

GUESS: UN JUEGO DE SIMULACIÓN DE EMISIONES EN TRANSPORTE URBANO

Jacques Polette¹, Juan de Dios Ortúzar^{1,2,3*}, Luis Ignacio Rizzi^{1,2}.

¹ Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile

² Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería (ISCI), Chile

³ BRT+ Centre of Excellence, Chile

*Autor para
correspondencia:
jos@uc.cl

RESUMEN

GUESS es un modelo de simulación, sencillo y flexible, que fue diseñado como un juego con fines educativos, que permite pronosticar las emisiones de CO, NO_x y PM_{2.5} provenientes de automóviles, taxis, buses y camiones en una ciudad, bajo distintos escenarios. Para determinar los perfiles de emisión, el modelo considera tres elementos principales. Primero, la tasa de crecimiento de la flota, mediante modelos Gompertz y de series temporales. Segundo, la tasa de renovación de la flota mediante una distribución de supervivencia a partir de la cual se deriva un modelo de stock-flujo. Tercero, los perfiles de emisión a lo largo del tiempo, en función de los patrones de uso de cada tipo de vehículo y datos tecnológicos sobre la composición de la flota. GUESS permite que los jugadores establezcan múltiples escenarios de análisis, alterando factores clave de la flota, como su crecimiento, tasas de renovación, niveles de actividad y fecha de introducción de normas de emisión más exigentes. De esta forma, los jugadores pueden explorar cómo reaccionan los perfiles de emisión a diferentes entradas, mostrando, por ejemplo, que las mejoras tecnológicas pueden permitir superar los efectos del crecimiento en los niveles de actividad de la flota.

Palabras clave Emisiones urbanas, juego de simulación, modelo Gompertz, distribución de supervivencia, modelo stock-flujo

ABSTRACT

GUESS is a simple and flexible simulation model designed as an educational game that allows forecasting CO, NO_x, and PM_{2.5} emissions from cars, taxis, buses, and trucks in a city under different scenarios. To determine emission profiles, the model considers three main elements. First, the fleet growth rate, using Gompertz and time-series models. Second, the fleet turnover rate using a survival distribution that allows a stock-flow model to be derived. Third, emission profiles over time are based on usage patterns for each type of vehicle and technological data about the fleet's composition. GUESS allows players to set multiple analysis scenarios by altering key fleet factors such as growth, turnover rates, activity levels, and the date of introduction of more stringent emission standards. Thus, players can explore how emission profiles react to different inputs, showing, for example, that technological improvements may overcome the effects of growth in fleet activity levels.

Keywords Urban emissions, Simulation game, Gompertz model, Survival distribution, Stock-flow model

1. INTRODUCCIÓN

La generación de contaminantes será con seguridad uno de los problemas más importantes del siglo XXI. La emisión de gases de efecto invernadero (GEI) es un elemento clave del calentamiento global y el cambio climático (Norby y Luo, 2004, EPA, 2020), y su control se convertirá en un desafío importante. La generación de contaminantes tiene diversas fuentes, tales como procesos industriales, agrícolas, etc., pero el sector transporte es reconocido como una de las fuentes más significativas. De hecho, contribuyó globalmente con cerca del 14% de la generación de GEI en 2010 (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014) y había aumentado a más del 20% de las emisiones de CO₂ en 2016 (World Bank, 2017); además, en 2020, el sector transporte contribuyó con el 27% de todos los GEI en los Estados Unidos (EPA, 2020). Cabe destacar que la situación en Chile es prácticamente idéntica, ya que el aporte del sector a los GEI fue de 24,7% en 2020 (Ministerio del Medio Ambiente, 2022). Así, a medida que la población y el consumo aumenten, podría suceder que la demanda por transporte de pasajeros y mercancías siga creciendo en el tiempo, convirtiendo la predicción de perfiles de emisión en una tarea muy importante.

Reconociendo que las emisiones son un problema clave y que existen múltiples acciones que pueden ayudar a reducirlas, este artículo presenta una herramienta de simulación llamada GUESS (*Game on Urban Emissions Simulation for Santiago*), que permite estimar las emisiones de transporte a lo largo de un período prolongado (más de 20 años). El modelo se inspiró en una versión simple pero muy flexible (denominado REMIT), que fue desarrollado en la University of Cardiff, Reino Unido (Williams, 2016). La idea fue crear un modelo más realista que REMIT, pero que mantuviera la simplicidad y flexibilidad como elementos fundamentales. GUESS permite a sus usuarios entender y experimentar con la dependencia entre las emisiones y una serie de variables clave del transporte como la tasa de renovación de los vehículos y las distancias promedio recorridas anualmente por éstos, entre otras.

Aunque el juego fue desarrollado utilizando datos para Santiago de Chile (INE, 2016a, 2016b), puede adaptarse fácilmente para pronosticar las emisiones de cualquier flota de vehículos si se dispone de información adecuada. El resto del artículo está organizado de la siguiente manera. En primer lugar, se describe cómo GUESS genera perfiles de emisión, proporcionando una idea general sobre los diversos submodelos que lo definen. Luego, se discute cómo los usuarios pueden interactuar con GUESS y qué tipo de salidas gráficas y numéricas se pueden obtener. Finalmente, se analizan algunas de las ventajas y desventajas del modelo.

2. GUESS: UN MODELO DE SIMULACIÓN DE TRES PASOS

Los perfiles de emisión de transporte para una ciudad, región o incluso a nivel nacional, dependen de diversos factores, como: (i) la tasa de crecimiento de la flota de vehículos (g); (ii) su tasa de renovación (r); (iii) su composición tecnológica en términos de las normativas EURO (θ) y (iv) sus niveles de actividad (ϕ). La relación entre estos factores ha sido analizada en diversas investigaciones previas (ver por ejemplo, Lee y Williams, 2008; Fridstrom y Otsli, 2016; 2022).

2.1. Proyecciones del Parque Vehicular

Dado que las emisiones están relacionadas con el parque vehicular, la primera etapa del modelo consiste en proyectar la flota a lo largo de un período de tiempo (por ejemplo, 20 años) y determinar su tasa de crecimiento (g). Por ejemplo, se supone que el parque de Vehículos Privados Ligeros (VPL) crece en función del ingreso, mientras que el de Buses, Camiones y Taxis (BCT) depende tanto de variaciones demográficas y económicas, como de políticas gubernamentales a lo largo del tiempo.

En particular, el crecimiento del parque VPL en GUESS sigue un modelo de tasa de motorización basado en una función Gompertz (ver Figura 1), que es muy recomendable por su flexibilidad y porque puede estimarse mediante mínimos cuadrados ordinarios (Dargay et al., 2007). La función Gompertz se define comúnmente como en la ecuación (1):

$$y = y_0 e^{\alpha e^{\beta x}} \quad (1)$$

donde, y representa la tasa de motorización modelada (en vehículos/1.000 habitantes), y_0 es su nivel de saturación, x un indicador económico, como el producto interno bruto per cápita (PIB), β el parámetro a estimar relacionado con el indicador económico, y α es el desplazamiento en el eje- x ; la evidencia muestra que la tasa de motorización está altamente relacionada con el nivel de crecimiento económico (Wu et al., 2014).

Por otro lado, el parque de BCT se estima en base a modelos de series temporales. Estudios previos han demostrado que el parque correspondiente a modos de transporte público (buses y taxis) está más relacionado con variables demográficas, mientras que el parque de camiones está más relacionado con índices económicos (Polette, 2017).

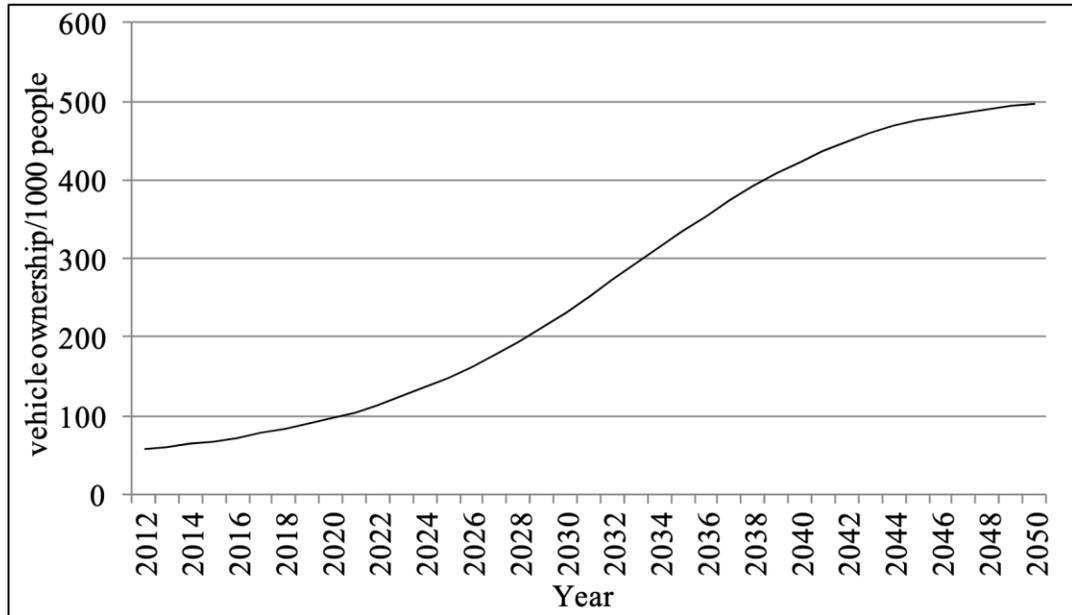
2.2. Modelo Stock-Flujo

Para determinar la tasa de renovación de la flota (r), GUESS utiliza un modelo de cohorte del tipo stock-flujo*. Este permite que las probabilidades de desguace varíen a lo largo de la vida del vehículo. Dado que en esta etapa se ha proyectado el parque vehicular, el modelo stock-flujo garantiza la consistencia entre el desguace de vehículos antiguos y la entrada de vehículos nuevos en cualquier momento de la simulación.

El modelo stock-flujo depende de una distribución de supervivencia. Esta garantiza que los vehículos más antiguos sean desechados y reemplazados por otros nuevos. La distribución de supervivencia utilizada en GUESS se basa en una función Gompertz inversa (EPA, 2006), como se muestra en la Figura 2. Cada tipo de vehículo (VPL o BCT) sigue su propia curva de ajuste, ya que, por ejemplo, los VPL pueden tener probabilidades de desguace diferentes a los BCT. Las tasas de desguace se modelan como en la ecuación (2), donde α y β se determinan utilizando datos detallados sobre la composición de edad de la flota y t es el año de la simulación.

$$S(t) = \exp(-\exp(\alpha + \beta * t)) \quad (2)$$

* https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_Stock-Flujo



Fuente: Wu et al. (2014)

Figura 1 Ejemplo de Función Gompertz

Un aspecto importante de las funciones de distribución de supervivencia es que permiten la existencia de vehículos bastante antiguos, tal como sucede en las ciudades reales. Así, cada año de la simulación, GUESS clasifica cada vehículo en una categoría tecnológica (k) correspondiente a la norma EURO de emisiones que sea relevante. Este último elemento es crucial, ya que las normas EURO determinan las emisiones por kilómetro de cada vehículo.

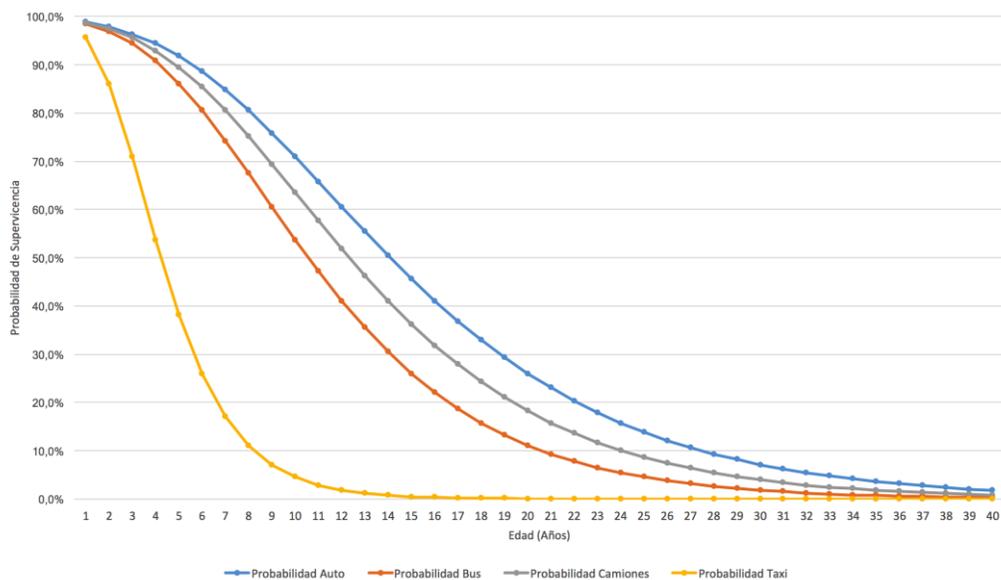


Figura 2 Curvas de Distribución de Supervivencia

Si $\delta_{k,T-1}$ es la probabilidad de supervivencia de un vehículo de tipo j , norma EURO k y antigüedad T-1, la ecuación (3) puede utilizarse para determinar la evolución de su parque a lo largo del tiempo:

$$Stock_{j,k,T,t} = Stock_{j,k,T-1,t} * \delta_{j,T-1} \quad (3)$$

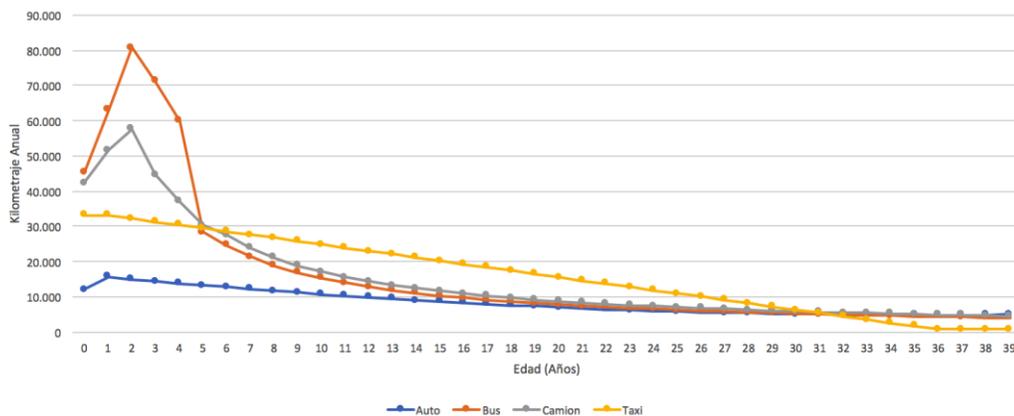
En cada año de la simulación, los autos antiguos serán desechados y nuevos vehículos ingresarán a la flota para reemplazarlos y completar el stock total determinado por las proyecciones. Dado que el modelo stock-flujo debe garantizar la consistencia con las proyecciones de la flota, el stock de nuevos vehículos del tipo j que ingresa a la flota se determina mediante la ecuación (4), donde k^* representa la Norma de Emisiones EURO vigente en ese período.

$$Stock_{j,k^*,0,t} = TotalStock_{j,T-1,t} - \sum_T Stock_{j,k,T,t} \quad (4)$$

2.3. Niveles de Actividad del Vehículo

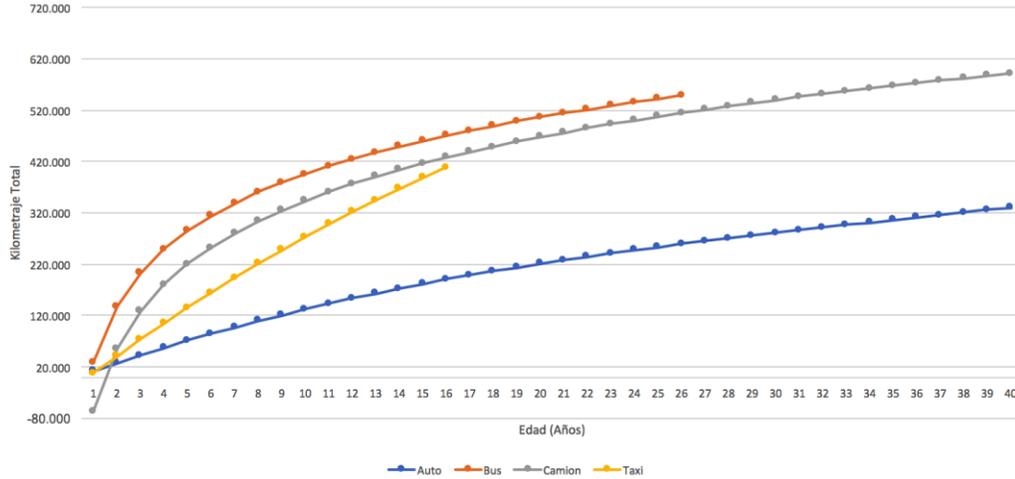
La cantidad y magnitud de contaminantes emitidos a la atmósfera por una flota de vehículos depende de sus niveles de actividad (en el límite, no se generarán emisiones de transporte si la flota no circula). GUESS determina los perfiles de emisión siguiendo una heurística utilizada en varios estudios (FHWA, 2002), la que consiste en multiplicar los niveles de actividad (expresados como kilómetros recorridos por vehículo, VKR) por su correspondiente factor de emisión (FE). En particular, GUESS utiliza el FE de nivel 2[†] de las ampliamente utilizadas pautas de la EEA (2019), debido a que sólo contábamos con información de los kilómetros recorridos.

GUESS también considera el hecho que los vehículos más antiguos recorren menos kilómetros por año que los más nuevos, como lo demuestra el análisis de datos provenientes de las plantas de revisión técnica, que contienen variables como la fecha de fabricación y la información del odómetro; con esto es posible modelar las distancias anuales conducidas en una ciudad como Santiago para VPL y BCT. La Figura 3 muestra la evolución de las distancias anuales y acumuladas por tipo de vehículo.



(a) Kilometraje anual en función de la edad del vehículo

[†] Los valores de los FE de nivel 2 se promedian a partir de los FE de nivel 3, que consideran información más detallada, como las variaciones de velocidad de la flota de vehículos (EEA, 2019).



(b) Kilometraje acumulado en función de la edad del vehículo

Figura 3 Distancias Anuales y Acumuladas por Tipo de Vehículo

GUESS luego determina los niveles de actividad de la flota, VKR (kilómetros por vehículo), para cualquier tipo de vehículo j , norma EURO k , y antigüedad T en el período t , utilizando la ecuación (5):

$$VKR_{j,k,T,t} = Stock_{j,k,T,t} * DistanciaAnual_{j,T} \quad \forall j, k, T, t \quad (5)$$

y también calcula los niveles de actividad correspondientes a una determinada norma de emisiones EURO, siguiendo la ecuación (6):

$$VKR_{j,k,t} = \sum_T Stock_{j,k,T,t} * DistanciaAnual_{j,T} \quad \forall T \text{ en período válido de EURO } k \quad (6)$$

Una vez que se determinan los niveles de actividad, la ecuación (7) permite calcular las emisiones (EM) de un determinado contaminante p .

$$EM_{j,k,t}^p = VKR_{j,k,t} * FE_{j,k}^p \quad \forall j, k, T, t \quad (7)$$

Con todo lo anterior, GUESS estima perfiles de emisión para cada tipo de vehículo, norma de emisión EURO e , incluso, tipo de combustible (las normas de emisión EURO dependen del tipo de combustible).

3. INTERFAZ DE USUARIO DE GUESS Y PRINCIPALES INTERACCIONES

GUESS se diseñó con el objetivo de ser, principalmente, una herramienta educativa para una amplia variedad de estudiantes, entre ellos, ingenieros. Para cumplir con este objetivo, se desarrolló una interfaz que permite a los jugadores manipular varios parámetros de los modelos mencionados en la sección anterior (el juego puede ser solicitado a los autores de este documento).

3.1. Interfaz de Usuario

La versión actual del juego está instalada en Excel. Dado que el modelo debe ser fácil de operar, esta plataforma resultó extremadamente flexible y útil. Las Figuras 4 a 8 corresponden a cada una de las etapas mencionadas en la sección anterior, a saber:

- **TOTALES_**: Proyecciones totales de la flota de cada tipo de vehículo, composición del tipo de combustible, y edad promedio de la flota. La Figura 4 muestra la interfaz de usuario de la hoja TOTAL_ para los VPL, incluyendo información sobre cómo se define el modelo Gompertz.
- **INICIAL_**: Composición inicial de la edad de la flota para cada tipo de vehículo, incluyendo la distribución de supervivencia y sus parámetros. La Figura 5 muestra la hoja INICIAL_, donde se pueden ver las distribuciones de edad en el lado derecho.
- **COMP_**: Composición detallada de cada flota de vehículos (Figura 6). Este es un resultado de los parámetros establecidos en las hojas INICIAL y TOTAL. También es posible ver cómo evoluciona el stock de cada categoría tecnológica (norma de emisiones EURO) en el tiempo.
- **DISTANCIAS**: Distancias anuales y totales recorridas por cada tipo de vehículo en función de su edad (Figura 7)
- **EMISIONES_**: Evolución temporal de los perfiles de emisión, para CO, NOx y PM_{2.5}. La Figura 8 muestra cómo se pueden visualizar estos perfiles de emisión

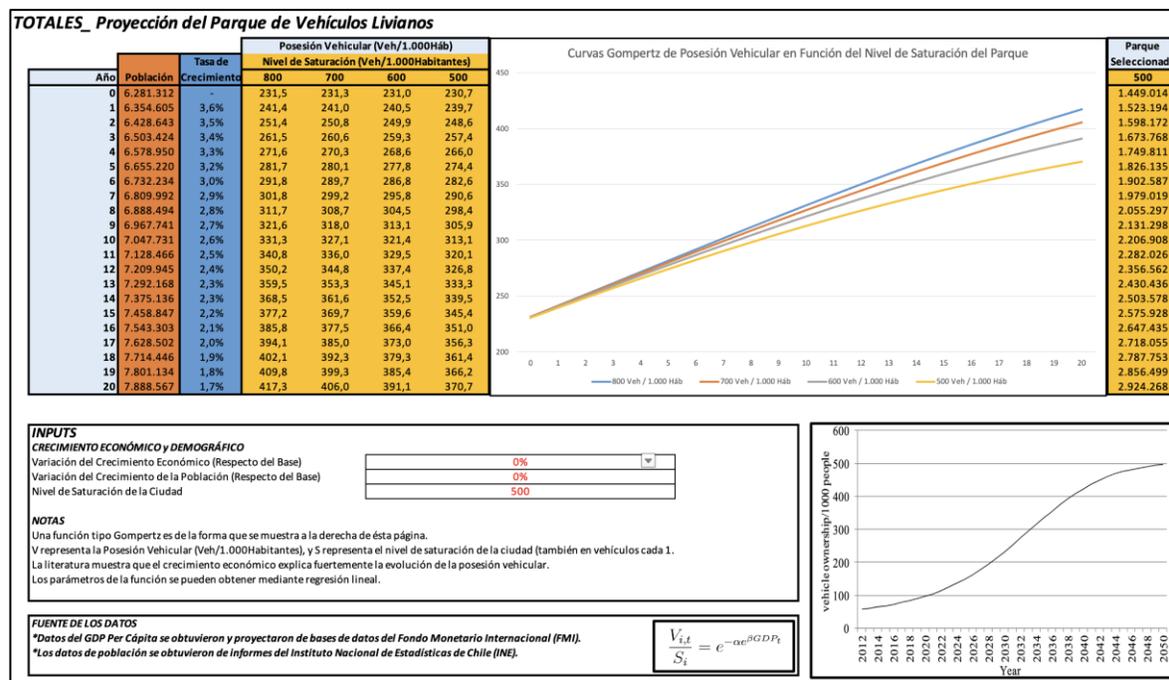


Figura 4 Hoja de Interfaz de Usuario TOTALES_

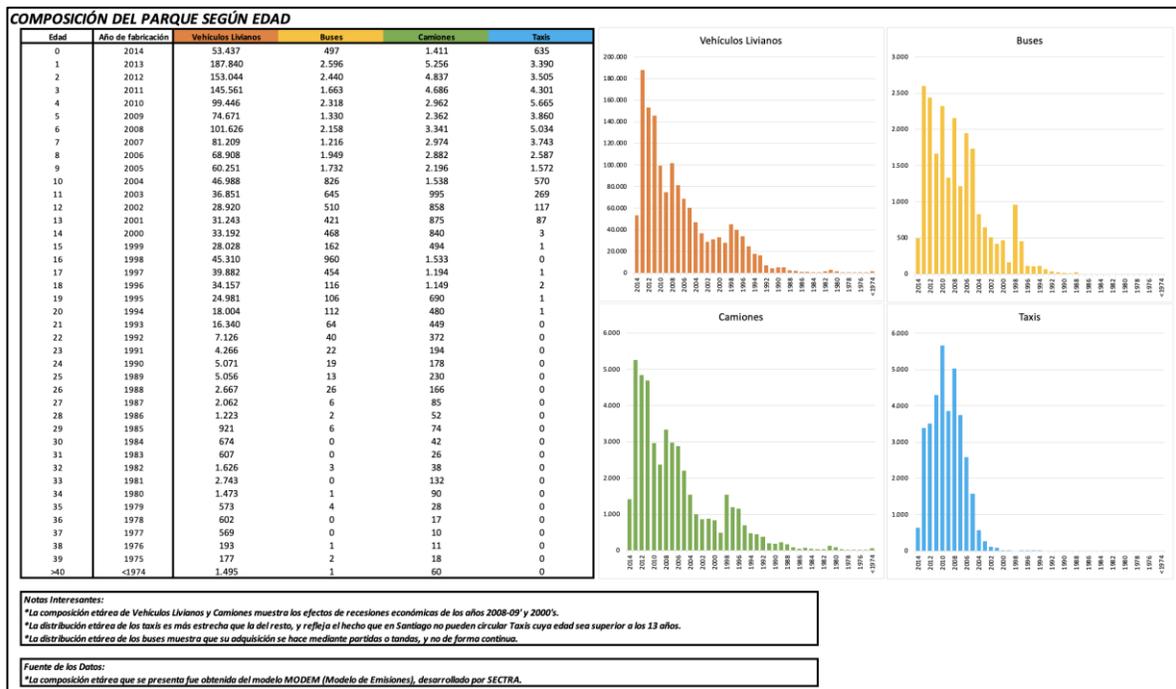


Figura 5 Hoja de Interfaz de Usuario INICIAL_

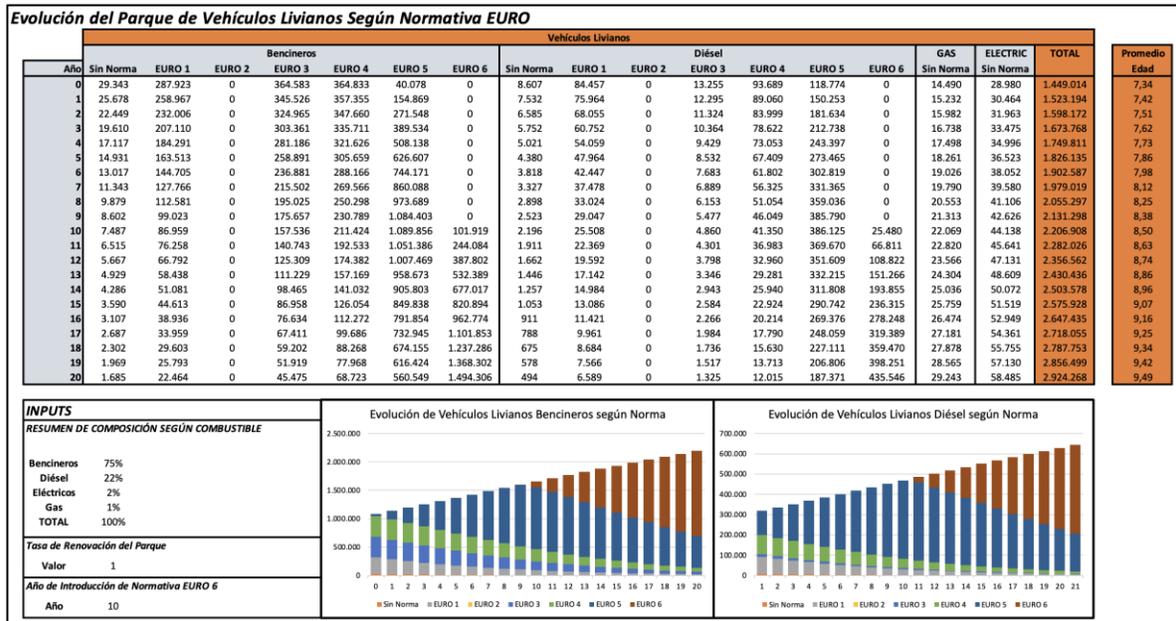


Figura 6 Hoja de Interfaz de Usuario COMP_

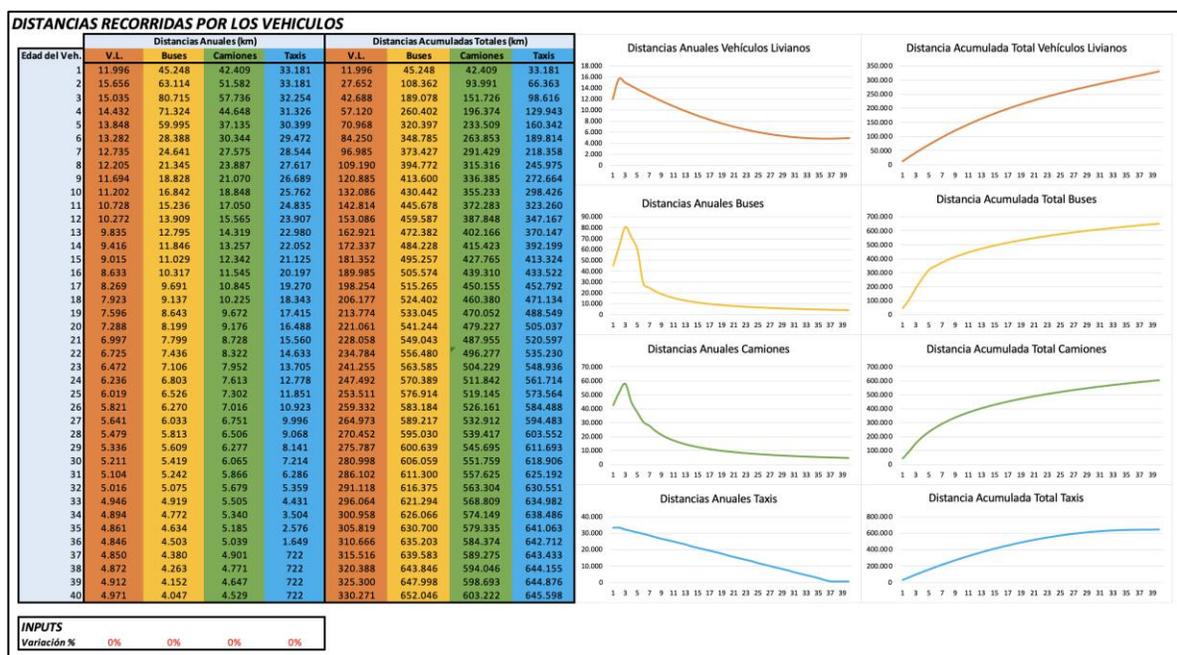


Figura 7 Hoja de Interfaz de Usuario DISTANCIAS_

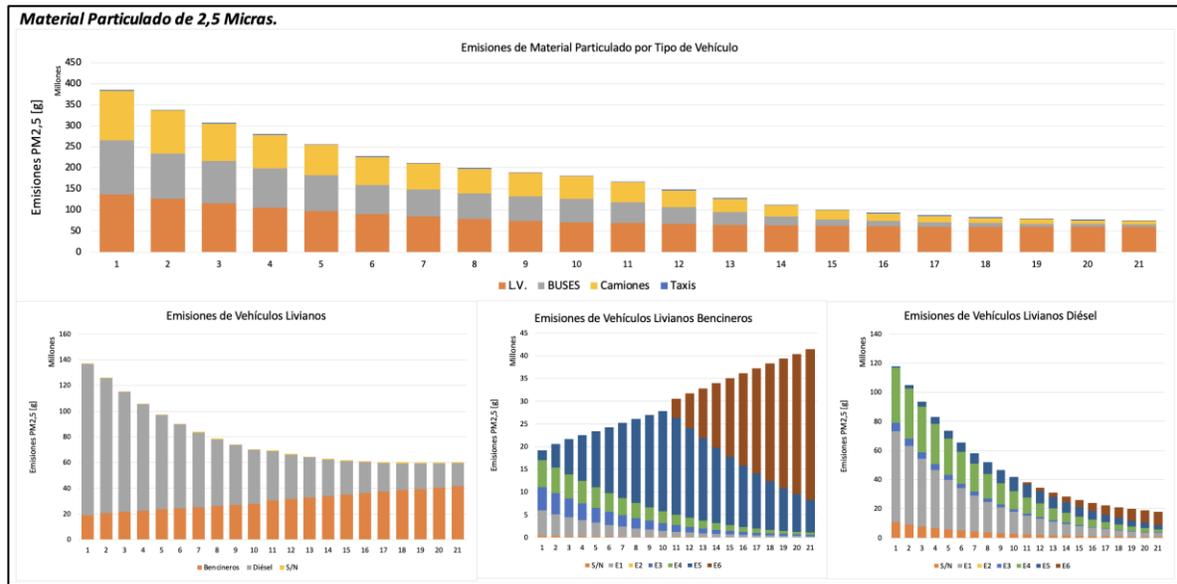


Figura 8 Hoja de Interfaz de Usuario EMISIONES_

3.2. Entradas Modificables por el Usuario

GUESS permite que los usuarios prueben diferentes escenarios al alterar uno o más parámetros en cada submodelo. Los parámetros que se pueden modificar individualmente en cada hoja del modelo se indican a continuación:

-
- **TOTALES_**: La tasa de crecimiento económico (PIB) y el nivel de saturación de la tasa de motorización, que afectan las proyecciones de VPL. La composición del combustible de la flota (gasolina, diésel, eléctrico y gas) también es modificable para VPL y taxis.
 - **INICIAL_**: El parámetro de intensidad de la distribución de supervivencia (β).
 - **COMP_**: Las tasas de renovación de la flota y el año de introducción de la norma de emisiones EURO 6 para cada tipo k de vehículo.
 - **DISTANCIAS**: La tasa a que disminuye la distancia recorrida a medida que los vehículos envejecen.
 - **EMISIONES_**: Los factores de emisión FE.

La modificación de estos parámetros permite probar tres tipos importantes de medidas de política: (i) comportamentales (distancias recorridas); (ii) regulatorias (distancias recorridas y tasas de renovación de la flota) y (iii) tecnológicas (normas de emisiones EURO). Así, los usuarios pueden generar y comparar diversos escenarios para verificar cuál es el más efectivo en términos de emisiones.

4. SALIDAS Y ESCENARIOS

4.1 Salidas del Juego

Las principales salidas de GUESS son los perfiles de emisión y la cantidad de CO, NOx y PM_{2.5} generados durante el período de simulación. Las emisiones se pueden obtener a diferentes niveles de agregación, entre ellos:

- Emisiones totales para cada tipo de vehículo.
- Emisiones de cada Norma de Emisiones EURO, para cada tipo de vehículo
- Emisiones de cada Norma de Emisiones EURO por tipo de combustible
- Emisiones de cada Norma de Emisiones EURO, por tipo de vehículo y combustible.

Como ejemplo, la Figura 9 muestra el perfil de las emisiones de PM_{2.5} a lo largo de la simulación, distinguiendo por tipo de vehículo. Por otro lado, la Figura 10 muestra los perfiles de emisión de PM_{2.5} de la flota de VPL, distinguiendo por tipo de combustible[‡]. Este tipo de salida es normal, ya que las emisiones de PM_{2.5} son considerablemente inferiores para los vehículos a gasolina. Finalmente, la Figura 11 muestra las emisiones de PM_{2.5} tanto para vehículos privados ligeros a gasolina como Diésel, distinguiendo la participación de cada norma de emisiones EURO.

[‡] Notar que el efecto de la FE para PM_{2.5} correspondiente a EURO 6 es más alta que la correspondiente a EURO 5 para VPL a gasolina.

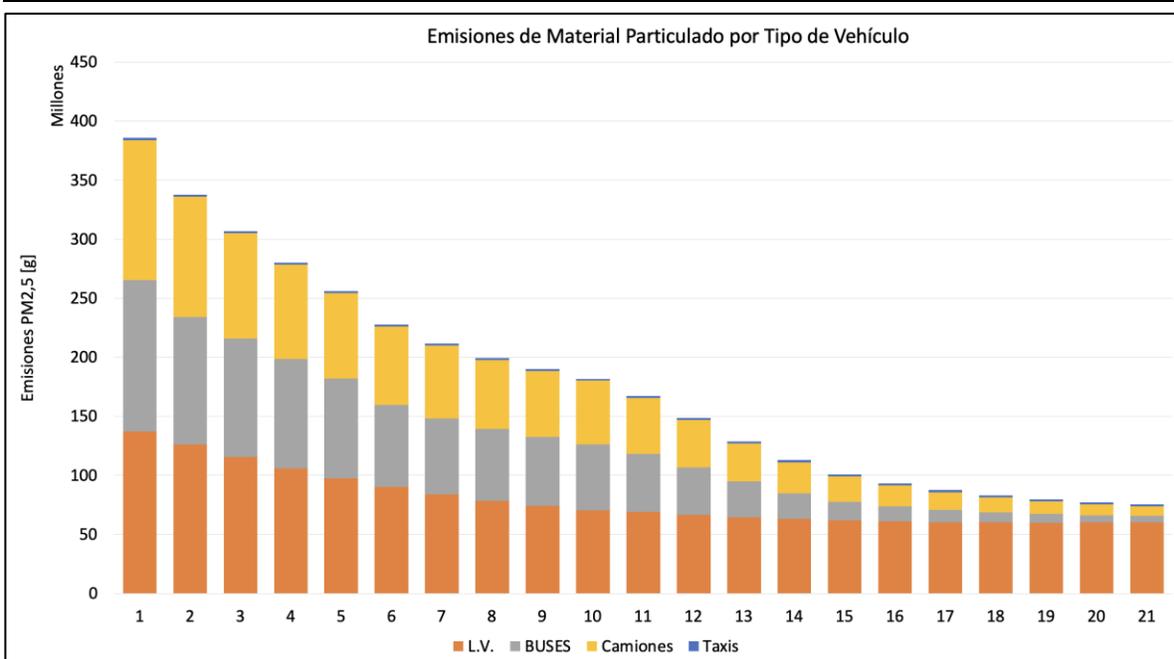


Figura 9 Total de Emisiones de PM_{2.5} por Tipo de Vehículo

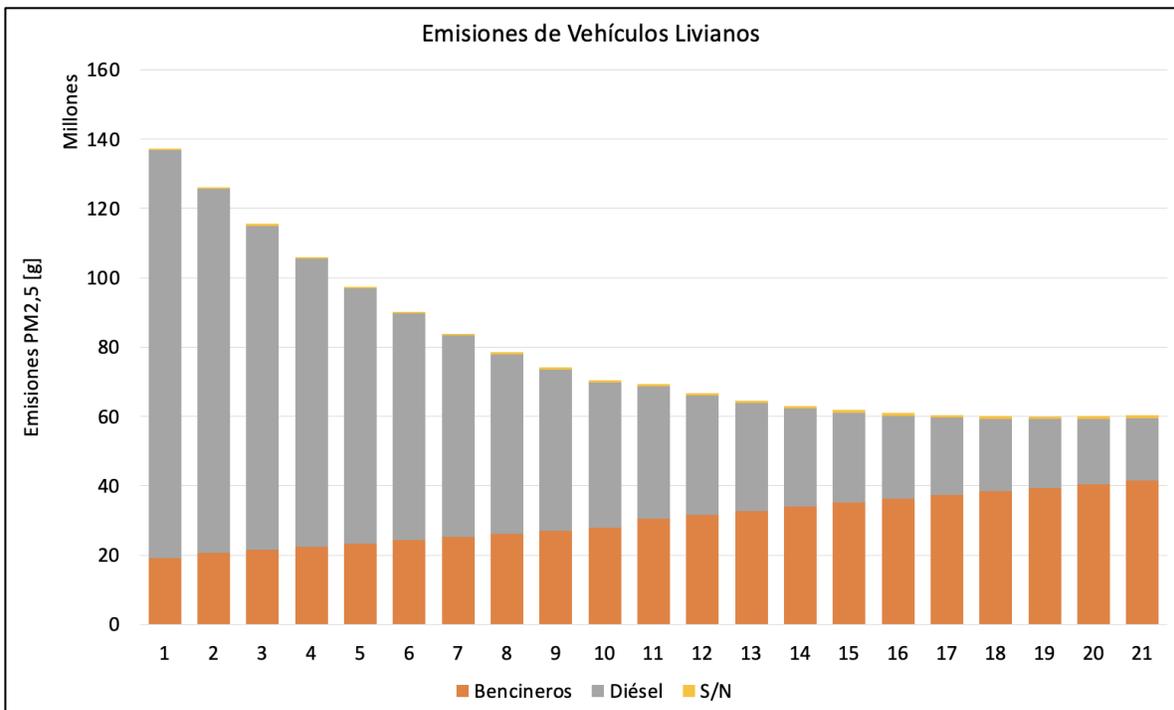


Figura 10 Total de Emisiones de PM_{2.5} para VPL por Tipo de Combustible

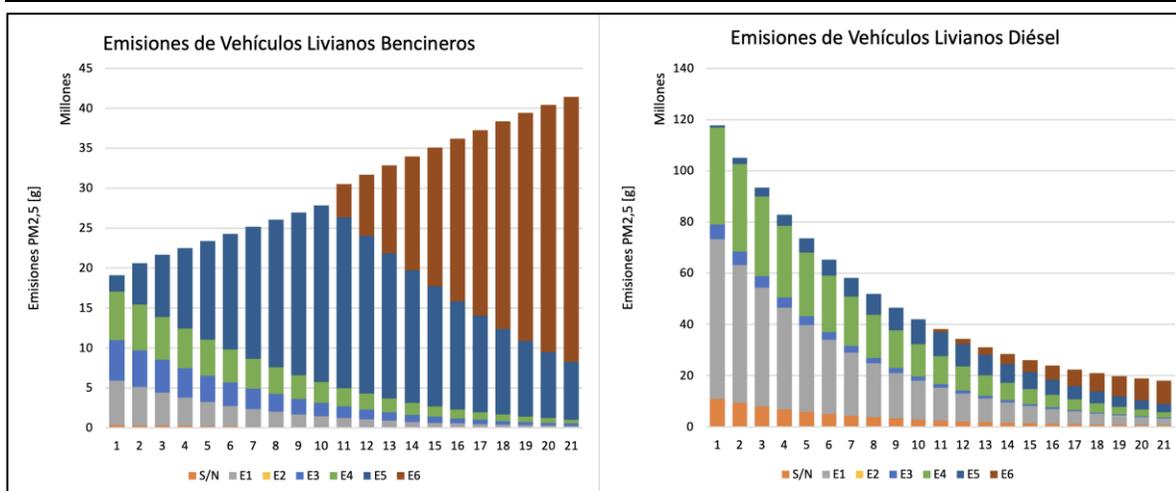


Figura 11 Perfil de Emisiones de PM_{2.5} para VPL por Estándar de Emisión EURO

4.1. Escenarios Hipotéticos

Como se mencionó anteriormente, el juego busca mostrar cómo dependen los perfiles de emisión de factores clave del transporte. Al modificar uno o más parámetros, los jugadores pueden generar varios tipos de escenarios hipotéticos. A continuación, se muestran perfiles de emisión en ciertos escenarios básicos.

Bajas Tasas de Renovación (valor de renovación de VPL establecido en 0): Si la tasa de renovación de la flota disminuye hasta el punto en que casi no se desechan vehículos, solo ingresarán nuevos vehículos a ella debido a su crecimiento natural. En ese caso, las emisiones de PM_{2.5} para VPL a gasolina y Diésel serían como se muestra en la Figura 12.

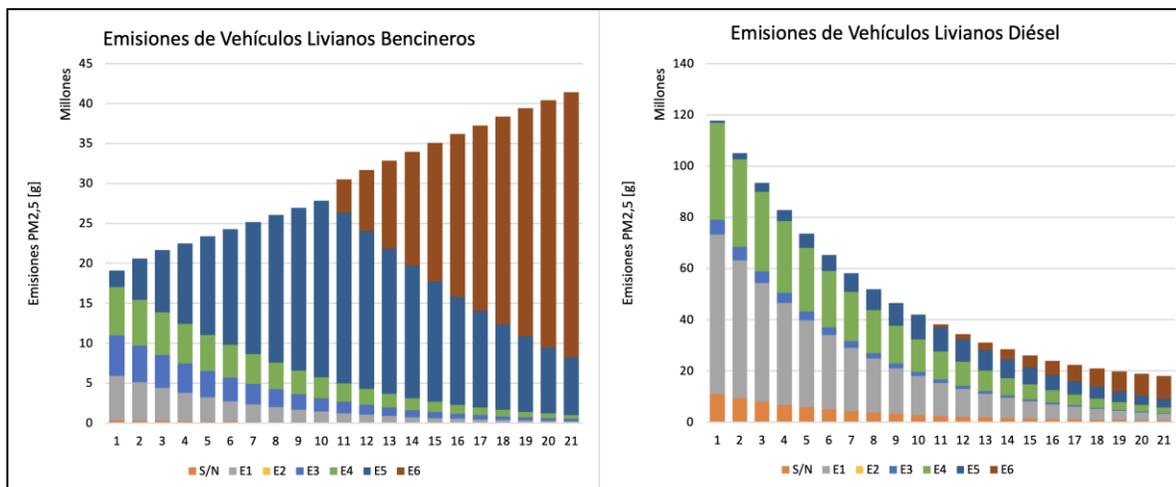


Figura 12 Perfil de Emisiones de PM_{2.5} para VPL a Gasolina y Diésel por Estándar de Emisión EURO para Bajas Tasas de Renovación

Se puede observar que los vehículos con norma EURO más antigua continúan contaminando, a diferencia del escenario base donde las emisiones disminuyen a tasas más altas.

Altas Tasas de Renovación (valor de renovación de VPL establecido en 3): Si la tasa de renovación de la flota aumenta considerablemente, la cantidad de vehículos desechados aumentará a tal punto que las emisiones de vehículos más antiguos deberían desaparecer rápidamente. La Figura 13 muestra las emisiones de PM_{2.5} para VPL a gasolina y Diésel en este tipo de escenario. Como las normas más recientes para VPL Diésel son considerablemente más estrictas que las antiguas, los beneficios de este tipo de escenario son claramente visibles

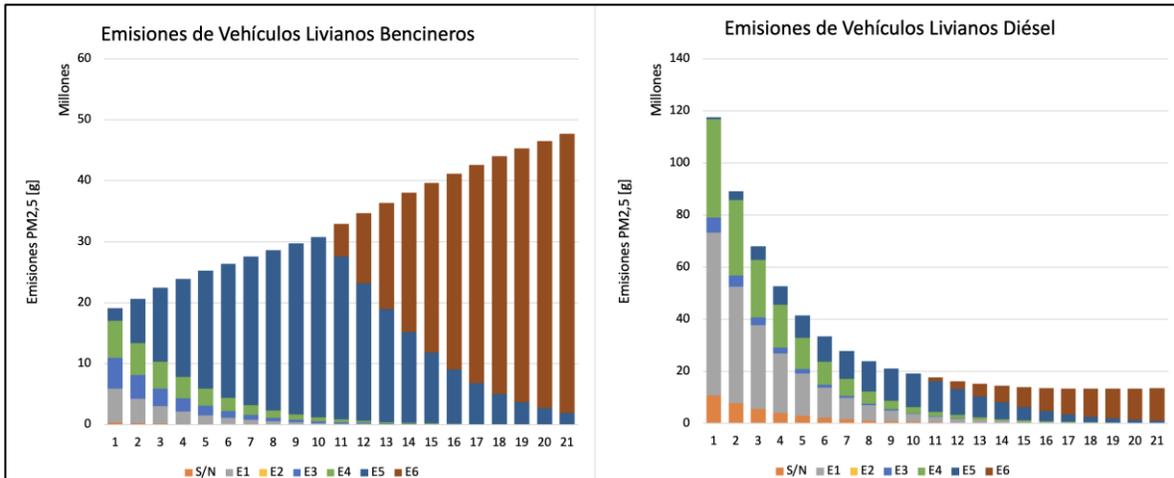


Figura 13 Perfil de Emisiones de PM_{2.5} para VPL a Gasolina y Diésel por Estándar de Emisión EURO para Altas Tasas de Renovación

Introducción de la norma EURO 6: Es normal que los gobiernos introduzcan restricciones a la importación de nuevos vehículos, especialmente en relación con las normas de emisiones. Por ejemplo, se suponía que todos los vehículos importados debían cumplir con la norma de emisiones EURO 6 en el año 2020 en Chile, ¿qué habría sucedido si se hubiera aprobado una ley que cambiara esa fecha a 2015 (ver Figura 14)?

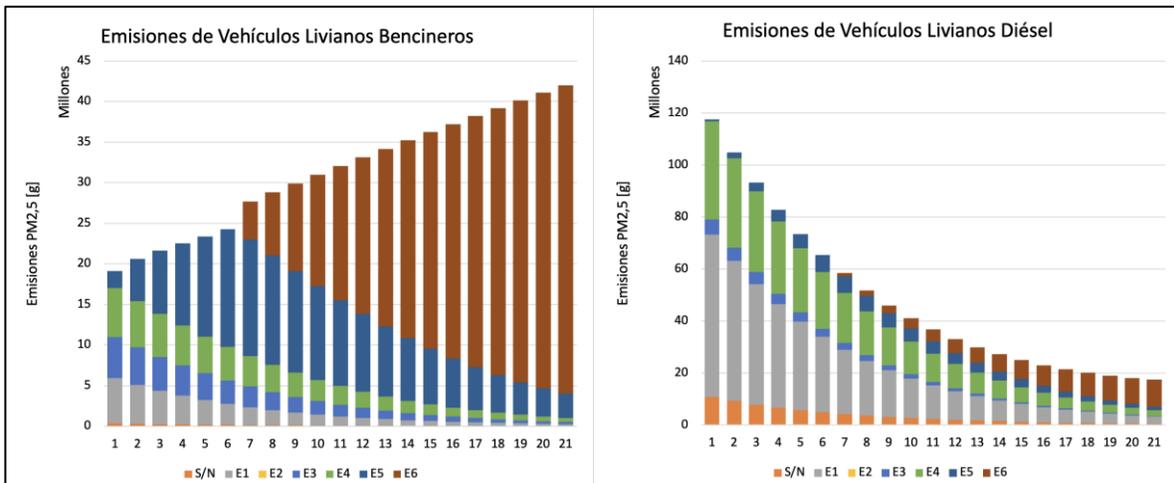


Figura 14 Perfil de Emisiones de PM_{2.5} para VPL a Gasolina y Diésel por Norma de Emisiones EURO en EURO 6 para el Año 6

La Figura 14 muestra los perfiles de emisión de PM_{2.5} si los nuevos vehículos hubieran debido cumplir con la norma EURO 6, en el año 6 en lugar del año 11 (2015 en lugar de 2020). Como se puede apreciar, el efecto es considerable.

5. DISCUSIÓN

Todos los modelos tienen ventajas y limitaciones, y GUESS ciertamente no es una excepción. Desde el punto de vista de las ventajas, no hay duda que el juego se beneficia del potencial gráfico que tienen los perfiles de emisión. Este, combinado con la flexibilidad del modelo, genera una herramienta educativa simple pero poderosa, que permite a los usuarios interactuar con la flota de vehículos y comprender cómo reaccionan las emisiones a sus medidas de política.

Por otro lado, GUESS no requiere conocimientos acerca de los modelos econométricos que definen las relaciones entre la evolución de la flota de la ciudad y sus emisiones, por lo que puede ser utilizado por una amplia gama de usuarios. También, la capacidad de cambiar ciertos parámetros sin tener que volver a estimar los modelos y luego recalcular emisiones es otro punto fuerte. De hecho, hasta dónde llega nuestro conocimiento, no existe un modelo en el mercado que combine este nivel de flexibilidad e interfaz fácil de usar. Varios estudios se han centrado en determinar perfiles de emisión mientras prueban escenarios replicables por GUESS, pero ninguno ha creado una herramienta que permita a no especialistas generar escenarios y probarlos. Así, GUESS se puede utilizar como herramienta educativa en una gran variedad de cursos de pre y postgrado en que interese el tema de transporte y emisiones.

La principal desventaja de la versión actual del juego es que considera un enfoque muy básico en relación a las emisiones de transporte. De hecho, la forma en que el modelo calcula las emisiones se basa en una heurística que no es el enfoque más preciso disponible (FHWA, 2002). No obstante, como modelos más detallados y avanzados requieren más datos y añaden complejidad, nos parece que el nivel actual de detalle de GUESS es suficiente para sus objetivos.

Por otro lado, es importante mencionar que GUESS no considera actualmente los siguientes factores que podrían ser incorporados en futuras extensiones:

- Emisiones cuando se arranca en frío
- Emisiones que dependen de la velocidad en la red de transporte, y
- Aumento de emisiones por kilómetro debido al envejecimiento de un vehículo.

Finalmente, la implementación actual de GUESS en Excel también permite varias extensiones. Por ejemplo, es posible realizar análisis más detallados en cada escenario y, si hay datos disponibles, el modelo se puede replicar en otras ciudades o países. GUESS también puede beneficiarse de la adición de modelos de comportamiento y elasticidades de precios que permitan predecir cambios en la tasa de crecimiento de la flota de vehículos y sus patrones de uso.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Prof. Huw Williams de la University of Cardiff por la idea original (REMIT) y los útiles comentarios y sugerencias a un borrador anterior de este artículo. También deseamos reconocer el apoyo del Centro de Desarrollo Urbano Sustentable – CEDEUS (ANID/FONDAP 1523A0004) y del Instituto Sistemas Complejos de Ingeniería - ISCI (ANID PIA/PUENTE AFB23002).

REFERENCIAS

- Dargay, J., Gately, D. & Sommer, M. (2007) Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960 - 2030. *Energy Journal* **28**, 143-170.
- EEA (2019) EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. *EEA Report No. 13/2019*, European Environment Agency, Copenhagen
- EPA (2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- EPA (2020) *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- FHWA (2002) *Impact Methodologies: Environmental – Operating, Toolbox for Regional Policy Analysis: Forecasting Methods*. Federal Highway Administration, US Department of Transportation, Washington, D.C.
- Fridstrom, L. (2022) Motor vehicle demographics – summary. Norwegian Centre for Transport Research, Institute of Transport Economics (TOI), Oslo.
- Fridstrom, L. & Ostli, V. (2016) Vehicle fleet forecasts based on stock-flow modelling. *TOI Report 1518/2016*. Norwegian Centre for Transport Research, Institute of Transport Economics (TOI), Oslo.
- INE (2016a) *Actualización de Población 2002-2012 y Proyecciones 2013-2020*. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago.
- INE (2016b) *Parques de Vehículos en Circulación*. Instituto Nacional de Estadísticas, Santiago.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2014) *Climate Change 2014 – Mitigation of Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lee, S.S. & Williams, H.C.W.L. (2008) The dependence of vehicle emission profiles on traffic growth, technology gain, and fleet turnover: a comparative study and sensitivity analysis. *Environment and Planning A: Economy and Space* **40**, 482-503.
- Ministerio del Medio Ambiente (2023) Informe del Inventario Nacional de Chile 2022: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2020. División de Cambio Climático, Santiago.
- Norby, R.J. & Luo, Y. (2004) Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO₂ and global warming in a multi-factor world. *New Phytologist* **162**, 281-293.

Polette, J. (2017) *Modelo Urbano de Simulación de Emisiones de Contaminantes del Parque Vehicular*. Tesis de Magister, Departamento de Ingeniería de Transporte y Logística, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Williams, H.C.W.L. (2016) REMIT: reducing emissions in transport. *Technical Note*, School of Geography and Planning, Cardiff University.

World Bank (2017) CO₂ emissions from transport (% of total fuel combustion). The World Bank, Washington, D.C. <http://data.worldbank.org/indicator/EN.CO2.TRAN.ZS>

Wu, T., Zhao, H. & Ou, X. (2014) Vehicle ownership analysis based on GDP per capita in China: 1963 - 2050. *Sustainability* **6**, 4877 - 4899.