$$

donde $n_{\text{categoría}}$ es el número de parámetros en cada categoría Likert y $n_{\text{metodología}}$ es el total de parámetros utilizados en cada metodología. Valores de confiabilidad más cercanos a uno indican mayor confiabilidad, valores más cercanos a cero indican baja confiabilidad (Tabla 4).

TABLA 3

Escala de calificación de la confiabilidad de los datos

Rangos	Criterios
0,8	Basados en datos exhaustivos específicos para Costa Rica
0,6	Basado en datos limitados o extrapolados específicos para Costa Rica
0,4	Basado en el discernimiento de expertos
0,2	Basado en factores globales o externos
0,0	Datos insuficientes

TABLA 4

Valoración confiabilidad según escala arbitraria

Valor de confiabilidad	Categoría
0,000 a 0,125	Muy malo
0,126 a 0,250	Malo
0,260 a 0,375	Pobre
0,376 a 0,500	Medio
0,510 a 0,625	Leve
0,626 a 0,750	Bueno
0,760 a 0,875	Muy bueno
0,876 a 1,000	Excelente

RESULTADOS

Factores de emisión estimados por MOVES:

Con el software MOVES se calcularon factores de emisión nacionales para cada categoría vehicular. Se estimó que los autobuses tienen el factor de emisión de CO₂ más alto, seguido por los vehículos de pasajeros que utilizan gasolina y los vehículos de carga pesada (Tabla 5). Esto puede estar asociado a que los autobuses del parque vehicular son relativamente viejos con respecto a los vehículos de otras categorías (Loría Salazar, 2014; Riteve SyC, 2015).

También se consideraron los kilómetros recorridos por cada tipo de vehículo (Anexo Tabla 4). En este sentido, los autobuses, son los que presentan un valor mayor, en comparación con los otros los otros vehículos, lo que también afecta su emisión total (Schipper et al., 2011).

Los vehículos de pasajero que utilizan diésel tienen el factor de emisión de CO₂ más bajo, lo que está relacionado a la cantidad de vehículos de esta categoría en el parque vehicular (MOPT, 2015; INS, 2015). Por otro lado, los factores de emisión de CH₄ y N₂O fueron más altos para vehículos de pasajeros y de carga liviana de gasolina. En contraposición, los vehículos de pasajero y de carga liviana de diésel tienen los factores de emisión de CH₄ y N₂O más bajo. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta que el factor de calentamiento global de estos gases es mayor. Por lo que el aporte de estas emisiones es considerable.

TABLA 5

Factores de emisión calculados con MOVES para el parque vehicular costarricense en el año 2014.

Categoría vehicular	Combustible	Factor de emisión (g/km)		
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Motocicleta	Gasolina	54,76	5,24x10 ⁻³	3,91x10 ⁻⁴
Vehículo de pasajeros	Gasolina	235,39	1,85x10 ⁻²	1,54x10 ⁻²
	Diésel	32,06	6,32x10 ⁻⁶	2,22x10 ⁻⁶
Carga liviana	Gasolina	101,38	6,29x10 ⁻³	5,22x10 ⁻³
	Diésel	37,09	2,82x10 ⁻⁵	1,74x10 ⁻⁵
Autobús	Diésel	476,14	1,39x10 ⁻³	8,11x10 ⁻⁴
Carga pesada	Diésel	227,19	7,34x10 ⁻⁴	4,94x10 ⁻⁴

Resumen de emisiones por cada método:

Con el software MOVES se estimó que, en Costa Rica, para el año 2014, se produjo un total de 6 245,81 Gg CO₂eq. De este total, un 55 % de las emisiones de CO₂eq corresponden a gasolina, donde el CO₂ representa en ambos combustibles más del 95 % de las emisiones. Las emisiones de CH₄ son mayores que las de N₂O en cada combustible, pero los valores de CO₂ eq son mayores para el N₂O (Tabla 6).

Con la metodología del IMN se estimó que, en Costa Rica, para el año 2014, se produjo un total de 4 912,44 Gg CO₂eq. De este total, un 51 % de las emisiones de CO₂eq corresponden a gasolina, de la misma forma que en el MOVES los porcentajes de emisión y las tendencias se mantienen.

TABLA 6

Emisiones estimadas para cada GEI con el software MOVES y con la metodología del IMN en Costa Rica para el año 2014.

Metodología	Combustible	GEI (Gg)			
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
MOVES	Gasolina	3 367,81	0,99	0,15	3 433,49
	Diésel	2 778,47	0,14	0,10	2 812,33
	Total				6 245,81
IMN	Gasolina	2 438,26	1,14	0,11	2 496,30
	Diésel	2 374,76	0,13	0,13	2 416,14
	Total				4 912,44
Relación (MOVES/IMN)	Gasolina	1,38	0,87	1,32	1,38
	Diésel	1,17	1,09	0,80	1,17
	Total				1,27

Comparación de las estimaciones de GEI calculadas con MOVES y según el IMN:

La estimación de CO₂eq con MOVES es en términos general un 27 % superior al valor calculado por el método del IMN. Las emisiones globales de CO₂ son mayores por MOVES en un 28 %, en tanto que para CH₄ son menores en un 10 %, mientras que las de N₂O resultan similares. En relación con los combustibles las emisiones de gasolina son mayores que las de diésel en casi todos los parámetros. En términos globales los vehículos de gasolina aportan alrededor del 55 % en MOVES y 51 % en IMN. Esto está asociado a la estructura del parque vehicular donde la cantidad de vehículos a gasolina es mayor.

En cuanto a las emisiones calculadas por cada GEI según tipo de combustible, se observa que MOVES presenta valores mayores que el IMN para CO₂ y N₂O en gasolina, y para CO₂ y CH₄ en diésel.

Confiabilidad de los datos:

Según el índice de confiabilidad de los datos, aplicando la escala Likert, los valores obtenidos para la metodología del IMN son más confiables (valor 0,70; buena confiabilidad), que los obtenidos para el software MOVES (valor 0,56; leve confiabilidad). El método aplicado por el IMN requiere pocos datos, con información disponible y de calidad. Por el contrario, MOVES

requiere más parámetros para su funcionamiento, los cuales tienen un alcance limitado y/o son valores extrapolados para Costa Rica.

En caso del método MOVES los parámetros meteorológicos, así como los de tipo de vehículo y las características del combustible son insumos exhaustivos y específicos para Costa Rica. Por el contrario, los parámetros de circulación de vehículos y de consumo de combustible por tipo de vehículos son menos confiables, ya que son extrapolaciones. Por otro lado, no se cuenta con datos de procesos de emisión y otros parámetros como tiempo reposo y arranque (Tabla 7).

Para la metodología del IMN, los datos de consumo de combustible son óptimos para realizar las estimaciones de emisión de GEI, mientras que los factores de emisión de GEI son de menor precisión y exactitud, ya que provienen de datos extrapolados para Costa Rica.

TABLA 7

Listado de parámetros utilizados en las dos metodologías para estimar GEI, categorizados rangos.

Metodología	Rangos				
	0,8	0,6	0,4	0,2	0,0
MOVES	Temperatura horaria promedio	Consumo de combustible	Procesos de emisión del cárter	-	Emisión al arranque
	Humedad relativa promedio	Tipo de ruta		Emisión en circulación	
	Presión barométrica	Distancia recorrida	Otros: tiempos de reposo, arranque y uso por categoría vehicular, normativas de circulación e inspección vehicular		
	Año del modelo	Velocidad promedio de circulación			
	Tipo de vehículo				
	Tipo de combustible				
	Parámetros fisicoquímicos del combustible				
IMN	Consumo de combustible	Factor de emisión de los GEI con o sin catalizador		-	

DISCUSIÓN

En el análisis general se encontró que el patrón de emisión de GEI en ambos métodos es similar ($\text{CO}_2 \gg \text{CH}_4 > \text{N}_2\text{O}$) y concuerda con lo indicado por el IPCC en la mayoría de los países, en relación con su parque vehicular (IPCC, 2018). De la misma forma, esta tendencia de emisión para vehículos por carretera concuerda con los resultados del INGEI costarricense y la aplicación de otros métodos de modelado de emisiones a nivel global (IMN; 2021; T. C. Zhang & Surampalli, n.d.; Zhao et al., 2014).

MOVES estimó emisiones totales de GEI en CO_2eq un 27 % superiores a lo estimado con el método del IMN. Otros estudios, en los que se compara MOVES con otros softwares de modelación, han encontrado una tendencia similar, donde MOVES estima un valor de emisión superior al método de comparación (Bai et al., 2009; Liu et al., 2014). La causa más probable de esta diferencia es que MOVES requiere de datos a nivel *Tier 3* (Reynolds & Broderick, 2000; USEPA, 2012), los cuales son más complejos y altamente específicos (Edelenbosch et al., 2017; Liu et al., 2014).

Adicionalmente, en la utilización de MOVES, Ramírez et al. (2019) sugieren que es necesario hacer un ajuste para el parque vehicular fuera de Estados Unidos. Por ejemplo, las motocicletas en Estados Unidos tienen una potencia de motor de 10 HP a 15 HP mientras que, en Latinoamérica, los rangos de potencia media están entre los 6,5 HP y 10 HP. También, Liu et al. (2013) sugieren realizar el cálculo de un factor de deterioro de la flota vehicular para que las categorías vehiculares sean comparables. Finalmente, la utilización de MOVES tiene una aplicabilidad limitada a sistemas y lugares con baja disponibilidad de datos para la mayoría de los parámetros (Al-Ghandour & Branch Manager, n.d.). Relacionado con esto, el índice de confiabilidad de datos para MOVES, aplicando la escala Likert, fue bajo debido a la necesidad de extrapolaciones. Aun así, es necesario resaltar el valor agregado de esta metodología en la obtención de los factores de emisión asociados a cada tipo de vehículo, lo que permite una posible valoración posterior específica para cada categoría vehicular.

En cuanto al método aplicado por el IMN, este ha utilizado el mismo para el reporte del INGEI de varios sectores desde 1990 (MINAE, 2021). Esto permite que las estimaciones se puedan comparar con años anteriores y entre sectores. Por otro lado, este método también es utilizado por los países miembros de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), lo que permite la comparación entre regiones y países (IPCC, 2018; MINAE, 2021). La fórmula que utiliza el IMN requiere de datos que son fáciles de adquirir, confiables y no es necesario que la persona usuaria sea experta con el manejo de bases de datos.

En contraposición con el MOVES, el método aplicado por el IMN no permite desagregar la emisión de GEI por tipo de vehículo u otro parámetro de circulación, lo cual limita el tipo de comparaciones que se pueden realizar. Para una mejor eficiencia de MOVES se recomienda realizar esfuerzos para tener mayor disponibilidad de datos de nivel *Tier 3*. Sin embargo, esto implica una inversión económica alta y un trabajo interinstitucional más eficiente, por lo que la relación costo/beneficio probablemente sea baja.

En conclusión, ambas metodologías presentan aproximaciones complementarias al estudio de las emisiones de GEI para fuentes vehiculares móviles. Por un lado, MOVES permite un análisis más detallado con respecto a los factores de emisión e identifica como influyen los parámetros del parque vehicular y de conducción, en el valor de las emisiones. Mientras que el método del IMN, aunque más simple, permite comparaciones históricas e intersectoriales (IPCC, 2018; IMN, 2014; Bai et al, 2009; Vicuña, 2014). La aplicación del software MOVES, para el contexto costarricense, es posible, sin embargo, es necesario una labor previa de generación de información con mayor nivel de detalle y la estandarización de bases de datos. Estos esfuerzos contribuirían a mejorar la métrica de emisiones del sector transporte terrestre del país. Adicionalmente la utilización de este software permitirá dar seguimiento, evaluar y proponer escenarios para considerar propuestas de mitigación basadas en modelos.

El MOVES también genera un aporte a los esfuerzos de transparencia y mejora continua de los INGEI, así como otros esfuerzos país asociados a la mitigación y adaptación al cambio climático, como lo son el Programa País para la Carbono Neutralidad, el Plan Nacional de Descarbonización y la Política Nacional de Adaptación (MINAE, 2021).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía (DCC-MINAE), por el apoyo ante las instituciones públicas para la solicitud de la información requerida para la aplicación de MOVES. Se contó con el apoyo de las siguientes instituciones relacionadas al sector transporte: Dirección Sectorial de Energía, Instituto Meteorológico Nacional, Refinadora Costarricense de Petróleo, Instituto Costarricense de Electricidad, Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Ministerio de Ambiente y Energía, Instituto Nacional de Seguros y la Autoridad Reguladora de los Servicios Públicos, así también como a la empresa nacional Riteve SyC.

Además, se agradece la colaboración del Colaboratorio Nacional de Computación Avanzada del Centro Nacional de Alta Tecnología (CNCA-CeNAT) en la asesoría en la aplicación del modelo MOVES y la utilización de su clúster para la corrida de este. Este trabajo tuvo el apoyo del Fondo Especial para la Educación Superior Pública (FEES) y de las Beca CENAT de la cual la autora fue becaria.

Este trabajo es parte de los requisitos de graduación del programa de Maestría Académica en Manejo de Recursos Naturales de la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica.

ÉTICA, CONFLICTO DE INTERESES Y DECLARACIÓN DE FINANCIAMIENTO

Declaro haber cumplido con todos los requisitos éticos y legales pertinentes, tanto durante el estudio como en la preparación de este documento; que no hay conflictos de interés de ningún tipo, y que todas las fuentes financieras se detallan plena y claramente en la sección de agradecimientos. Asimismo, estoy de acuerdo con la versión editada final de esta publicación. El respectivo documento legal firmado se encuentra en los archivos de la revista.

La declaración de contribución de cada autor es la siguiente: P.P.V.: Diseño del estudio, recopilación, análisis de datos, preparación y aprobación final del manuscrito.

REFERENCIAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá. (2009). *Elementos técnicos del plan decenal de decontaminación de Bogotá*.
- Al-Ghandour, M., & Branch Manager, A. (n.d.). *Analysis of Fuel Consumption and Emissions at Roundabout with Slip Lane, Using SIDRA and Validation by MOVES Simulation*.
- Bai, S., Eisinger, D., & Niemeier, D. (2009). MOVES vs. EMFAC: A Comparison of Greenhouse Gas Emissions Using Los Angeles County. *TRB 2009 Annual Meeting*, 18. <https://www.researchgate.net/publication/228646270>
- Cremades, L. v, & Rincón, G. (2011). Valoración cualitativa de la calidad de un inventario de emisiones industriales para el modelado de dispersión de contaminantes en la costa nororiental de Venezuela. *Interciencia*, 36(2), 128–134.
- Edelenbosch, O. Y., McCollum, D. L., van Vuuren, D. P., Bertram, C., Carrara, S., Daly, H., Fujimori, S., Kitous, A., Kyle, P., Ó Broin, E., Karkatsoulis, P., & Sano, F. (2017). Decomposing passenger transport futures: Comparing results of global integrated assessment models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.003>
- Hooftman, N., Messagie, M., van Mierlo, J., & Coosemans, T. (2018). A review of the European passenger car regulations – Real driving emissions vs local air quality. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 86, pp. 1–21). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.01.012>
- Instituto Meteorológico Nacional. (2021). *Factores de emisión de gases de efecto invernadero*. <http://cglobal.imn.ac.cr/index.php/publications/factores-de-emision-gei-decima-edicion-2021/>
- Instituto Nacional de Seguros. (2015). *Registro de marchamo 1984- 2015*.
- IPCC. (2006). Chapter 3: Mobile Combustion. In *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories* (Vol. 2, pp. 1–78).
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014 Mitigación del cambio climático Resumen para responsables de políticas*. www.ipcc.ch,
- IPCC. (2018). Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of

- strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. In V. Masson-Delmotte & P. Zhai (Eds.), *Global Warming of 1.5°C*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>
- Liu, H., Wei, H., & Yao, Z. (2014). Validating MOVES PM2.5 Emission Factor Empirically by Considering Accumulative Emission Effect. *14th COTA International Conference of Transportation Professionals*, 3017–3028.
- Loría Salazar, L. G. (2014). *Vigesimoprimer informe estado de la nación en desarrollo humano sostenible (2014). Informe Final. Implicaciones en infraestructura y transporte*.
- Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2015). *Anuario estadístico del sector transporte e infraestructura 2014*. <http://repositorio.mopt.go.cr:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/164/388.1-1.2014.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ministerio del Ambiente y Energía. (2019). *Costa Rica 2019: Inventario Nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono 2015*.
- Ministerio del Ambiente y Energía. (2021). *Costa Rica 2021: Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Refinadora Costarricense de Petróleo. (2017). *Ventas de productos*. <https://datosabiertos.recope.go.cr/conjunto/ventas>
- Reynolds, A. W., & Broderick, B. M. (2000). Development of an emissions inventory model for mobile sources. *Transportation Research Part D 5, D5*, 77–101. www.elsevier.com/locate/trd
- Riteve SyC. (2018). *Promedio de kilometros recorridos 2018*.
- Rodríguez-Yáñez, J. E. (2018). Estimación cualitativa de la incertidumbre para el inventario de contaminantes tóxicos del aire del gran área metropolitana en el 2007. *Repertorio Científico*, 21(2), 15–22.
- Schipper, L., Deakin, E., & McAndrews, C. (2011). *Carbon Dioxide Emissions from Urban Road Transport in Latin America: CO₂ Reduction as a Co-Benefit of Transport Strategies* (pp. 111–127). https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7643-7_8
- Secretaría de Planificación del Subsector Energía. (2018). *Balance Energético Nacional 2014*. <http://www.sinamecc.go.cr/datos-abiertos/bne>
- Steinvoth Álvarez, A. (2016). Mejoras en la calidad de aire mediante la reducción de emisiones vehiculares de carbono negro en Costa Rica. *Éxito Empresarial*, 303, 1–4.
- Tolvett, S., Osses, M., & Lents, J. M. (2009). *Análisis de emisiones en ruta de vehículos diésel en Ciudad de México, Santiago y São Paulo* (E. Behrentz, Ed.; pp. 177–181). Universidad de Los Andes.
- United States Environment Protection Agency. (2012). *Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES): User Guide Version, MOVES2010b*.
- Vicuña, S. (2014). *Inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero: Un análisis para Chile, El Salvador, México y el Uruguay*.
- von Stechow, C., McCollum, D., Riahi, K., Minx, J. C., Kriegler, E., van Vuuren, D. P., Jewell, J., Robledo-Abad, C., Hertwich, E., Tavoni, M., Mirasgedis, S., Lah, O., Roy, J., Mulugetta, Y., Dubash, N. K., Bollen, J., Ürgen-Vorsatz, D., & Edenhofer, O. (2015). Integrating Global Climate Change Mitigation Goals with Other Sustainability Objectives: A Synthesis. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 363–394. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-021113-095626>
- World Economic Forum. (2022). *The Global Risks Report 2022 17th Edition*.
- Zhang, K., Lei, Y., & Guofang, L. I. (2013). *Factors affecting vehicular emissions and emission model*.
- Zhang, T. C., & Surampalli, R. Y. (n.d.). *Impact of Greenhouse Gas Emissions and Climate Change*.
- Zhao, J., Yun, M., Chen, Z., & Mo, H. (2014). *The method for determining vehicle's fuel consumption and exhaust emissions under different traffic conditions*.

ANEXOS

TABLA 1

Clasificaciones vehiculares del MOVES y el INS

Clasificación MOVES	Tipos incluidos según clasificación INS
Motocicletas (<i>Motorcycle</i>)	Motocicletas
Automóviles (<i>Passenger Car</i>)	Automóviles y Taxis
Carga Liviana (<i>Light Commercial Truck</i>)	Carga liviana
Autobuses (<i>Transit Bus</i>) *	Autobuses
Camiones (<i>Single Unit Short-haul Truck</i>)	Camiones, carga pesada, equipo especial

*Solamente se incluyen buses de recorrido corto.

TABLA 2

Propiedades fisicoquímicas de los combustibles utilizados en MOVES (RECOPE, 2017) con valores ajustados por Rodríguez- Yáñez

Propiedad fisicoquímica	Gasolina Regular 91	Gasolina Plus 95	Diésel
Identificación del combustible	1	1	2
Sub-Tipo de combustible	10	10	20
Presión de vapor Reid en psi	9,3912	9,4275	NA
Contenido de azufre en ppm	15,46	11,15	6,28
Volumen de etanol (% vol)	0	0	NA
Volumen de MTBE (% vol)	0,32	0,66	NA
Contenido de aromáticos (% peso)	22,2	26,5	27,04 (*)
Contenido de olefinas (% peso)	15,41	16,82	NA
Contenido de benceno (% peso)	1,12	1,03	NA
Porcentaje de volátiles a baja temperatura, 200 °F (%)	42	48	NA
Porcentaje de volátiles a alta temperatura, 300 °F (%)	79	81	NA
Constante asociada al tipo de oxígeno en el combustible	0,35	0,12	NA
Volumen de ésteres en el BioDiésel (%)	NA	NA	NA
Temperatura donde el 50 % del combustible es vapor (°F)	204,06	219,22	509,00
Temperatura donde el 90 % del combustible es vapor (°F)	334,78	335,80	618,91

(*) Se reporta para diésel aromáticos totales (27,04 %) y poli aromáticos (0,83 %)

TABLA 3

Tipos de rutas utilizadas en el MOVES y su clasificación según el MOPT (MOPT, 2015)

Indicación en MOVES	Clasificación del MOPT	km de ruta
Ruta rural sin restricción <i>(Rural Unrestricted Access)</i>	Ruta Terciaria	2 827
Ruta urbana sin restricción <i>(Urban Unrestricted Access)</i>	Ruta Primaria y Secundaria	4 688

Nota: Al considerar el cálculo de los GEI el modelo considera también las emisiones en el proceso de arranque fuera de ruta.

TABLA 4

Promedio de kilómetros recorridos en el año 2018 (Riteve SyC, 2018)

Tipo de vehículo	Gasolina	Diésel
Automoviles	14 798	14 502
Carga liviana (< 3500 kg)	15 872	18 299
Motocicletas	7 327	
Taxis	47 049	51 449
Carga Pesada (camiones)		32 599
Cabezales		44 494
Transporte de estudiantes		25 847
Transporte público de ruta		65 460
Transporte de turismo		45 876
Transporte servicios especiales		44 321
Transporte productos peligrosos		36 400
Otros	11 607	18 052
Promedio de combustible	14 655	22 145

TABLA 5

Ventajas y desventajas de las dos metodologías de estimación de GEI.

Metodología	Ventajas	Desventajas
MOVES	<ol style="list-style-type: none"> 1. Permite caracterizar la emisión de GEI. 2. Genera factores de emisión específicos para el sistema de estudio. 3. Permite identificar el impacto de la aplicación de políticas públicas, tránsito, tecnología de motores en las emisiones de GEI. 4. Es aplicable a diferentes escalas (país, municipio, proyecto). 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Requiere personal capacitado en manejo de base de datos. 2. Es necesario ajustar algunos parámetros (p.ej., características del parque vehicular) al contexto fuera de los EE. UU. 3. Limitado a sistemas que tengan disponibilidad de datos de la mayoría de los parámetros.
IMN	<ol style="list-style-type: none"> 1. Amplio registro histórico, lo que facilita estudios comparativos temporales, entre sectores y entre países. 2. Es fácil de entender debido a que requiere de pocos parámetros para su implementación. 3. Fácil de aplicar y los datos son accesibles. 4. Metodología conocida por expertos y personal no especializado. 5. No requiere de conocimiento previo en manejo de bases de datos 	<ol style="list-style-type: none"> 1. No permite caracterizar la emisión de GEI. 2. Utiliza factores de emisión globales o nacionales, mas no específicos por categoría vehicular. 3. La exactitud del cálculo de emisión de GEI tiene espacio para mejora.

TABLA 6

Resumen de velocidades promedio según categoría vehicular y tipo de carreteras para el año 2014. Datos adaptados según la categorización de MOVES (MOPT, 2015).

Clasificación MOVES	Velocidad promedio (km/h)	
	Carretera rural sin restricciones	Carretera urbana sin restricciones
Motocicleta	56,61	95,56
Automóviles	66,63	90,56
Carga liviana	72,53	84,87
Autobuses	52,76	77,39
Camiones	41,96	85,95

Carta de recepción de la revista científica



Martes 09 de agosto del 2022

10-2022

A QUIEN INTERESE

Nos complace informarle que hemos recibido el manuscrito: *“Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para vehículos en Costa Rica en el año 2014”* por Priscila Picado Valenzuela y Javier Rodríguez Yáñez, con el fin de ser valorado para su posible publicación en la revista UNED Research Journal.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "J. Monge-Nájera", written over a horizontal line.

J. Monge-Nájera

Editor

Tel (506) 25272000 cuadernosuned@gmail.com
<http://investiga.uned.ac.cr/revistas/index.php/cuadernos>
Universidad Estatal a Distancia Apdo. 474-2050 San José, Costa Rica