



USAID
DEL PUEBLO DE LOS ESTADOS
UNIDOS DE AMÉRICA



Modelo para la estimación de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante políticas públicas asociadas al desarrollo urbano (densificación y usos mixtos del suelo)

MEXICO LOW EMISSIONS DEVELOPMENT PROGRAM (MLED).

CONTRACT: AID-523-C-11-00001

2 de Marzo de 2014

Este informe fue elaborado por Tetra Tech ES Inc. para la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional, USAID

AVISO LEGAL

Las opiniones expresadas en esta publicación no reflejan necesariamente la opinión de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional ni la del Gobierno de los Estados Unidos.

www.mledprogram.org



PROGRAMA PARA EL DESARROLLO
BAJO EN EMISIONES DE MÉXICO (MLED)

MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) MEDIANTE POLÍTICAS
PÚBLICAS ASOCIADAS AL DESARROLLO URBANO (DENSIFICACIÓN Y USOS MIXTOS DEL SUELO)

MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) MEDIANTE POLÍTICAS
PÚBLICAS DE USO DEL SUELO.

El presente estudio fue elaborado por ITDP México y Despacio. Los autores principales son Segundo López, Carlos Pardo y Xtabai Padilla, bajo la supervisión de Ricardo Troncoso de WWF, en el marco del Programa para el Desarrollo Bajo en Emisiones de México (MLED), patrocinado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID), bajo el contrato “AID-523-C-11-00001” implementado por Tetra Tech ES Inc.

Para mayor información, por favor contacte a: info@mledprogram.org

www.mledprogram.org

Modelo para la estimación de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) mediante políticas públicas asociadas al desarrollo urbano (densificación y usos mixtos del suelo).

Tabla de contenido

Tabla de acrónimos y abreviaturas.....	4
Abstract	5
Resumen ejecutivo	5
Introducción	6
Antecedentes	6
Desarrollo metodológico general.....	8
MODELO PARTE A: Patrones de viaje.....	9
Generación viajes en la zona (i).....	10
Tasa de viajes capturados en la zona (i).....	10
MODELO PARTE B: Reducción de toneladas de CO ₂ al año	11
Aplicación del modelo al Distrito Federal	14
Resultados del modelo de usos del suelo-patrones de viaje y emisiones de GEI en el Distrito Federal.....	16
Modelos de usos del suelo y patrones de viaje (I, II y III) y de emisiones (IV)	17
Modelo IV-Variables del suelo y emisiones de GEI	22
Co-beneficios asociados	27
Resumen de resultados.....	29
Conclusiones y recomendaciones	30
Glosario	33
Bibliografía	33
Anexos.....	35

Tabla de acrónimos y abreviaturas.

GEI	Gases de efecto invernadero
KVR	Kilómetros vehículo recorridos
CO ₂	Dióxido de carbono
OD	Origen-Destino
$V - HP_i$	Viajes generados en la zona i
$V.in_i$	Viajes con origen y destino en la misma zona
T_{i-j}	Viajes entre la zona i y la zona j
A_j	Atractividad de cada zona
P_k^{i-j}	Probabilidad de usar el modo k en la zona i
U_k^{i-j}	Utilidad de usar el modo k en la zona i

Abstract

Como resultado de los cambios e integración en la planeación urbana y en las políticas de transporte, se espera que los patrones de movilidad también cambien. Esto incluye aumentos en el uso de modos de transporte sustentables (como la caminata, la bicicleta y el transporte público) y la reducción de las distancias y tiempos de viaje en la ciudad, también implica una disminución de las externalidades negativas que resultan del uso indiscriminado del automóvil privado. Este documento presenta una metodología para estimar los impactos de políticas públicas del uso del suelo en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) derivadas del transporte urbano. La metodología consiste en dos modelos:

- El primero trata de predecir los patrones de movilidad a raíz de los cambios en usos del suelo.
- El segundo estima la reducción de emisiones como resultado de los cambios en los patrones de movilidad.

Resumen ejecutivo

El presente documento desarrolla una metodología para estimar los impactos que tendrían las políticas públicas relacionadas con el uso del suelo en la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI). Lo anterior se establece con base en la relación teórica que existe entre el uso del suelo y el transporte, y la relación de este último con las emisiones de GEI.

En la introducción se explica la base teórica de los modelos que son desarrollados. Los dos principales temas a analizar son la relación de los usos del suelo y el transporte, y la relación entre el transporte y las emisiones de GEI.

En la sección de antecedentes se describe un estudio realizado anteriormente para dos ciudades de la India en el año 2012, en el que se estimaron las emisiones que se dejan de emitir a causa de la introducción de dos líneas de sistemas de buses. Este cálculo se hizo con base en un escenario en el que no se hubiera hecho nada comparado con el escenario con las rutas de autobuses. En él se encontró que los servicios de transporte público (autobuses) producen reducciones significativas en las emisiones de GEI, sugiriendo que aplicar sistemas de autobuses debería ser una herramienta fundamental para la mitigación del cambio climático. Es útil para el ejercicio actual, pues revisan mecanismos de política pública –en este caso, la inclusión de sistemas de autobuses- que pueden reducir las emisiones de GEI, además, se utiliza una metodología similar para calcular las emisiones (distancia recorrida, factores de emisión y ocupación promedio) la cual se replicó para el presente estudio.

Posteriormente, se desarrolla y explica la metodología para calcular el beneficio en la reducción de GEI con base en dos modelos que asocian los usos del suelo y el transporte, y luego otro que asocia el transporte con las emisiones. En las conclusiones se recomienda no tomar como determinísticos los resultados que se obtengan, por el contrario, se invita a hacer un análisis de sensibilidad a partir de los resultados obtenidos.

Introducción

La directa relación que la estructura urbana tiene respecto a la movilidad dentro de una ciudad hace necesaria que la forma como se desarrollan las urbes sea planeada de la tal manera que se tenga en cuenta las implicaciones que tiene el uso del suelo en el transporte. Esta relación tiene como base el ciclo de realimentación que se presenta entre los usos de suelo, las actividades humanas, la distribución de oferta de transporte y la accesibilidad a los espacios o actividades dentro de la ciudad (Wegener et al., 1999).

A su vez, el transporte ineficiente genera costos negativos a la sociedad, (externalidades negativas) como: accidentes, daño de la infraestructura vial, emisiones de GEI y contaminantes de vida corta, congestión y dependencia al petróleo (Santos et al., 2010). Por esta razón, es necesario desarrollar herramientas para entender el impacto que las políticas públicas ocasionan en los sistemas de transporte y movilidad y, por ende, en las externalidades que esta actividad produce.

El gobierno mexicano en el marco de la Ley General de Cambio Climático, establece como medida de mitigación en la Estrategia Nacional de Cambio Climático y el Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 “Transitar a modelos de ciudades sustentables [...] mediante el uso controlado y eficiente del territorio al disminuir la expansión urbana y garantizar el acceso inter urbano, promover edificios de usos mixtos y verticales, privilegiar la densificación antes que la apertura de nuevas reservas de la periferia...[...].”

Con el objetivo de estimar **la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mediante políticas públicas asociadas al desarrollo urbano (densificación y usos mixtos del suelo)**, teniendo en cuenta las relaciones existentes entre la estructura urbana y el transporte, y la de este último con las emisiones, se desarrolla la presente herramienta que permite estimar la reducción.

El cambio que se desea es que las políticas de uso del suelo en el transporte incentiven el cambio modal hacia modos sustentables y reduzcan la distancia de los viajes dentro de la ciudad, esto a su vez, implica una reducción de GEI a causa del cambio en la tipología de los viajes urbanos. Además de esta reducción en emisiones de GEI, los cambios en la estructura urbana también impactarían en las externalidades que el transporte urbano genera a manera de co-beneficios.

Cabe destacar, que para el presente análisis solamente se tomó como referencia el Distrito Federal, ya que para las demás Zonas Metropolitanas no se encontraron datos significativos para desarrollar los modelos.

Antecedentes

El desarrollo de la metodología que aquí se presenta se realiza con base en el estudio realizado por Ashwin Prabhu y Madhav Pai (2012). En este documento se propuso una metodología para calcular las emisiones que se dejaron de originar en dos ciudades de India debido a la introducción de sistemas de transporte público, específicamente líneas de autobuses. Se estudiaron tres escenarios

principales, uno referente al tiempo “pasado”, para ver cuantas toneladas de CO₂ se habían dejado de emitir por haber implementado un sistema de autobuses años atrás; otro escenario referente al “presente”, evaluando cuanto se había dejado de emitir por introducir los sistemas de BRT y big10, y por último un escenario “futuro”, en el que hace referencia a pronosticar la reducción de emisiones del año 2021 al 2031. Estos análisis se hicieron para las ciudades de Ahmedabad y Bangalore. Para cuantificar la reducción de emisiones los autores del estudio usan la siguiente metodología propuesta por *American Public Transit Association*:

1. Se calcula el número de kilómetros por pasajero por modo de transporte público.
2. Este número de kilómetros por pasajero y modo en los sistemas de transporte público se pasa a otro sistema, aquel que los usuarios hubieran utilizado si el modo de transporte elegido no existiera. La proporción de kilómetros recorrida- en los otros modos en el escenario hipotético- es calculada según el factor de cambio, el cual describe el porcentaje de personas que modificaron su elección de modo de transporte. Este factor lo calculan a partir de encuestas de preferencias declaradas y la partición modal que tiene la ciudad en el momento del estudio
3. Los kilómetros por pasajero por modo de transporte público se pasan a vehículo, teniendo en cuenta factores de ocupación promedio.
4. Se calculan las emisiones por modo de transporte teniendo en cuenta los kilómetros totales por vehículo y factores de emisión. Esto se hace para ambos escenarios, el que provee transporte público y el que no.

La tercera parte del estudio (pronosticar emisiones para un período de tiempo futuro) utiliza la siguiente aproximación:

La cantidad total de emisiones de transporte es una función de todas las actividades de transporte (tasa de viajes per cápita, población y longitud promedio de los viajes por modo), estructura modal (distribución modal, ocupación), intensidad energética (eficiencia energética de los combustibles según su tipo) y combustible. Los autores en el estudio comparan dos escenarios, uno con transporte sustentable como pilar de la movilidad y otro con movilidad en transporte privado como modo dominante. Para ambos escenarios el pronóstico se realiza con las mismas tasas de crecimiento poblacional.

Para las metodologías presentadas anteriormente los autores hacen suposiciones sobre el crecimiento de la población, el desarrollo urbano de la ciudad, la longitud de los viajes por modos de transporte, la tasa de viajes al día y la partición modal. Para la suposición de partición modal los autores toman datos actuales con respecto a partición modal y usos del suelo, proyectando estas dos variables de manera diferente para un escenario con crecimiento del uso del automóvil (mayor participación en la distribución modal) y crecimiento de la ciudad menos denso, y el otro, con un crecimiento del uso del transporte público y densidad similar a la actual. Para el caso de longitud de los viajes se supone que este valor es proporcional al área de la ciudad y al desarrollo de esta.

A continuación se presenta la propuesta metodológica de ITDP y Despacio, que difiere principalmente de la anterior en la forma en cómo se desarrollan las suposiciones. Específicamente la suposición de distribución modal.

Desarrollo metodológico general

Mediante instrumentos de política pública enfocados al desarrollo urbano que incentiven densificar y mezclar los usos y niveles de ingreso en el área de influencia de transporte público, se espera que los patrones de viaje urbano cambien en la ciudad hacia modos de transporte sustentables como la caminata, la bicicleta y el transporte público. El objetivo es lograr que a través de estas estrategias se consolide una estructura urbana con distribución de usos del suelo mixtos y una reducción significativa de los viajes en modos motorizados, ya que las distancias de viaje son menores.

Este cambio de distribución modal y reducción en la distancia de los viajes en modos motorizados (reducción en VKT¹) se traduce en una reducción en las emisiones de GEI. Este tipo de estrategia puede ser más conveniente que proyectos exclusivos en mejora de tecnología de vehículos motorizados, ya que no solo se reducen emisiones, sino también el número de kilómetros recorridos, accidentes, tiempo de viaje y costo generalizado del transporte², entre otros efectos. En la Figura 1 se muestra la estructura metodológica para calcular cuáles son los beneficios ambientales (reducción en GEI) generados por políticas públicas y mecanismos de desarrollo orientado al transporte.

Figura 1: Estructura metodológica para calcular el beneficio en emisiones de GEI



Fuente: Despacio.

¹ *Vehicle Kilometers Travelled* (Kilómetros recorridos en vehículo). Véase Góngora (2012) para una explicación de la importancia de este indicador.

² También incluye el tiempo de viaje.

Con las políticas públicas enfocadas al desarrollo urbano sustentable se generarán cambios en la distribución de los usos del suelo de las zonas en las cuales se generen usos del suelo mixto (residencial, comercial, servicios, etc.). Esta nueva distribución a su vez genera un cambio en los patrones de viaje: la necesidad de viajar en modos motorizados disminuye, las distancias entre los pares Origen-Destino (OD) son más cortas y las personas usan modos de transporte sustentables, como la bicicleta, caminata y transporte público. Este cambio porcentual en la distribución de viajes, y la reducción en VKT hace que las emisiones de GEI se reduzcan. Menos viajes en transporte motorizado (automóvil y motocicleta) se traducen en una disminución total de toneladas de GEI al año debido a que estos modos son los menos eficientes energéticamente, lo que implica además una mayor emisión de CO₂ por viaje realizado.

Para modelar estos procesos, es importante separar la metodología en dos partes:

1. Se desarrolla un modelo que se encarga de simular cuál es la distribución modal de una ciudad a partir de las políticas en los usos del suelo que se propongan (modelo “Parte A” descrito a continuación).
2. Se calcula a partir de esta distribución modal cuáles son los beneficios ambientales producidos, en este caso toneladas de CO₂ reducidas al año (modelo “Parte B” descrito más abajo).

MODELO PARTE A: Patrones de viaje.

El modelo A consiste en calcular cuál es la distribución porcentual de los viajes en los diferentes modos de transporte a partir de las políticas públicas y mecanismos de desarrollo urbano que favorezcan **la densificación, la mezcla de usos de suelo, cambios en accesibilidad o la inclusión de nuevas líneas de transporte público.**

Este modelo analiza las principales variables urbanas que afectan la selección modal de los viajes generados, así como los aspectos inherentes a los costos de cada modo. En este sentido la evidencia sugiere que **zonas más densas** –por ende, distancias de viajes más cortos-, **con mayor mezcla de usos y con mayor oferta de infraestructura, actividades, bienes y servicios, promueve mejores condiciones para el desarrollo de viajes, primordialmente en modos no motorizados y complementariamente en transporte público; en detrimento de viajes en transporte privado motorizado.** Las principales variables cuyas asociaciones empíricas serán estudiadas este modelo pertenecen a los siguientes grupos:

Variables urbanas: La densificación y promoción de variedad de actividades mediante la mezcla de usos de suelo, el diseño urbano y de infraestructura para transporte sustentable, ambos con estándares de accesibilidad calificados generan condiciones positivas hacia la elección de modos sustentables.

Variables sociodemográficas: Principalmente el ingreso promedio de los habitantes de las zonas de análisis es una variable que determina la elección entre distintos modos. La

elección modal también depende de si la población ocupada/desocupada y de los rangos de edad, además de grupos vulnerables. El principal objetivo de incluir esta variable es identificar si hay una diferencia significativa entre las asociaciones entre las variables urbanas y los patrones de viaje, y por ende, las emisiones de GEI y demás externalidades.

Costo de viaje: El costo de viaje entre zonas en los distintos modos se puede medir tanto en tiempo como en costo monetarios. Esta es una variable importante ya que los viajes locales o recorridos cortos tienen mayor flexibilidad para realizarse en modos no motorizados, mientras que los recorridos de distancias mayores tienden a realizarse en modos motorizados.

Patrones de viaje: Se refiere a las variables asociadas a la movilidad de los individuos en la zona de estudio. En este caso, se tendrá en cuenta la cantidad de viajes en cada zona, la captación de viajes (proporción de viajes con origen y destino en la misma zona), elección modal y distancia de viaje.

Para cada una de las variables expuestas anteriormente es necesario hallar evidencia empírica de las relaciones para el contexto de las ciudades que se estén estudiando. Por lo tanto, es necesario desarrollar modelos de regresión que permitan calibrar los parámetros en cada paso. Una vez estén los modelos calibrados es posible realizar simulaciones dadas las condiciones propuestas de usos del suelo.

Generación viajes en la zona (i)

La generación de viajes se calcula a nivel de cada una de las zonas en las cuales se generan los cambios en el uso del suelo por las políticas públicas de desarrollo urbano. Para esto se estima una regresión lineal múltiple en la cual los viajes generados en el día (por cada zona) son explicados por las actividades en la zona y el ingreso de los habitantes. Donde $V - HP_i$ corresponde a los viajes generados en la zona (i).

$$V - HP_i = f(m^2Resi_i, m^2Comer_i, m^2Edu_i, m^2Otros_i, Ingreso_i),$$

$$V - HP_i = \beta_0 + \beta_1 m^2Resi_i + \beta_2 m^2Comer_i + \beta_3 m^2Edu_i + \beta_4 m^2Otros_i + \beta_5 Ingreso_i + \epsilon_i$$

Con base en la desagregación de metros cuadrados construidos de cada uso se espera sacar tasas de generación individuales y al final el número total de viajes generados. La variable Ingreso se introduce en la formulación, ya que se puede presentar que en zonas con distintos ingresos o estratos, la tasa de generación cambie. Según la disponibilidad de información los m^2 de espacio residencial pueden ser cambiados por población y los distintos usos complementarios por empleos.

Tasa de viajes capturados en la zona (i)

La tasa de captura de viajes se formula como los viajes que se quedan en las zonas, que en últimas, es uno de los resultados esperados de las políticas de desarrollo urbano. Menos viajes largos. Esto

es viajes con origen y destino en la misma zona, sobre los viajes totales generados en la zona. La regresión se plantea de la siguiente forma.

$$\frac{V.in_i}{V - HP_i} = f(densidad_i, mixtura_i, Accesibilidad_i, Ingreso_i),$$

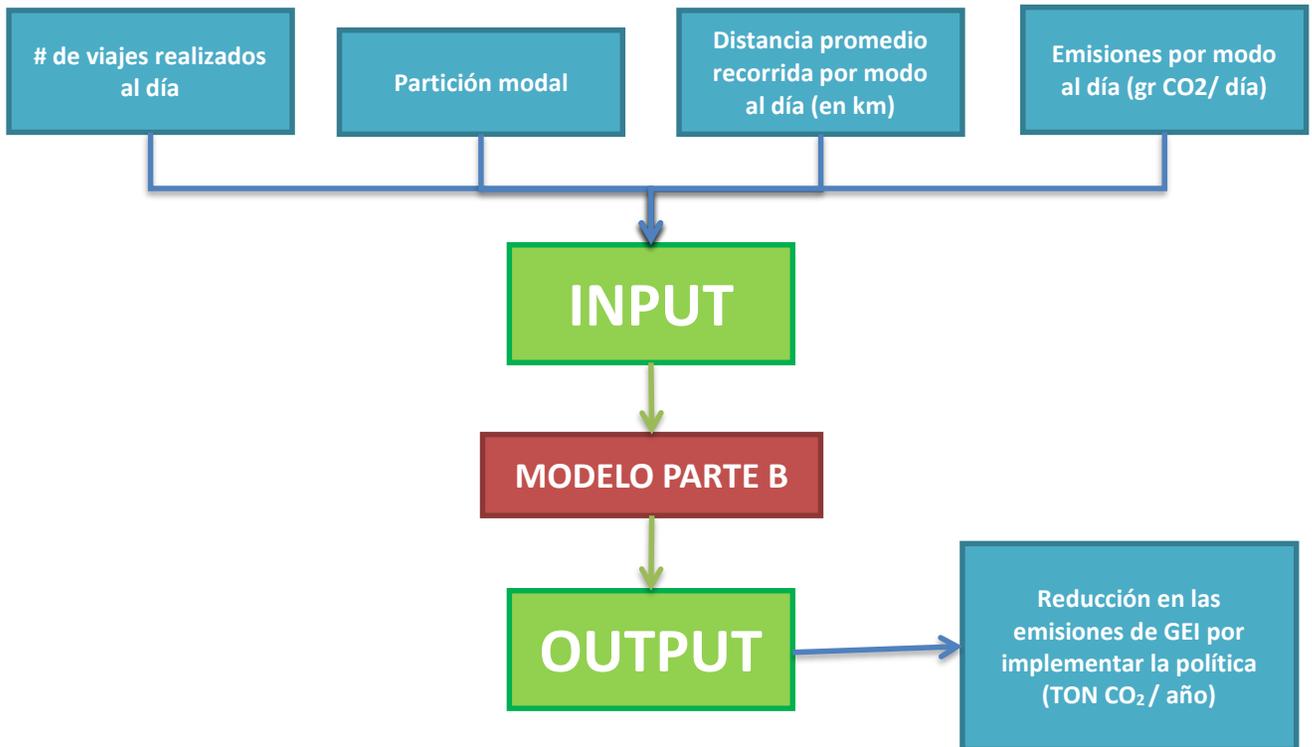
$$\frac{V.in_i}{V - HP_i} = \beta_0 + \beta_1 densidad_i + \beta_2 mixtura_i + \beta_3 Accesibilidad_i + \beta_4 Ingreso_i + \epsilon_i$$

Se espera que una mayor densidad construida y una distribución de usos del suelo mixto, incentiven una mayor captura de viajes. Así mismo la accesibilidad es una variable influyente, ya que zonas con una alta conectividad con el resto de la ciudad tenderían a generar más viajes externos.

MODELO PARTE B: Reducción de toneladas de CO₂ al año

El modelo Parte B consiste en el cálculo de las toneladas de CO₂ reducidas producto del cambio en la distribución modal generado por las estrategias y políticas públicas que impacten los usos de suelo. El objetivo es permitir comparar las toneladas de CO₂ emitidas en un escenario base, con las toneladas emitidas en un escenario con políticas públicas relacionadas con el uso del suelo

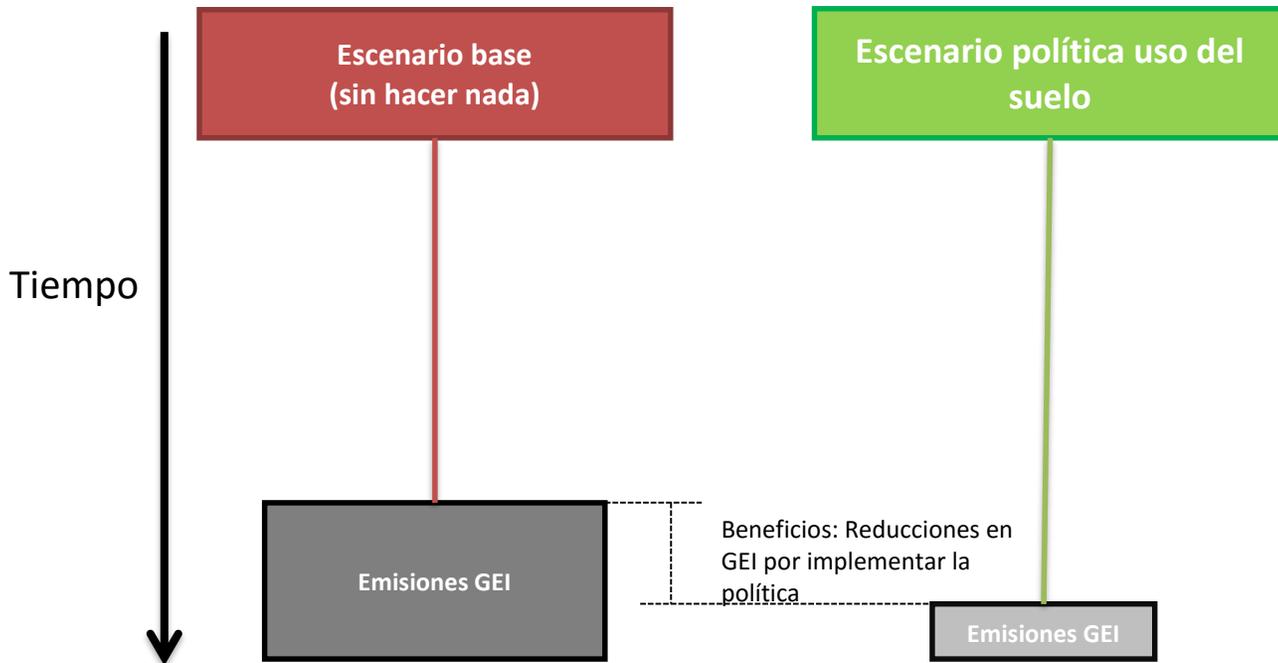
Figura 2: Estructura del modelo B



Fuente: Despacio.

Comparando un escenario base, en el cual no se implementa ninguna política pública que impacte el uso del suelo o la oferta de transporte público, con un escenario en el cual sí se hace, se puede determinar cuántas toneladas de CO₂ se dejaron de emitir:

Figura 3: Comparación de escenarios para determinar los beneficios en emisiones de GEI.



Fuente: Despacio.

A continuación se presentan los pasos para determinar las toneladas de CO₂ de la línea base que se usará en el modelo:

- Para correr el modelo se necesita la siguiente información³:
 - Número de viajes realizados al día (en todos los modos de transporte).
 - Partición modal (% de viajes realizados en cada modo al día).
 - Distancia promedio recorrida por modo al día (en unidades de kilómetro) $\left[\frac{km}{día} \right]$
 - Tasa de emisión. Gramos de CO₂ emitidos al día por cada modo de transporte analizado $\left[\frac{CO_2}{km} \right]$
- Se simula el escenario base en el cual se calculan las toneladas de CO₂ emitidas al año por todos los modos de transporte. En este escenario los patrones de viaje aumentan a partir de la

³ Para conseguir esta información es necesario contar con una encuesta domiciliaria de movilidad, no es complicado conseguirla.

situación de movilidad actual y crecimiento de la población. No se considera ninguna política que modifique significativamente la partición modal de la ciudad.

3. Se calcula el número de viajes por modo realizados en un día:

$$\frac{\left(\frac{\# \text{ total de viajes}}{\text{día}} * \% \text{ de viajes por modo} \right)}{\text{Ocupación}} = \frac{\# \text{ de viajes por modo}}{\text{día}} \quad \left[\frac{\# \text{ de viajes}}{\text{día}} \right]$$

4. Se calculan los kilómetros recorridos por cada modo de transporte en un día:

$$\frac{\# \text{ viajes por modo}}{\text{día}} * \text{ distancia diaria promedio por viaje por el modo } x \text{ (en km)} \\ = \frac{\text{ distancia promedio por modo } x}{\text{día}} \quad \left[\frac{\text{km}}{\text{día}} \right]$$

5. Se calculan las toneladas de CO₂ emitidas por cada modo de transporte en un día:

$$\frac{\text{ distancia promedio por modo } x \text{ (en km)}}{\text{día}} * \frac{\text{ gr CO2 diarios emitidos por modo } x}{\text{km}} \\ * \frac{1 \text{ Ton}}{1\,000\,000 \text{ gr}} \\ = \frac{\text{ Ton CO2 por modo } x}{\text{día}} \quad \left[\frac{\text{Ton CO2}}{\text{día}} \right]$$

Cabe destacar que para este cálculo no se toma en cuenta la velocidad de los vehículos, sin embargo, se usan factores de emisión (en gramos de CO₂ por kilómetro recorrido en cada modo) calibrados para la zona de estudio y se tiene en cuenta que, para obtenerlos, la fuente original (MOBILE6-México) tuvo en cuenta la velocidad en sus análisis (ERG, 2003).

6. Se calculan las toneladas de CO₂ emitidas por cada modo de transporte en un año:

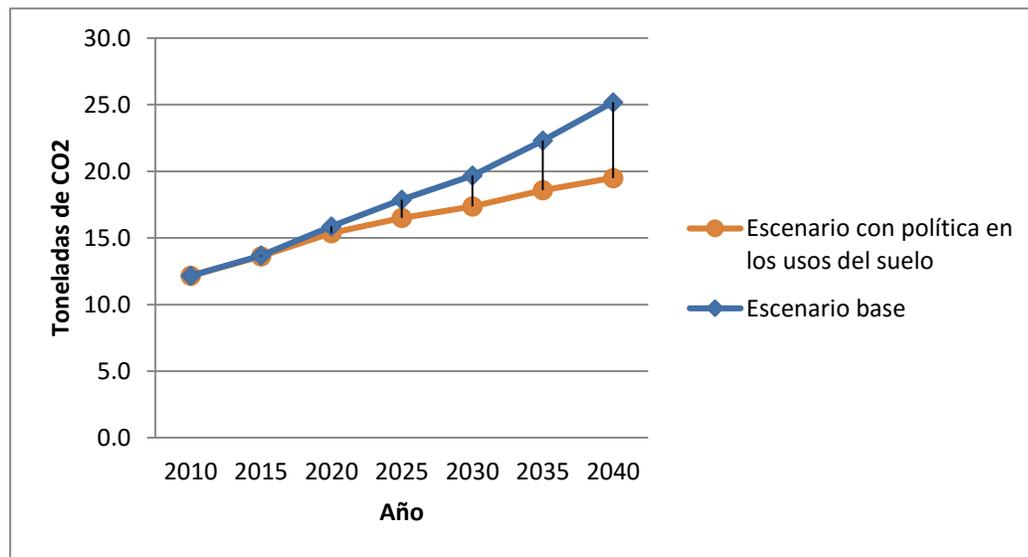
$$\frac{\text{ Ton CO2 por modo } x}{\text{día}} * \frac{300 \text{ días}}{\text{año}} = \frac{\text{ Ton CO2 por modo } x}{\text{año}} \quad \left[\frac{\text{Ton CO2}}{\text{año}} \right]$$

7. Se proyecta este valor para diferentes años teniendo en cuenta el crecimiento de los viajes, cambios en la distribución modal y cambios de tecnología de vehículos motorizados (lo cual produce cambios en la tasa de emisiones de CO₂ producidos al día por modo de transporte).
8. Se realiza el mismo proceso desde el paso 3 para el escenario con políticas en los usos del suelo. En este caso, el input de partición modal y número de viajes totales al año se espera que cambien debido a cualquier política de usos del suelo generada que incida en las variables estudiadas. (e.g. los viajes en modos sustentables como la bicicleta y el transporte público)

aumentan debido a la configuración de la ciudad, por una distribución en los usos del suelo los viajes son más cortos).

- Se comparan las toneladas de CO₂ emitidas al año para cada escenario con el fin de determinar si se generaron beneficios por la política de suelos planteada.

Figura 4: Comparación a lo largo del tiempo de las emisiones de GEI.



Fuente: Despacio.

Aplicación del modelo al Distrito Federal

Es necesario aclarar que en todos los modelos se usaron las variables que se presentaron en la parte metodológica. Sin embargo, solo se muestran a continuación las que -según los modelos econométricos realizados- cuentan con significancia para describir la variable dependiente en cada caso del presente estudio. Además fue necesario hacer transformaciones para mejorar el nivel de confiabilidad de los modelos, que principalmente consistieron en transformar las variables para crear modelos “log-log”⁴, donde se obtuvieron elasticidades entre las variables analizadas.

Además, es necesario describir brevemente las variables utilizadas en los modelos para el caso específico del ejercicio para el Distrito Federal para así tener una mayor comprensión de los modelos.

⁴ Un modelo log log es un modelo de regresión donde se asocian los logaritmos tanto de la variable dependiente como de las independientes. Los coeficientes encontrados en este modelo se deben leer como las elasticidades entre las variables independientes y la dependiente.

- Densidad: Cantidad de personas por hectárea en cada zona. Para obtenerla se usó la población que según el INEGI está presente en cada distrito y se dividió por el área en hectáreas de cada distrito.
- Usos Mixtos: Se utilizó como insumo la población y las posiciones de otras actividades (empleos, comerciantes y manufactura) en cada zona como aproximación a los usos del suelo. Esta variable toma su valor máximo cuando la distribución de población y posiciones de otros usos son iguales a 50%. Toma valores entre 0 y 1.
- Accesibilidad: Es una variable que está en función a los tiempos y distancias promedio de una zona a las demás, entre más grande sean la distancia y tiempos promedio a las otras zonas menor será la accesibilidad. Por motivos de la dificultad que generalmente implica los cálculos de accesibilidad, se normalizó para que tomara valores entre 0 y 1.
- Líneas de transporte público: Cantidad de rutas que pasan por cada distrito. Para esta variable se tuvo en cuenta transporte estructurado y no estructurado pues al tener en cuenta solo líneas de transporte público estructurado la variable no fue significativa.
- Ingreso: Se usó la división de niveles de ingreso hecha por ITDP (2014) agrupados como se muestra en la Tabla 1. Esta agrupación se hizo con el fin de que los niveles de ingreso usados en el modelo tuvieran una muestra aceptable para poder contar con resultados significativos.

Tabla 1 Relación niveles de ingreso

Relación nivel de ingreso	
Alto	AB y C+
Medio	C y C-
Bajo	D+
Muy bajo	D- y E

- CO₂ emitido: Se calculó la cantidad de GEI emitido en cada zona como las emisiones causadas por los viajes generados en un día típico de la encuesta Origen-Destino de 2007. Para esto se usaron los factores de emisiones de los modos contaminantes, la ocupación promedio de estos modos y la distancia total recorrida por estos viajes.

A continuación se muestran los resultados, supuestos y modificaciones que se tuvieron que hacer al ejemplo del Distrito Federal para asociar el uso del suelo y la emisión de gases de efecto invernadero.

De acuerdo a la realimentación de los modelos se encontró que:

- Según la evidencia empírica, la **densidad poblacional** es la principal variable de estructura urbana que se asocia con los patrones de viaje. El **uso del suelo mixto y accesibilidad** están presentes. Sin embargo, no fueron variables significativas en la mayoría de los modelos.

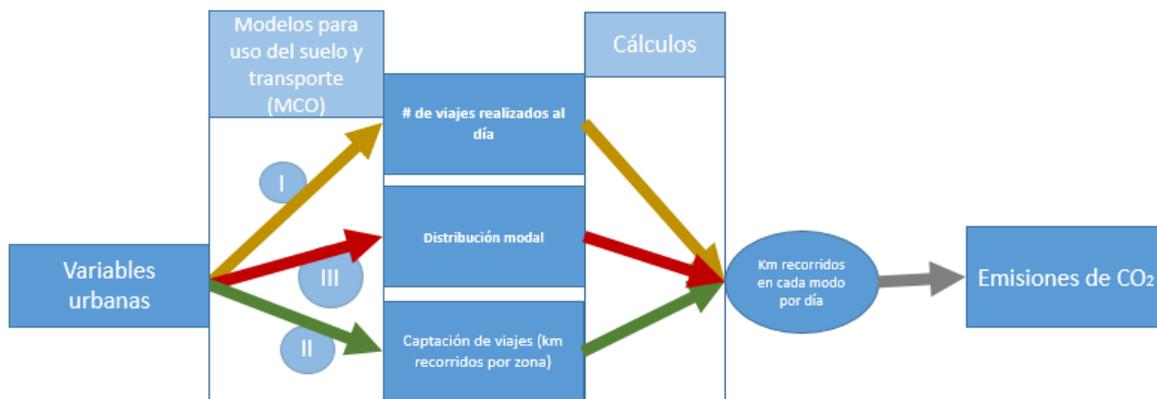
- Se encontró evidencia empírica que permite afirmar⁵ que existe una correlación negativa entre la densidad y la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Esto es debido a que en promedio, a mayor densidad poblacional se daban menos kilómetros de viajes generados por zona – en todos los modos, pero en mayor medida para viajes en vehículo particular- y por ende, menor emisión de GEI.

A continuación se muestra de manera más detallada los resultados del modelo que permite asociar los usos del suelo con los patrones de movilidad, y a estos últimos con las emisiones de GEI.

Resultados del modelo de usos del suelo-patrones de viaje y emisiones de GEI en el Distrito Federal.

A continuación se muestra la metodología propuesta y la simplificación hecha teniendo en cuenta las asociaciones empíricas que se lograron encontrar en los resultados, expuestos de manera detallada más adelante.

Figura 5: Estructura de los modelos usos del suelo-transporte



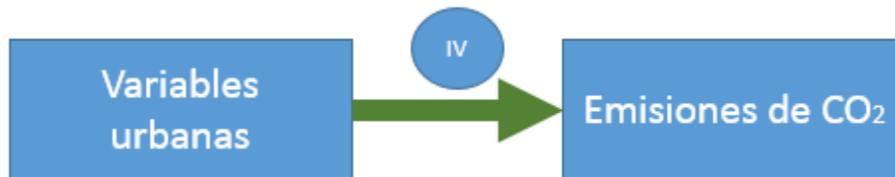
En la Figura 5 se puede apreciar los modelos planteados para analizar las relaciones entre los usos del suelo y los patrones de viaje en las zonas estudiadas. De estos modelos (junto a la encuesta OD de 2007 y la información de distancias entre distritos) se pretendía tener la base para calcular los kilómetros recorridos en cada modo al día en cada distrito de la ZMVM. Sin embargo, en el modelo I (flecha amarilla) se tuvo problemas debido a que en éste las variables de usos del suelo que se usaron fueron las aproximaciones de posiciones (de empleos, comercio y manufactura) o habitantes en cada uso, por lo que aunque el modelo cuenta con una significancia aceptable, las variables usadas (población y posiciones de otros usos) no cuentan con una significancia alta (ambas son significativas al 90%). Además, para el modelo III (flecha roja) no fue posible realizarlo como se había planteado en la metodología. Se usaron modelos que asociaban variables urbanas

⁵ A un nivel de confiabilidad del 95%.

con la tasa de generación de viajes de transporte público, bicicleta y automóvil. Se observó que la tasa de generación crece en mayor medida para el transporte público que para los otros modos cuando la densidad aumenta. Esto da una noción de cómo cambiaría la partición modal (hacia modos eficientes energéticamente por persona transportada), pero no es una aproximación que sirva como insumo para calcular la nueva partición modal, y así, los kilómetros recorridos en cada modo.

Por otro lado, el modelo II (flecha verde), a partir de información empírica, permite afirmar que la densidad está correlacionada positivamente con la captación de viajes, es decir, a mayor densidad más viajes tendrán origen y destino en la misma zona, haciendo a su vez, que la distancia recorrida sea menor, disminuyendo también las emisiones de GEI. A partir de las relaciones empíricas aquí mencionadas se procedió a construir el siguiente modelo, que intrínsecamente cuenta con el soporte empírico encontrado en los modelos I, II y III. Esto se hizo porque el modelo I no contó con un R_2 aceptable, a pesar de ser un modelo que contaba con una significancia global aceptable⁶. Además, se hace esta simplificación porque para que el modelo originalmente propuesto funcionara, era necesario que todos los modelos que lo soportaran contaran con una significancia global aceptable al 95%.

Figura 6 Modelo IV que relaciona las variables urbanas con las emisiones de CO₂.



En la Figura 6 se puede observar la simplificación del modelo (en los resultados se presentó como “modelo IV”) para la estimación de reducción de emisiones ante una intervención en la estructura urbana (densidad en este caso) y la oferta de transporte. De este modelo se encontró que ante un aumento en la densidad promedio (habitantes por hectárea) de un distrito de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) 10%, se disminuirán las emisiones en un 7.4%, además, ante un aumento en 10% de las líneas de transporte público presente en un distrito, las emisiones de GEI disminuirían en 1.6% en promedio para cada zona.

Modelos de usos del suelo y patrones de viaje (I, II y III) y de emisiones (IV)

A continuación se presenta un resumen de la especificación de los modelos con los que se buscó asociar la estructura urbana y oferta de transporte con las emisiones de GEI.

⁶ Significativos según la prueba F de Fischer.

Tabla 2. Especificación de modelos utilizados.

Modelo	Variable dependiente	Variabes independientes
I	Número total de viajes generados en cada zona	<ul style="list-style-type: none"> • Población de la zona • Posiciones de usos complementarios (empleos, comercio y manufactura)
II	Captación de viajes	<ul style="list-style-type: none"> • Logaritmo en base 10 de la densidad • Logaritmo en base 10 de la accesibilidad.
IIIa	Densidad de generación de viajes en bicicleta	<ul style="list-style-type: none"> • Mixticidad de la zona • Logaritmo en base 10 de la densidad
IIIb	Logaritmo en base 10 de la densidad de generación de viajes en transporte público	<ul style="list-style-type: none"> • Mixticidad de la zona • Logaritmo en base 10 de la densidad
IIIc	Logaritmo en base 10 de la densidad de generación de viajes en automóvil	<ul style="list-style-type: none"> • Mixticidad de la zona • Logaritmo en base 10 de la densidad
IV	Logaritmo en base 10 de la cantidad de toneladas de CO ₂ emitido al día en cada zona.	<ul style="list-style-type: none"> • Logaritmo en base 10 de la densidad. • Logaritmo en base 10 de la cantidad de rutas de transporte público en cada zona.

En la tabla Tabla 2 se muestran los modelos que se utilizaron en este ejercicio, la variable independiente de cada uno y sus variables independientes. En seguida se procederá a explicar con más detalle los resultados de cada uno.

Los primeros modelos (I, II, IIIa, IIIb, y IIIc) fueron utilizados para encontrar los parámetros que permitan relacionar la estructura urbana con los patrones de movilidad. Se fundamenta en tres tipos de modelos econométricos que buscan encontrar la relación empírica entre las variables analizadas.

Para todos los modelos, se usó la zonificación por distritos de viaje utilizada en la Encuesta Origen Destino del año 2007 realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), esta zonificación divide a la ZMVM en 153 distritos, y fue utilizada para objeto de este estudio por ser la base de datos con más información disponible y por permitir la vinculación con los datos utilizados en la Modelación de Transporte para la Zona Metropolitana del Valle de México realizada por ITDP (2013).

El primer modelo asocia la generación de viajes en cada zona con los usos del suelo de la zona. Para este paso, no se tenía disponible la base de datos de usos del suelo para toda la ZMVM, por ende, se usó la población de cada distrito como aproximación al uso del suelo residencial y puestos de

actividades (servicios, manufactura y comercio) para los usos del suelo complementarios⁷. En este paso, no se encontró una diferencia estructural entre los **modelos** en los que se le incluía el nivel de ingreso predominante de la zona por lo que solo se presenta un modelo general, sin tener en cuenta esta variable.

Tabla 3: Resultado modelo I de la relación de usos del suelo con generación de viajes. Modelo significativo al 94%. R2=0.04,

VARIABLES	(1) viajes_gen
Pob_total	0.4517* (1.9048)
Otros_usos	1.0758* (1.9182)
Constant	53,478.8 (1.4360)
Observations	153

t-statistics in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

En la Tabla 3 se muestran los resultados del primer modelo, que señalan la cantidad de viajes que se generan en cada zona según la población total de cada zona y los usos complementarios en la zona (comercio, manufactura y servicios). A un nivel de confiabilidad del 90% se puede afirmar que las dos variables son significativamente diferentes a cero, es decir, tienen una asociación significativa con la variable dependiente (viajes generados por zona). Los coeficientes presentados allí se pueden leer como que por cada 100 personas viviendo de más en un distrito, se generarán 54 viajes diarios más en promedio. Y por cada 100 personas que se encuentren en la zona en usos complementarios, se tendrán 107 viajes más generados al día en promedio.⁸

El siguiente paso, consistió en evaluar la asociación de la estructura urbana en cada zona con la cantidad de viajes que se quedan en el distrito. Para esto, se especificó un modelo cuya variable dependiente es la proporción de viajes con origen y destino en cada zona, y las variables independientes son la densidad y la accesibilidad –que es inversamente proporcional al tiempo de viaje y costo promedio de cada zona al resto de zonas-. La variable de mixtura de uso del suelo no fue significativa.

⁷ Se usaron estas variables dentro del modelo como el número de residentes y de posiciones de usos complementarios. Se asume que hay una relación entre los metros cuadrados construidos de cada uso y la cantidad de personas que ocupan estos espacios. Seguramente varía por nivel de ingreso pero esta variable no presentó una asociación significativa en el modelo.

⁸ Este modelo puede usarse para responder qué pasaría en la eventualidad de un desarrollo de cualquier uso en cuanto a la generación de viajes en cada distrito.

Tabla 4 Modelo II: Relación de captación de viajes, densidad y accesibilidad. Modelo significativo al 99%.

VARIABLES	(1) cap_viajes
log_dens	0.0149*** (7.7687)
log_access	-0.0274* (-1.7477)
Observations	153
R-squared	0.6268

t-statistics in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

La Tabla 4 muestra la relación de la captación de viajes con la densidad y la accesibilidad. Como es de esperarse, la densidad tiene una correlación positiva con la captación de viajes mientras la accesibilidad tiene una correlación negativa con la variable dependiente. Este modelo es importante, pues los viajes dentro de las zonas son, en promedio, 4 veces más cortos que los que salen de cada distrito, lo que indica que a mayor densidad se tiende a hacer más viajes cortos. En este caso, el coeficiente que acompaña a la variable densidad, permite inferir que por un aumento 10% de densidad promedio en cada zona, se aumentará en un 1.5% la captación de viajes, en promedio. El coeficiente de la accesibilidad se puede leer como que ante un cambio positivo de 10% en la accesibilidad de la zona, se reducirá 2.7% en la captación de viajes.

A continuación se presenta la siguiente parte del modelo de usos del suelo y patrones de viaje en viajes en bicicleta (viajes diarios en bicicleta por zona normalizados por el área en hectáreas de la zona). Este modelo pretende mostrar la relación de viajes con la tasa de generación de viajes en modos alternativos, por esta razón, también se mostrará este cálculo para la tasa de generación de viajes en transporte público.

Tabla 5 Modelo IIIa: Relación tasa de generación de viajes en bicicleta y densidad. Significancia del modelo al 99%.

VARIABLES	(1) dens_viajes_bici
mix2	1.1749 (0.8069)
log_dens	0.5382*** (4.2224)

Observations	153
R-squared	0.2143

t-statistics in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

En la Tabla 5 se muestra la relación de la densidad y la mixtura con la tasa de generación de viajes en bicicleta. La mezcla de usos de suelo tan solo es significativa al 58%; sin embargo, muestra que a mayor mixtura, en promedio, mayor densidad de viajes en bicicleta. De igual manera, la densidad también se correlaciona positivamente con la tasa de generación de bicicleta, y es significativa al 99%, por lo que se recomienda solo usar esta última en futuros análisis. De la tabla se puede leer que ante un aumento de 10% en el promedio de la densidad en una zona se tendrán 0.5 viajes más en bicicleta por hectárea en promedio.

Tabla 6 Modelo IIIb: Relación de la tasa de generación de viajes en transporte público, el uso del suelo y la densidad. Significancia modelo al 99%.

VARIABLES	(1) log_dens_tp
mix2	1.3908*** (5.0136)
log_dens	0.7249*** (29.8558)
Observations	153
R-squared	0.9297

t-statistics in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

En la Tabla 6 se muestra la relación de la tasa de generación de viajes en transporte público. En este caso, la mixtura es una variable significativa y se puede leer que ante un cambio de 10% en mixtura habrá un aumento de la densidad de viajes (viajes por hectárea) de 13.6% viajes más por hectárea en cada zona. En este caso la densidad tiene un rendimiento marginal menor, pues en promedio con un cambio de 10% más en la densidad, se espera que haya 5.7% más viajes más por hectárea. Es decir, la mixtura tiene más efecto que la densidad en la tasa de generación de viajes en transporte público.

Tabla 7 Modelo IIIc Relación de la tasa de generación de viajes en automóvil, el uso del suelo y la densidad. Significancia del modelo al 99%.

VARIABLES	(1) log_dens_carro
-----------	-----------------------

mix2	1.4231*** (5.2187)
log_dens	0.5726*** (23.9916)
Observations	153
R-squared	0.9012

t-statistics in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

En la Tabla 7 se muestra la relación de las mismas variables de estructura urbanas con la densidad (o tasa de generación) de viajes en automóvil. Se aprecia que la densidad y la mixtura se relacionan de la misma manera que con la tasa de generación de viajes en transporte público –mostrado en la Tabla 6 -pero con un rendimiento marginal menor-. Es decir, ante un aumento de la densidad y la mixtura, la tasa de generación de viajes de transporte público crecerá en mayor medida que la tasa de generación de viajes en automóvil. Por esta razón se puede inferir que ante mayor uso mixto del suelo y mayor densidad, la partición modal del transporte público va a crecer mientras que la del automóvil va a decrecer.

Sin embargo, no es posible estimar la distribución modal con este método, pues no hay una base teórica que soporte este tipo de aproximación. Por esta razón, se muestra de manera esquemática, ya que representa una asociación matemática entre los usos del suelo y la densidad con la distribución modal y, a su vez, soporta el supuesto de que ante una mayor densidad y mixtura habrá una partición modal con modos más sustentables.

Usando los modelos anteriormente desarrollados, se puede decir que hay asociación empírica entre las variables analizadas y, por ende, las suposiciones hechas sobre los efectos del uso del suelo sobre los patrones de viaje pueden ser soportadas para el caso de la ZMVM según los resultados.

Modelo IV-VARIABLES DEL SUELO Y EMISIONES DE GEI.

Por último, se presenta la relación de la densidad y la oferta de transporte público (estructurado y no estructurado) con la emisión de GEI (Tabla 8). Para la construcción de este modelo se usó la cantidad de emisiones (toneladas por día) generadas por los viajes con origen en cada distrito. Para este cálculo, se usaron las estimaciones propias de ocupación promedio (

ANEXO 2) de cada modo de transporte y su factor de emisión (gramos de dióxido de carbono por kilómetro recorrido) en la ZMVM. También se hizo uso de las distancias entre distritos (ITDP, 2013) para así estimar (junto con la encuesta Origen Destino de 2007) el total de kilómetros generados en cada modo y en cada distrito. Teniendo la cantidad de kilómetros generados por modo, el factor de

emisión y la ocupación promedio, se procedió a hacer los cálculos descritos en la metodología (Paso 5, en la sección “Modelo parte B”).

Tabla 8 Modelo IV: Relación densidad y transporte público con las emisiones de GEI. Modelo significativo al 99%.

VARIABLES	(1) log_co2
log_dens	-0.742*** (0.155)
log_lineastp	-0.158 (0.102)
Constant	8.761*** (0.785)
Observations	153
R-squared	0.152

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

El modelo IV tiene su base en los modelos que se han ido presentado anteriormente, pues relaciona cambios en la estructura urbana y el transporte con las emisiones de GEI, que están directamente asociadas a la cantidad de kilómetros generados por zona. En la Tabla 8 se puede leer que ante un aumento de 10% en la densidad promedio de en un distrito, las emisiones de CO₂ en cada zona disminuirían en un 7.4%. A su vez, se puede observar que ante un aumento de 10% en la cantidad de líneas de transporte público las emisiones disminuirían un 1.6% en promedio en cada zona. Sin embargo, esta variable tan solo es significativa al 87.5%.

Ahora bien, teniendo en cuenta el ingreso predominante de la zona (según la calificación realizada por ITDP México (2014)) , la relación entre las emisiones de CO₂ varía entre zonas de acuerdo a esta variable. Para tenerla en cuenta, fue necesario agrupar los niveles de ingreso en 4 grupos: alto, medio, bajo y muy bajo.

Tabla 9. Relación de niveles de ingreso.

Relación nivel de ingreso	
Alto	AB y C+
Medio	C y C-
Bajo	D+
Muy bajo	D- y E

Para entender la Tabla 9, es necesario explicar las variables que se usaron.

Tabla 10 Modelo IV, con ingreso⁹.

VARIABLES	(1) co2 emitido
densidad	-3.969*** (0.845)
rutas_tp	-1.255** (0.609)
densidad_ing_alt	3.132** (1.211)
densidad_ing_med	4.072*** (1.078)
densidad_ing_bajo	2.236** (1.078)
Ingreso alto	-343.3** (144.4)
Ingreso medio	-556.2*** (153.5)
Ingreso bajo	-269.7* (143.3)
Constant	750.9*** (109.1)
Observations	153
R-squared	0.209

Standard errors in parentheses

*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

El principal insumo del modelo presentado en la Tabla 109 es que se puede identificar que para los ingresos Muy bajos (D- y E), el rendimiento marginal de la densidad en cuanto a la emisión de CO₂ en cada zona es significativamente mayor a la del resto de niveles de ingreso. Es decir, si se densifica una zona de niveles de ingreso predominantes muy bajos, en promedio, se puede esperar que las emisiones de GEI disminuyan en mayor medida que para las zonas con el resto de niveles de ingreso predominantes. Asimismo, para el nivel de ingreso Bajo, también hay una diferencia significativa en este comportamiento con respecto a las zonas con nivel de ingreso predominante medio. Según la misma 10, en promedio, una zona de ingresos muy bajos actualmente emite, en

⁹ La base para la variable ingreso fue el nivel “Muy Bajo”.

promedio, más GEI que las zonas de ingresos predominantes bajo, medio o alto, dejando todo el resto de variables igual.

En conclusión, según las relaciones empíricas presentadas en la Tabla 1010, un proyecto de densificación tendría mayor impacto en la emisión de GEI si se prioriza las zonas con niveles de ingresos bajos y muy bajos. (D+, D- y E).

A continuación se muestra el modelo presentado en la 10 gráficamente en la Figura 7

Figura 7 Relación de emisiones de toneladas de dióxido de carbono diario y la densidad promedio de los distritos según nivel predominante de ingreso en la zona.

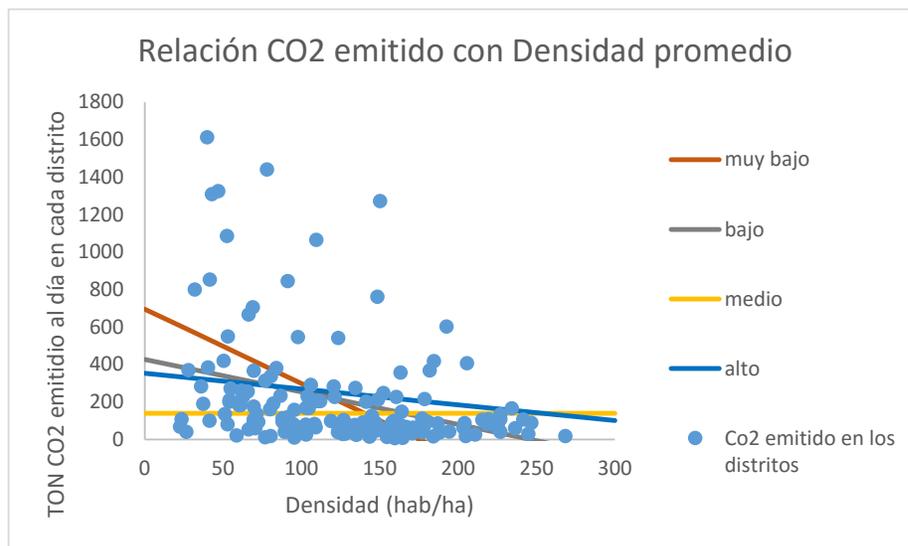
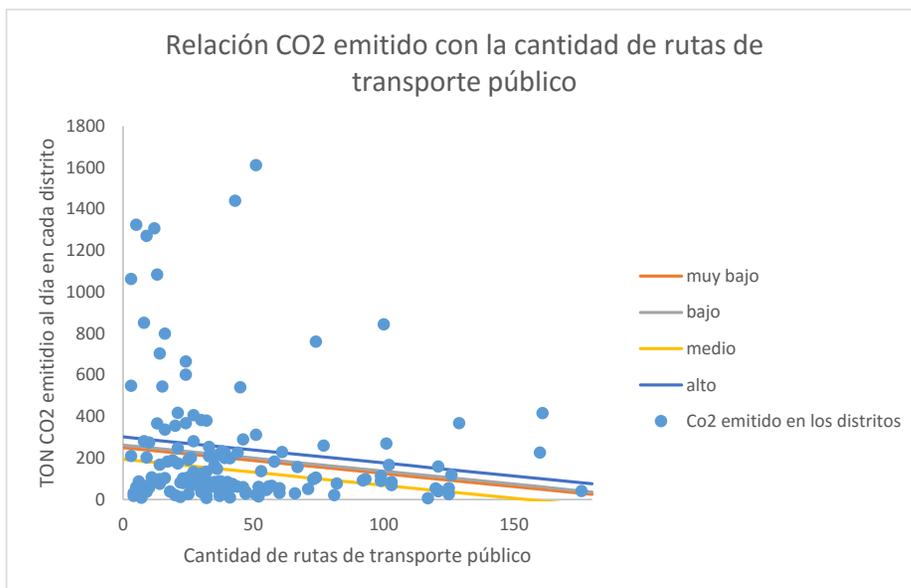


Figura 8 Relación de emisiones de toneladas de dióxido de carbono diario y cantidad de rutas de transporte público de los distritos según nivel predominante de ingreso en la zona.



En las Figuras Figura 7 y

Figura 8 se muestra gráficamente la relación de las emisiones de CO₂ con la densidad y la cantidad de líneas de transporte público, respectivamente. En la Figura 7 se puede observar la diferencia en la pendiente de las líneas que relacionan la emisión de GEI con la densidad promedio. A mayor pendiente de las rectas se infiere que ante un cambio en la densidad, habrá un mayor cambio en la emisión de GEI. Como se puede apreciar, las zonas con ingresos predominantemente muy bajos son las que mayor impacto tendrían ante una densificación hipotética, como ya se había discutido anteriormente analizando los resultados de la Tabla **Tabla 10** Modelo IV, con ingreso.. También se puede observar en la Figura 9 que no hay diferencia significativa entre el cambio de emisiones ante la inclusión de más líneas de transporte público, como se puede apreciar en el análisis de la misma tabla.

Se recomienda usar el resultado presentado en la Tabla 8 para estimar los cambios en las emisiones a raíz de cambios en la estructura urbana (densificación) o de la inclusión de líneas de transporte público en algún distrito. Además, con las emisiones por distrito (ANEXO 1) se pueden estimar la nueva cantidad de emisiones a nivel local (una o algunas zonas) o a nivel de ciudad.

Utilizando esta herramienta, se presenta un ejemplo del cálculo de emisiones ahorradas a causa de proyectos densificación urbana e inclusión de líneas de transporte público de dos distritos de la ZMVM en la siguiente tabla.

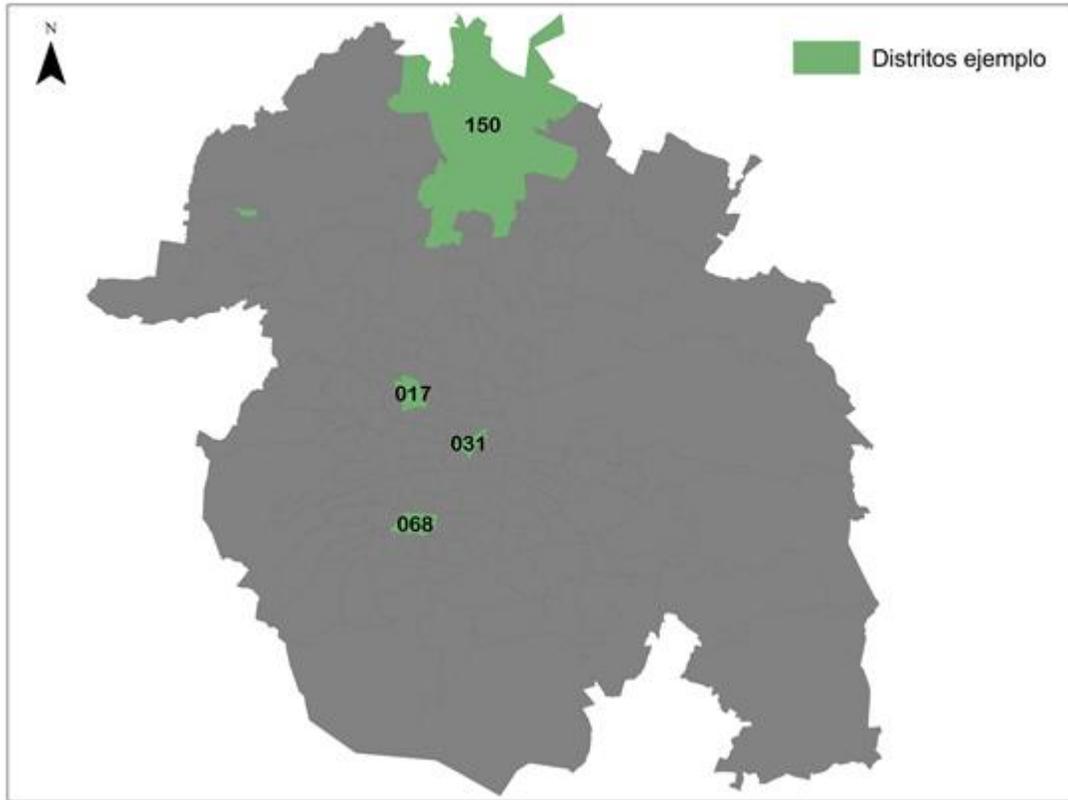
Tabla 11 Ejemplo cálculo de emisiones ahorradas ante cambios en la densidad y la cantidad de líneas de transporte público en 4 distritos.

Distrito	densidad (habitantes /hectárea)	Cant rutas	CO ₂ emitido/ día	Densidad nueva (hab/ha)	Líneas de TP nuevas	Cambio densidad (%)	Cambio Líneas de TP	CO ₂ nuevo	Ahorro en emisiones (Ton CO ₂ /día)
150	39.8	51	1611.09	47.76	61.00	20%	20%	1333	277.84
017	52.91	38	79.47	63.49	45.00	20%	18%	66	13.03
031	149.52	71	50.05	179.42	85.00	20%	20%	41	8.67
068	78	43	1440.30	93.60	51.00	20%	19%	1202	238.04

En la Tabla 11 se muestra un ejemplo de la diferencia en las emisiones de cuatro distritos de la zona de estudio. Los distritos utilizados para el ejemplo son Vallejo (distrito número 17), Moctezuma (31), Viveros (68) y Zupango (150) (Figura). De la tabla anterior se puede apreciar cómo cambiarían las emisiones en cada uno de estos distritos ante un cambio de 20% (valor arbitrario para el ejercicio) tanto en la densidad como en la cantidad de rutas de transporte público. Allí se ve que en los distritos 150 y 68 el cambio en densidad y transporte público impacta en mayor

medida que en los otros dos distritos. Para este cálculo se utilizaron las elasticidades presentadas en la Tabla 8.¹⁰

Figura 9:
Mapa de distritos utilizados en el ejemplo.



Co-beneficios asociados

A partir de los modelos aquí presentados (II, III y IV) se puede inferir que la estructura urbana incide en los Kilómetros-Vehículo Recorridos (KVR) ya que la densidad se relaciona positivamente con la captación de viajes (viajes con origen y destino en la misma zona) dentro del área de estudio. Esto implica que, en promedio, los viajes urbanos van a ser más cortos. Además, los modelos III a b y c muestran que la tasa de generación de viajes aumentaría en mayor medida en transporte público que en automóvil, por ende, se esperaría que más viajes se hagan en transporte público en lugar de en modos motorizados individuales. Esto se confirma a su vez en el modelo IV debido a que las emisiones de dióxido de carbono están relacionadas a la eficiencia energética (Soytas, 2007),

¹⁰ La herramienta para hacer cálculos se entrega adjunta en una tabla de Excel.

Además, el modo menos eficiente energéticamente es el automóvil (Litman, 2014), y a su vez, este modo es el que más emite GEI por kilómetro-pasajero transportado (

ANEXO 2).

Este resultado permite concluir que una política enfocada en hacer cambios en la estructura urbana con el fin de reducir las emisiones de GEI, va a implicar en **co-beneficios** adicionales en término de reducción en la cantidad de externalidades negativas en las que se incurren diariamente a causa del transporte urbano. Esto se da debido a que los KVR están relacionados con las principales externalidades negativas como la **congestión, emisión de contaminantes locales, accidentalidad vial, tiempo invertido en viajar** (costo también interno), daño de infraestructura, enfermedades respiratorias, entre otras (Santos et al., 2010)(ITDP México, 2012).

En el caso de la accidentalidad vial, si se reducen los KVR a su vez se disminuiría la probabilidad de incurrir en accidentes si menos actores están en la vía¹¹. Asimismo, con respecto al tiempo invertido en transportarse, se estima que si las distancias de viaje son menores, y todas las otras variables que afecten el tiempo de viaje (infraestructura, modo, hora del viaje, etc.) permanecen constantes, la sociedad en general invertirá menos tiempo transportándose (Santos et al., 2010). Según Litman (2011), los costos externos que están directamente relacionados a la cantidad de recorridos (KVR) son: subsidios de operación, accidentes, costos de parqueo, congestión, infraestructura vial, polución del aire, emisión de GEI, ruido, consumo de recursos, y efecto barrera. Por ende, cuando se planea enfocado a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, indirectamente se incurrirán en co-beneficios a causa de múltiples disminuciones en las externalidades del transporte asociadas a la cantidad de kilómetros recorridos en vehículos (KVR).

En este sentido, con el modelo realizado, el resultado principal para calcular co-beneficios sería la reducción de KVR, de los cuales se desprenderían cálculos adicionales para hacer correspondiente la estimación de co-beneficios. La elaboración de un modelo completo de co-beneficios implica conseguir información adicional a la encontrada aquí y que no se compiló en este ejercicio. La principal diferencia radica en la relación con el espacio de los fenómenos y las variables que puedan afectar la creación de las externalidades a analizar a manera de co-beneficios.

Por ejemplo, para calcular cambios en la accidentalidad vial no sería correcto calcularlo por zona como se hizo para estimar las emisiones de GEI, ya que puede depender más de las rutas que se tomen en los viajes de una zona y el diseño vial en estas rutas, factores que no se podrían tener en cuenta al hacer una regresión en un momento del tiempo (“cross sectional”). La información necesaria para estos cálculos es, además, de tipo longitudinal (a lo largo del tiempo) y difícil de compilar. Entre estos datos estaría (por ejemplo, para el caso de la accidentalidad): kilómetros vehículo recorridos en un período de tiempo para calcular o estimar las asociaciones entre esta

¹¹ En promedio, si se recorren menos distancias (menos KVR) se espera que hayan menos actores en la vía.

variable y las externalidades que dependen de los kilómetros viajados. Esta información no está disponible e implica trabajo de campo considerable.

Por esta razón, para generar modelos que calculen co-beneficios, se necesitaría de información que no se tiene y análisis más profundos para entender la naturaleza de cada beneficio que se quiera medir.

Sin embargo, a partir de los datos que ya se tienen, y la teoría que asocia los KVR con la generación de externalidades (Litman, 2011) se puede construir un modelo que de una idea de los co-beneficios de las políticas enfocadas a la reducción de emisiones de GEI.

A continuación se muestra un modelo de regresión que asocia la cantidad de kilómetros en automóvil generados en cada zona con la densidad promedio y la cantidad de rutas de transporte público presentes en cada zona.

Tabla 12: Modelo que relaciona los VKR generados en cada zona con la densidad y la oferta de transporte público. Modelo significativo al 99%.

VARIABLES	(1) log_km_auto
log_dens	-0.764*** (0.161)
log_lineastp	-0.118 (0.106)
Constant	17.02*** (0.811)
Observations	153
R-squared	0.144

Standard errors in parentheses
*** p<0.01, ** p<0.05, * p<0.1

En la Tabla 12 se muestra que, en promedio, si la densidad aumenta en 10% en una zona, se esperaría que se la generación de kilómetros-vehículos al día disminuirá en 7.64%, Además, ante un aumento de 10% en las líneas de transporte público, en promedio, se esperaría que se recorrieran un 1.2% menos de kilómetros en automóvil.

A partir de este resultado, complementado con otros modelos que ayuden a entender la relación de los KVR con la generación de externalidades se puede tener un esquema integral para cuantificar la generación de beneficios de una política de reducción de emisiones como la que se trata en el

presente informe. Tabla 12: Modelo que relaciona los VKR generados en cada zona con la densidad y la oferta de transporte público. Modelo significativo al 99%.

Resumen de resultados

Se obtuvieron relaciones empíricas para determinar en qué medida la estructura urbana cambia los patrones de viaje (captación de viajes, modo utilizado, cantidad de viajes) y, por ende, como cambian las emisiones de GEI diarios de los viajes generados en cada zona e implícitamente como se generan co-beneficios reduciendo las externalidades negativas del transporte.

Las variables no explican del todo estos cambios, pues este tipo de modelos tienen varios supuestos (anexo 3) que simplifican los cálculos y a su vez asumen errores aceptables para calcular las relaciones empíricas entre las variables presentadas. Sin embargo, puede usarse para hacer una estimación de los efectos en las emisiones de GEI ante un cambio de alguna de las variables usadas en estos modelos.

Se estimó que para un día en 2007 (año de la encuesta) se emiten 25,286 toneladas diarias de CO₂ a causa de los viajes urbanos en la ZMVM, siendo los viajes en automóvil los responsables del 75% de estas emisiones con tan solo el 21% de los kilómetros recorridos del total de la ciudad. Esta aproximación proviene de una simplificación en el cálculo del total de emisiones que corresponde al estimar los kilómetros por modo total recorridos en un día en la ZMVM, con base en la encuesta OD de 2007, y a partir de ahí junto con los factores de emisión de gramos de CO₂ por kilómetro y la ocupación promedio de cada modo se hace la estimación para las emisiones de la zona.

Por otro lado, se puede esperar –a partir de la evidencia empírica encontrada y la teoría– que existan co-beneficios que se obtendrían a causa de la reducción en el total de kilómetros recorridos en vehículo (KVR). Es necesario realizar modelos para cada externalidad a estudiar, teniendo en cuenta las consideraciones necesarias según las características de las variables a analizar en estos modelos.

Conclusiones y recomendaciones

La relación indirecta entre usos del suelo y la emisión de GEI se puede aproximar mediante información empírica que relaciona el transporte con los otros dos componentes. Poder entender estas relaciones constituye un factor importante para la toma de decisiones en la planeación urbana para disminuir el impacto ambiental que el transporte urbano genera.

La metodología propuesta constituye una herramienta de fácil uso para estimar beneficios ambientales en términos de disminución de emisiones de GEI. Estas estimaciones se hacen con base en información empírica, por lo tanto, es necesario tener en cuenta que estas predicciones no

pueden ser de tipo determinísticas sino que constituyen una aproximación. Una representada por la relación empírica entre las variables de los modelos establecidos.

Se recomienda, a partir de los datos, hacer análisis de sensibilidad donde se evalúe para cada escenario los impactos ambientales en los que se va a incurrir para poder tener conclusiones más realistas sobre los cambios en GEI.

En cuanto a los datos utilizados para realizar el modelo, se encontraron grandes dificultades para obtener información consistente para cada zona dentro de la ZMVM, por lo que se decidió usar al Distrito como zonificación de análisis. Esto puede traer varias ventajas y desventajas. La principal ventaja fue poder contar con un amplio número de variables para hacer los análisis y lograr quizá una agregación espacial para disminuir errores en recolección de datos o inconsistencias que se hubieran presentado si se hubiera usado una zonificación por AGEB.

Por otro lado, tiene la desventaja de tener algunos datos tan agregados que perdió variabilidad en algunas características de cada zona. Por ejemplo, en el caso del ingreso predominante, fue necesario agrupar diferentes niveles de ingreso para poder tener esta variable en cuenta, por lo que se pudo haber perdido capacidad de análisis con respecto a este tema. En el futuro se recomienda hacer este mismo ejercicio con una desagregación más pequeña para poder comparar los resultados y comprobar esta hipótesis que pudo generar sesgos en los resultados.

En cuanto a la recolección de datos, la especificación original de la modelo descrita en la metodología tuvo que ser cambiada considerablemente debido a que la mayoría de los datos no se encontraban disponibles. Por ejemplo para la ZMVM solo se tenían datos de usos del suelo para el Distrito Federal, lo que imposibilitó usar estas variables en los modelos. En las zonas metropolitanas de Aguascalientes y Guadalajara, la no existencia de datos imposibilitó el cálculo de los modelos. En Guadalajara, no se tenía una encuesta con los viajes diarios en la zona metropolitana que contara con ajustes estadísticos, por lo que era imposible hacer una estimación de emisiones totales en cada zona con la metodología aquí propuesta. Además esto sesga la muestra haciendo que no sea representativa para el área de estudio en la que se pretendía hacer el modelo.

Por otro lado, en Aguascalientes no se contaba con información de la oferta de transporte público ni una zonificación adecuada. Esto también hizo que no fuera conveniente calcular estos modelos para la zona de estudio de la zona metropolitana de Aguascalientes. El inventario de los datos que se tienen se presenta en el anexo 5.

De esta manera, se identificó una falencia importante en cuanto a la disponibilidad de datos para este tipo de análisis. En primera instancia, sería ideal poder contar con una encuesta Origen-Destino que sea significativa a un nivel de zonificación más pequeño que los distritos. Esto con el fin de poder captar más variaciones a causa de características socioeconómicas, demográficas, etc. Además, sería ideal encontrar estas zonas haciendo uso de un método de conglomerados como el de Duque et al. (2011), que buscan minimizar la varianza de las características dentro de cada

conglomerado de zonas contiguas (en el caso de México, los conglomerados podrían tener varias AGEB). Con esto se disminuiría el error al analizar por zonas la encuesta origen-destino y se podrían capturar más las características de cada zona. Así se podría construir modelos, como el que se presentó en este documento, con más variables explicativas (por ejemplo, el ingreso promedio podría incluirse de manera más desagregada). Además de esto, sería útil que en las encuestas de movilidad realizadas se tenga en cuenta con igual importancia a los modos no motorizados y a los otros modos. En el caso de la encuesta Origen-Destino de la ZMVM, no se preguntaron los viajes a pie y esto hubiera podido ser un insumo debido a que sería útil también saber si, como dice la teoría, la estructura urbana influye en este tipo de viajes en la ZMVM. Este análisis podría complementar lo que se encontró en el presente estudio a favor de las políticas de usos del suelo con el fin de estimar la reducción en emisiones de GEI. También sería valioso en el futuro contar con información de tipo longitudinal o panel¹² ya que este tipo de encuestas son las que mejor capturan los efectos de políticas de transporte y representan un menor costo de aplicación (Kitamura, 1990).

En cuanto a datos que serían útiles de tener para poder estimar co-beneficios de las políticas del suelo, como sería el caso de la accidentalidad, sería útil poder buscar una relación empírica entre los KVR -que se encontró la asociación que tienen con la estructura urbana- con esta externalidad negativa del transporte urbano. Para esto se requeriría información de tipo longitudinal (a lo largo del tiempo) sobre los KVR generados en la zona de estudio y la cantidad de víctimas a causa de accidentes dentro de la misma zona y para el mismo periodo de tiempo analizado. Por otro lado, en el caso de estimar el tiempo ahorrado, sería necesario tener en cuenta las características del viaje, de quien lo hace, además de los modos de transporte (rutas y tiempos) (Shires & de Jong, 2009). Por esta razón, complementario a la encuesta se necesitaría un modelo de transporte que pueda simular estas diferentes características sumadas a entender mejor el cambio modal y de patrones de viaje a causa de cambios en la estructura urbana.

En resumen, la constante durante el desarrollo de este análisis fue la falta o inconsistencia de datos, lo cual delimitaron considerablemente los análisis que se pretendían hacer. Sin embargo, los resultados fueron satisfactorios en la medida que permiten cumplir con el objetivo de estimar cambios de emisiones a causa de cambios en la estructura urbana.

¹² Para mayor información sobre encuestas panel, revisar “Panel Análisis in Transportation Planning: An Overview” de Ryuichi Kitamura (1990)

Glosario

- **Accesibilidad:** Disponibilidad de oportunidades generadas como resultado de la oferta de transporte y el uso del suelo (Bocarejo & Oviedo, 2012).
- **Co-beneficio:** Efectos adicionales a la reducción de GEI, en términos de externalidades del transporte. (OECD)
- **Densidad (poblacional):** Cantidad promedio de personas por unidad de área dada. En este informe se usó como la cantidad de personas promedio en una hectárea de cada Distrito.
- **Diferencia estructural:** Cambio en la especificación de dos modelos (variables usadas y tipo de asociación entre la variable dependiente y las independientes) (Rosales & Bonilla, 2006)
- **Externalidad:** Costo o beneficio que afecta una entidad que no escogió en incurrir en ese costo o beneficio. (Buchanan, 1962)
- **Modelo econométrico:** Es un modelo que representa un fenómeno económico real de manera simplificada y se hace en términos matemáticos. En el presente informe se usaron asociaciones lineales para todas las variables con el método de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO) (García Pérez, 2012)
- **Uso de suelo:** Actividad para la que es destinada una construcción según la legislación local
- **Vehículo-Kilómetro Recorrido:** Cantidad de kilómetros recorridos por los todos los vehículos de un área geográfica específica y un periodo de tiempo determinado. (Gongora Pérez, 2012)

Bibliografía

Bocarejo, J. P., & Oviedo, D. (2012). Transport accessibility and social inequities: a tool for identification of mobility needs and evaluation of transport investments. *Journal of Transport Geography*, 24, 142–154.

- Duque et al., J. C. (2011). The p-Regions problem. *Geographical Analysis, Volume 43*(Issue 1), Pages 104–126.
- Eastern Research Group. (2003). MOBILE6-Mexico Documentation and User's Guide.
- García Pérez, J. (2012). Los modelos econométricos y su problemática. *Universidad de Almería*.
- Góngora Pérez, J. P. (2012). Indicador Kilómetros-Vehículo Recorridos (KVR).
- ITDP México. (2012). Transforming Urban Mobility in México.
- ITDP México. (2013). Transporte Público Masivo en la ZMVM: Proyecciones de demanda y soluciones al 2024.
- ITDP México. (2014). Nota metodológica - DOT DF.
- Kitamura, R. (1990). Panel analysis in transportation planning: An overview. *Transportation Research Part A: General.*, 24(6), 401–415. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0191260790900322>
- Litman, T. (2011). Transportation Cost and Benefit Analysis. *Victoria Transport Policy Institute*.
- Litman, T. (2014). Energy Conservation and Emission Reduction Strategies. *Victoria Transport Policy Institute*.
- Prabhu, A., & Pai, M. (2012). Buses as Low-Carbon Mobility Solutions for Urban India: Evidence from Two Cities.
- Rosales et al., R. (2009). Intermediate economics: Theory and applications. *Facultad de Economía, Universidad de Los Andes*.
- Rosales, R., & Bonilla, J. (2006). Introducción a la Econometría. *Apuntes de Clase CEDE*, 97.
- Santos et al., G. (2010). Part I: Externalities and economic policies in road transport. *Research in Transportation Economics*.
- Shires, J. D., & de Jong, G. C. (2009). An international meta-analysis of values of travel time savings. *Evaluation and Program Planning, Volume 32*(Issue 4), pages 315–325.
- Soytas. (2007). Energy consumption, income, and carbon emissions in the United States. *Ecological Economics*.
- Wegener et al., M. (1999). Land use and transport interaction.

Anexos

ANEXO 1: Emisiones de GEI por distrito (Ton/día).

Distrito	CO2_diario (Ton)	Distrito	CO2_diario (Ton)	Distrito	CO2_diario (Ton)
001	225,7	053	156,9	104	85,4
002	289,8	054	199,6	105	43,5
003	84,2	055	367,7	106	74,4
004	601,2	056	69,2	107	117,9
005	132,5	057	21,4	108	28,3
006	107,0	058	25,4	109	63,5
007	202,4	059	84,7	110	70,5
008	136,5	060	62,2	111	93,6
009	66,0	061	81,6	114	54,0
010	133,6	062	59,7	115	107,2
011	124,7	063	23,8	116	16,8
012	211,9	064	89,5	117	61,9
013	98,0	065	209,2	118	59,2
014	83,7	066	43,0	119	104,9
015	62,4	067	80,0	120	28,9
016	225,9	068	1440,3	121	79,7
017	79,5	069	541,2	122	246,7
018	25,2	070	1270,5	123	61,3
019	39,4	071	202,9	124	75,3
020	36,5	072	366,1	125	544,8
021	30,5	073	281,1	126	92,0
022	5,7	074	10,1	127	231,8
023	39,1	075	81,7	128	336,8
024	15,0	076	105,9	129	167,1
025	17,2	077	703,8	130	92,0
026	56,7	078	174,2	131	382,9
027	60,5	079	210,2	132	11,9
028	83,7	080	78,7	133	62,5
029	163,9	081	188,8	134	38,7
030	214,1	082	274,0	135	45,1
031	50,0	083	191,0	136	65,3
033	40,8	084	851,9	137	226,4
034	76,4	085	1084,8	138	98,3
035	416,4	086	20,6	139	259,9
036	54,8	087	17,2	140	844,1

037	7,0	088	37,9	141	760,2
038	84,7	089	31,5	142	89,3
039	109,6	090	101,9	143	8,2
040	87,9	091	183,0	144	182,9
041	102,6	092	270,1	145	548,7
042	281,2	093	228,1	146	417,9
043	355,8	094	311,8	147	51,6
044	103,0	095	112,4	148	379,7
045	253,8	096	97,6	149	367,8
046	107,2	097	159,2	150	1611,1
047	69,6	098	166,5	151	665,6
048	46,8	099	52,6	152	199,3
049	86,9	100	64,4	153	798,9
050	406,3	101	36,3	154	1324,0
051	59,4	102	14,4	155	1307,5
052	147,7	103	40,9	156	1063,5

ANEXO 2: Factores de emisión por modo y ocupación promedio.

Modo	gr co2/km	ocupación_promedio
Moto	92	1
autobus	1458	50
automovil	202,12	1
colectivo	892,00	40
metrobus	685,16	120
Taxi	202,12	1

Fuente: factores de emisión de MOBILE6-MÉXICO de la EPA para la ZMVM. Ocupación promedio: estimada.

ANEXO 3: Supuestos de los modelos econométricos lineales con múltiples variables

Supuestos de los modelos econométricos lineales con múltiples variables. (Rosales & Bonilla, 2006):

- Los parámetros que acompañan las variables independientes son lineales.
- Las variables independientes no son estocásticas.
- El valor medio del error del modelo es cero.
- La varianza de las observaciones de las variables independientes es constante (homoscedasticidad).
- No hay correlación entre las observaciones de las variables independientes (no autocorrelación).

- f. No hay covarianza entre el error y las observaciones de las variables independientes.
- g. El número de observaciones es mayor al número de parámetros a usar en el modelo.
- h. Los valores de las observaciones de las variables independientes tienen variabilidad.
- i. El modelo está especificado de manera correcta, es decir, se escogieron las variables independientes y la forma funcional correctamente (lineal).
- j. No hay correlación perfecta entre las variables independientes.

Prueba Ramsey-RESET para detectar errores en la especificación de los modelos (Rosales et al., 2009) en el modelo IV.

Con la prueba de Ramsey-RESET se puede detectar si un modelo fue especificado incorrectamente. Para este fin se usa un modelo auxiliar al que se le incluyen variables adicionales que corresponden al valor de predicción de la variable dependiente, calculado a partir del modelo original, elevado al cuadrado y al cubo. Si se puede demostrar que estas variables no corresponden a un cambio estructural entre las dos regresiones (auxiliar y original) se concluye que el modelo no está mal especificado.

De esta manera, en la Figura 9 se muestran los resultados de correr la regresión auxiliar, en donde se observa que las dos variables incluidas no son significativas. Sin embargo, es necesario hacer una prueba haciendo uso del estadístico F para comprobar si hay una diferencia estructural entre el modelo original y la regresión auxiliar.

```
. reg co2km_todos densidadhabkm2 rutas_tp co2_pred2 co2_pred3
```

Source	SS	df	MS	Number of obs = 153		
Model	1742256.08	4	435564.02	F(4, 148) =	5.55	
Residual	11613030.5	148	78466.422	Prob > F =	0.0003	
Total	13355286.5	152	87863.7272	R-squared =	0.1305	
				Adj R-squared =	0.1070	
				Root MSE =	280.12	

co2km_todos	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf. Interval]	
densidadhabkm2	-.6754288	11.97142	-0.06	0.955	-24.33242	22.98157
rutas_tp	-1.990664	9.417565	-0.21	0.833	-20.60093	16.6196
co2_pred2	-.0018146	.011355	-0.16	0.873	-.0242535	.0206243
co2_pred3	1.37e-06	5.25e-06	0.26	0.794	-9.01e-06	.0000117
_cons	737.5964	1873.943	0.39	0.694	-2965.545	4440.738

Figura 9: Regresión auxiliar para prueba Ramsey-RESET

Para determinar si existe se usa la siguiente fórmula para el estadístico F, donde SCE_e es la suma de los cuadrados del error del modelo restringido y SCE_{NR} del no restringido. K es el número de variables, n la cantidad de observaciones y l es el número de restricciones (en este caso, igual a la cantidad de variables introducidas en la regresión auxiliar).

$$F = \frac{(SCE_R - SCE_{NR})/l}{SCE_{NR}/n - k - 1} \sim F_{l, n-k-1}$$

Figura 10: Fórmula para calcular el estadístico F (Rosales et al., 2009)

Con esta fórmula, se obtuvo un estadístico F de 0.59, menor a 3.09 que es el valor de este estadístico para (2, 1147) grados de libertad y una confiabilidad del 95%. Lo que implica que hay evidencia de que el modelo está bien especificado.

ANEXO 4. Inventario de datos necesarios para el modelo.

Inventario de datos			
Se tiene			
Se tiene pero con falencias en los datos			
No se tiene			
Item	Aguascalientes	Guadalajara	Valle de México
Encuesta OD		No tiene ajuste estadístico (factores de expansión y/o imputaciones)	No tiene información de viajes a pie
Viajes por modo en cada zona	No se tiene zonificado apropiadamente	Por zonas del modelo de ITDP	Significativa a nivel distrito
Matriz OD de viajes por modo entre zonas			
Matriz OD de distancias entre zonas			
Matriz OD de tiempos entre zonas			
Zonas	AGEB	Zona de transporte (modelo de ITDP)	Distritos
Empleos por zona			
Poblacion por zona			
Usos del suelo			Solo para el DF

% cubierto por TP por zona (diferenciado para estructurado y no)		se tiene la capa de transporte y zonas	se tiene la capa de transporte y zonas
Población cubierta por tp 800			
Número de rutas			
Algo sobre infraestructura de bici o tenencia			
Ingreso predominante de la zona			
Factores de emisión			



PROGRAMA PARA EL DESARROLLO
BAJO EN EMISIONES DE MÉXICO (MLED)

MODELO PARA LA ESTIMACIÓN DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) MEDIANTE POLÍTICAS
PÚBLICAS ASOCIADAS AL DESARROLLO URBANO (DENSIFICACIÓN Y USOS MIXTOS DEL SUELO)

www.mledprogram.org

