

Transporte urbano y emisiones de gases de efecto invernadero en América Latina. Una modelización de las emisiones de la movilidad urbana aplicada a Bogotá y Lima

Urban transport and greenhouse gas emissions in Latin America. Modelling urban mobility emissions applied to Bogota and Lima

Hugo Thomas (*Ingeniero civil por la École Nationale des Ponts et Chaussées, Francia*)

hugo.thomas@univ-rennes2.fr /  orcid.org/0000-0002-7762-4976

Resumen

En América Latina, el transporte urbano tiene una enorme influencia en la emisión de gases de efecto invernadero responsables del cambio climático. Las políticas públicas intentan incluir la mitigación del cambio climático en la planificación urbana mediante planes de acción; sin embargo, carecen de herramientas para calcular las emisiones y evaluar el efecto de las medidas propuestas. Las encuestas de movilidad urbana son una fuente de datos pertinente para conocer las características de los viajes de las personas. Este artículo presenta una metodología de modelización de emisiones basada en encuestas de movilidad cruzadas con las características de los vehículos y de los combustibles, con el fin, aunque no exclusivo, de producir datos que respalden las políticas públicas. Las herramientas del análisis espacial se aprovechan también para crear mapas y cartogramas que representan de forma original las desigualdades ecológicas.

Palabras clave

Movilidad urbana, encuestas de movilidad, políticas públicas, modelo de emisiones, desigualdades ecológicas.

Abstract

In Latin America, urban transport is a major greenhouse gas emitter, responsible for climate change. Public policies are trying to take into account climate change mitigation within urban planning by means of action plans. However, they lack the tools to calculate the emissions and estimate the effect of the measures they set up. Urban mobility surveys are a relevant source of data to know people's travel patterns. This article develops an emission modelling methodology based on mobility surveys and characteristics of fuels and vehicles, in order to, but not restricted to, produce data to support public policies. In addition, we use the spatial analysis tools to create maps and cartograms that depict the ecological inequalities in an original way.

Keywords

Urban mobility, mobility surveys, public policies, emissions modelling, ecological inequalities.

Revista ENSAYO - Arquitectura PUCP Estudios de arquitectura, urbanismo y territorio

Número 4 · Año 2024 · ISSN 2710-9726 e-ISSN 2710-2947

Pensar La Movilidad Sostenible En Periferias Populares De Las Metrópolis De América Latina

Editores Pablo Vega Centeno, Jérémy Robert



La siguiente obra ha sido publicada bajo las condiciones de la Licencia Creative Commons CC BY-NC-SA 4.0, la cual autoriza a terceros distribuir, mezclar, ajustar y construir a partir de la misma, con la excepción de fines comerciales, siempre que le sea reconocida la autoría de la creación original y que dichas creaciones se licencien bajo las mismas condiciones. Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú 2021-02820

TRANSPORTE URBANO Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN AMÉRICA LATINA. UNA MODELIZACIÓN DE LAS EMISIONES DE LA MOVILIDAD URBANA APLICADA A BOGOTÁ Y LIMA

Hugo Thomas

HUGO THOMAS es ingeniero civil por la École Nationale des Ponts et Chaussées (Francia). Cursa un doctorado (PhD) en Geografía en cotutela en la Universidad Rennes 2 (Francia), codirigido por Vincent Gouëset y Florent Demoraes, y en la Universidad Los Andes, dirigido por Luis Ángel Guzmán. Sus investigaciones se centran en las posibilidades de evolucionar hacia una movilidad más sostenible en Bogotá y Lima.

ACV	análisis del ciclo de vida
Ademe	Agencia Francesa para la Transición Ecológica
BRT	bus de tránsito rápido
DOTS	desarrollo orientado al transporte sostenible
EODH	Encuesta Origen-Destino de Hogares, Bogotá
GEI	gases de efecto invernadero
GNV	gas natural para vehículos
GPC	Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emissions Inventories
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
Mínam	Ministerio del Ambiente, Perú
Mínem	Ministerio de Energía y Minas, Perú
SITP	Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá
SDM	Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética, Colombia
UTAM	unidad territorial de análisis de la movilidad en Bogotá
ZAT	zona de análisis del tráfico

① INTRODUCCIÓN

En las ciudades latinoamericanas, el transporte urbano es un importante emisor de gases de efecto invernadero (GEI). Representa hasta el 40% de las emisiones en Lima y el 48% en Bogotá (Municipalidad de Lima, 2021; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021).¹ Aunque estas ciudades van elaborando poco a poco políticas públicas que incluyen la mitigación del cambio climático, y en los últimos años adoptaron, por lo tanto, planes de acción climática, los tomadores de decisión carecen de herramientas y datos confiables para estimar mejor las emisiones y así adoptar medidas acertadas. Debido a varias razones, estas limitaciones concitan una gran preocupación: por un lado, la urgencia del cambio climático es apremiante, pues América Latina es una región muy vulnerable a sus consecuencias, tal como lo indica el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Pörtner y otros, 2022); y por otro, las carencias en términos de transporte, y sus otras externalidades —contaminación aérea, siniestralidad vial, congestión—, están en el centro de atención de los observatorios urbanos (Lima Cómo Vamos, 2021; Bogotá Cómo Vamos, 2021).

A partir de las décadas de 1990 y 2000, la adopción del enfoque de movilidad sostenible en América Latina trató precisamente de mejorar las condiciones de movilidad de la población urbana, sobre todo de los más pobres, a la vez que reducir sus externalidades negativas (Moscoso, Van Laake, Quiñones, Pardo & Hidalgo, 2019; Espinosa, Márquez, Hidalgo & Franco, 2021). Algunos autores critican la contradicción inherente a este paradigma (Theys & Emelianoff, 2001), mientras que otros discuten sobre las medidas que es necesario

¹ Calculado mediante el Global Protocol for Community-scale Greenhouse Gas Emissions Inventories (GPC) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), tomando en cuenta las emisiones directas (Alcance 1) y las que resultan del consumo de energía secundaria (Alcance 2). Lima, datos de 2015; Bogotá, de 2017.

priorizar (Bourdages & Champagne, 2012). El abanico de políticas públicas analizadas en la literatura y descritas en detalle en los mencionados planes de acción climática suele buscar un equilibrio —o una mezcla apropiada— entre unas medidas orientadas hacia la reducción de la demanda y otras enfocadas en el progreso tecnológico (Wright & Fulton, 2005; Creutzig, 2016; Edelenbosch y otros, 2017; Salas y otros, 2017; Bigo, 2020). Estas políticas públicas tienen un enfoque de movilidad sostenible no limitado a las emisiones de GEI. Las medidas de desarrollo orientado al transporte sostenible (DOTS) —herramientas de planificación que buscan reducir las distancias de viaje a partir del urbanismo (corredores de transporte público, densidad de población y empleo, diversidad de servicios)— se inscriben en esta línea con una gran ambición (Pardo & Calderón Peña, 2014; Ortiz Gómez & Secretaría Distrital de Planeación, 2019; Guzmán & Gómez Cardona, 2021), y no es sorprendente que figuren ampliamente en el plan de acción climática de Bogotá de 2021 (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021); sin embargo, sus beneficios están siendo poco evaluados en términos de reducción de emisiones.

A pesar de que varios autores han tratado de estimar las emisiones del transporte urbano, se suelen presentar resultados agregados por sector (transporte, industria, etcétera). Es el caso del proyecto Huella de Ciudades, en Lima (Salas y otros, 2017), y de los planes de acción climática antes mencionados. En términos metodológicos, varios autores basan el cálculo de las emisiones en la *oferta de transporte*, mediante una estimación de los kilómetros recorridos por los vehículos (Secretaría Distrital de Ambiente, 2021; Minam, 2021). Se podría calcular, en cambio, a partir de la *demanda de transporte*, sobre la base de las encuestas de movilidad, lo que permitiría enfocarse en las prácticas de movilidad de las personas y estudiar los perfiles de emisión (Gouldson y otros, 2015; Bedoya, Marquet & Miralles-Guasch, 2016), en línea con el «giro de la movilidad» (Urry, 2007; Jirón, Lange & Bertrand, 2010).

En Colombia, Bedoya, Márquez y Miralles-Guasch (2016) estimaron las emisiones de GEI del transporte urbano en Medellín a partir de la demanda —es decir, con base en una encuesta de movilidad, en un enfoque *bottom-up*—, lo que permite una comprensión de las emisiones en correspondencia con perfiles socioeconómicos o criterios territoriales. Sin embargo, esta metodología requiere datos actualizados referidos a los factores de emisión de los vehículos. De igual modo, se necesitan estimaciones más precisas de las distancias recorridas por las personas, lo cual exige la resolución de algunas cuestiones metodológicas, a la vez que una evaluación de la confianza que se puede tener respecto de los resultados obtenidos.

La metodología desarrollada en este trabajo busca subsanar algunas limitaciones antes expuestas. Presentamos datos desagregados por modo y lugar de residencia de los hogares sobre las emisiones de GEI a partir de las encuestas de movilidad disponibles en Bogotá y Lima, con un doble propósito: ayudar en la toma de decisiones para cuantificar el impacto crítico de las políticas públicas propuestas, y hacer hincapié en las desigualdades ecológicas (Emelianoff, 2008) entre grupos poblacionales que generan impactos ambientales diferenciados. Sobre todo, en estas líneas tratamos de cuantificar la confianza

que se puede tener en nuestros resultados comparándolos con una estimación de las emisiones totales usando datos de venta de combustibles.

② TERRENOS ESTUDIADOS: BOGOTÁ Y LIMA

Este trabajo se desarrolló en el marco del proyecto de investigación internacional Modural (Movilidad Sostenible en América Latina) —con el apoyo de la Agencia Nacional de Investigación francesa (ANR) y el Instituto Francés de Estudios Andinos (IFEA)—, en el cual se estudian las prácticas de la movilidad urbana sostenible en Lima y Bogotá con un enfoque centrado en sus periferias populares.

Las dos áreas urbanas estudiadas —Lima y Bogotá— destacan por su población comparable: alrededor de diez millones de habitantes cada una. Entre sus características comunes figuran una gran mancha urbana y una fuerte segregación socioespacial que obliga a los hogares más pobres a vivir en la periferia, mientras que los empleos formales se siguen concentrando en el centro (Dureau, Barbary, Gouëset, Pissoat & Lulle, 2007; Paquette, 2017). Este *spatial mismatch* (Gobillon, Selod & Zenou 2007) hace que, en ambas ciudades, las distancias recorridas sean muy largas; y los tiempos de viaje, muy prolongados (Demoraes, Gouëset & Moreno Luna, 2020; Demoraes, Robert, Vega Centeno, Pereyra & Gouëset, 2020). El transporte urbano, marcado por una disminución del transporte público en la partición modal y por la individualización de la movilidad —con el crecimiento del parque de automóviles y, sobre todo, de motocicletas (Montezuma, 2000; Bocarejo, 2015; Secretaría Distrital de Movilidad, 2017; Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020)— contribuye significativamente a la emisión de GEI, entre otras externalidades, tal como hemos visto.²

Ambas ciudades adoptaron planes de acción climática que diagnostican las emisiones actuales, y en sus documentos de planificación buscan asumir una gestión integral del cambio climático. El Plan de Acción Climática 2020-2050 de Bogotá, adoptado en 2021, abarca el territorio del Distrito Capital de Bogotá, que concentra el 75% de la población de la urbe.³ El Plan Local de Cambio Climático de Lima se adoptó en 2022 y abarca el territorio de la provincia de Lima, que concentra el 91% de la población de la urbe.⁴ Estos documentos proponen, entre otras, una serie de acciones que buscan modificar las prácticas de movilidad a partir de la construcción de nuevas infraestructuras

2 Los cambios se evidencian sobre todo en Bogotá, tomando en cuenta las encuestas de movilidad de la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá (SDM) aplicadas en 2005, 2011 y 2019: el transporte público pasó del 64% en 2005 al 37% en 2019, antes de la pandemia. La moto pasó del 0,8% al 4,8% en el mismo período. Los modos activos también aumentaron: peatón, del 16% al 37%; y bicicleta, del 3% al 6%. En Lima y el Callao solo se dispone de la encuesta de 2012, aplicada por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA, 2013), lo que impide establecer comparaciones; sin embargo, de acuerdo con las encuestas de Lima Cómo Vamos, el transporte público pasó del 75% en 2019 al 45% en 2021, después de la pandemia (Lima Cómo Vamos, 2019 y 2021).

3 La diferencia corresponde a los municipios de Cundinamarca que forman parte de la urbe, como Soacha.

4 La diferencia corresponde al Callao.

de transporte público y movilidad activa; y, en el caso de Bogotá, políticas públicas de promoción de la bicicleta y programas de DOTS. El objetivo es cumplir con las metas establecidas a nivel nacional por Colombia y el Perú en el Acuerdo de París de 2015. El análisis del contenido de estos planes y de sus límites estructurales no es, sin embargo, el objeto de este artículo, en el que presentamos a continuación una metodología de evaluación de las emisiones de GEI del transporte urbano.

③ HACIA UNA MODELIZACIÓN DE LAS EMISIONES BASADA EN LA DEMANDA DE TRANSPORTE

La metodología que planteamos desarrolla un método de cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero basado en el análisis del ciclo de vida (ACV) (Warburg, Forell, Guillon, Teulon & Canaguier, 2013) o «de la cuna a la tumba» de la producción de un trayecto. Toma en cuenta las emisiones directas de la combustión (Alcance 1) y las emisiones derivadas de la producción del combustible (Alcance 2). Por la dificultad para conseguir los datos de Colombia y el Perú, omite las emisiones de la producción, importación y fin de vida de los vehículos, que representan del 15 al 20% de las emisiones para los vehículos térmicos (Ademe, 2016).

El principal GEI emitido por el transporte es el dióxido de carbono (CO₂); no obstante, también incluimos el metano (CH₄) y el protóxido de nitrógeno (N₂O).

Las emisiones se calculan con la siguiente fórmula, tal y como lo recomienda el IPCC (2005):

$$\text{emisiones} = \text{actividad} \times \text{factor de emisión}$$

En el caso de este trabajo, «actividad» se refiere a la distancia recorrida en los viajes, en viajeros.kilómetros (viaj.km); y «factor de emisión», a la contaminación asociada, en gramos por viajero.kilómetro (g/viaj.km):

$$\text{emisiones (g)} = \text{distancia (viaj.km)} \times \frac{\text{factor de emisión unitario (g/kWh)} \times \text{rendimiento (kWh/vehíc.km)}}{\text{tasa de ocupación (viaj/vehíc)}}$$

Datos empleados

En este artículo nos concentramos en la estimación de las emisiones en Bogotá porque la última encuesta de movilidad realizada en esta ciudad (Origen-Destino de Hogares, EODH 2019) es bastante reciente, aunque anterior a la pandemia del covid-19. Lima, en cambio, tiene solo una encuesta de movilidad, del 2012; es decir, con diez años de antigüedad. Los datos los recopilamos de las fuentes detalladas en la tabla 1.

Cálculo de las distancias

Este cálculo requiere conocer la distancia de los viajes registrados en las encuestas de movilidad, lo que representa un desafío metodológico. Dado que las encuestas no proporcionan explícitamente la longitud de cada viaje ni tampoco el recorrido, debemos elaborar hipótesis a partir de los datos disponibles. Las encuestas mencionan las zonas de partida y llegada de cada viaje, así como los tiempos correspondientes. Realizamos, entonces, dos tipos de cálculo de las distancias.

Distancia en línea recta

Para obtener esta medida calculamos las distancias en línea recta entre los centroides de cada zona, no tomando en cuenta la superficie total sino la urbanizada, puesto que en ambas ciudades las zonas periféricas tienen una extensión muy superior a las demás y a menudo están poco urbanizadas. Estas zonas de análisis de tráfico (ZAT) en Bogotá son 1141 y en Lima unas 427.

▼ **Tabla 1**
Fuente de los datos usados para la modelización de emisiones

INSUMO	BOGOTÁ	LIMA
<i>Características de los viajes</i>	Encuesta Origen-Destino de Hogares (EODH) 2019. Muestra de 120 666 viajes. Número de viajes cotidianos: 17 188 566.*	Encuesta de viajes JICA 2012. Muestra de 116 993 viajes. Número de viajes cotidianos: 12 717 374.
<i>Rendimiento de los vehículos (kWh/vehíc.km)</i>	Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) del Ministerio de Minas y Energía, datos de 2001.	Varias fuentes. Para los taxis y buses: consultorías del Minem (Corpoema, 2019; Táryet, 2019). Para los demás vehículos: recopilación de datos de Gouldson y otros, 2015.
<i>Combustibles utilizados por los vehículos</i>	Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), datos de 2018.	Minam, datos de 2018. Corpoema y Táryet, datos de 2019.
<i>Tasa de ocupación de los vehículos (viaj/vehíc)</i>	UPME, datos de 2019. Se tuvo que elaborar la hipótesis para el transporte informal.	Gouldson y otros (2015). Planteo de hipótesis para buses tradicionales, combis, cústers y colectivos.
<i>Factor de emisión unitario para los GEI: combustión (g/kWh) (Alcance 1)</i>	UPME, siguiendo la metodología del IPCC, datos de 2016.	Minem, siguiendo la metodología del IPCC, datos de 2016.
<i>Factor de emisión unitario para los GEI: producción del combustible (g/kWh) (Alcance 2)</i>	Metodología de cálculo de la Agencia Francesa para la Transición Ecológica, Ademe, 2013.	
<i>Distancias recorridas</i>	Ver siguiente apartado.	

* Suma de los factores de expansión de la muestra. Elaboración propia.

El método de cálculo de la distancia en línea recta tiene tres fuentes de incertidumbre: (1) por la asignación de todos los viajes de una zona a su centroide; (2) la asimilación del recorrido a una línea recta, hipótesis más crítica cuanto más sinuoso es el recorrido, caso común en las periferias populares de ambas ciudades —en Lima, por ejemplo, la estructura en valles (los «conos») que confluyen en el centro hace que los viajes de un valle a otro tengan una forma de «U» bastante más extensa que la línea recta—; y (3), en ambas ciudades las ZAT son las zonas más precisas que se tienen para identificar el origen y destino de los viajes, pero en Lima son más grandes que en Bogotá, lo que aumenta la incertidumbre sobre las distancias calculadas por este método.

Proponemos, por lo tanto, otra forma de calcular la distancia, que expliquemos a continuación.

Distancia aproximada por la velocidad promedio

En este caso calculamos las distancias basándonos en el tiempo de viaje obtenido en las encuestas, multiplicado por una velocidad promedio que asumimos como hipótesis. Usamos las mismas velocidades para Bogotá y Lima. Nos basamos en las hipótesis planteadas por Bedoya, Marquet & Miralles-Guasch (2016) para Medellín, pero haciendo algunos ajustes que detallamos en la columna «Comentarios» de la tabla 2.

Este método de cálculo tiene como principal fuente de incertidumbre la velocidad promedio de cada modo. El indicado en la encuesta es el modo principal del viaje, categorizado según la jerarquía usual de las encuestas de viaje para los desplazamientos multimodales; por ejemplo, un viaje que incluye una etapa en transporte público y otra a pie se cataloga bajo la primera modalidad, y ese es el *modo principal* usado por la persona. En el transporte público la jerarquía privilegia los modos de alta capacidad (metro, BRT) sobre el bus y el transporte tradicional. Por esta razón, las velocidades promedio del transporte público tienden a ser sobrestimadas, aunque es difícil saber en qué proporción. Si bien este método permite prescindir del conocimiento de la ruta del viaje, aumenta la incertidumbre sobre la multimodalidad de los mismos.

Distancias totales estimadas por la venta de combustibles

En la literatura revisada no encontramos autores que hayan confrontado sus resultados —o al menos realizado análisis de sensibilidad— para calcular el grado de exactitud con el que los métodos anteriores (línea recta o velocidad promedio) determinan las distancias. Debido al número de fuentes de incertidumbre, buscamos otra forma de obtener un orden de magnitud de las distancias totales diarias: nos basamos en la venta diaria de combustible en ambas ciudades, desagregada por tipo (diésel, gasolina, GNV).

Los datos provienen de Econometría Consultores (2010), en el caso del Distrito Capital de Bogotá, y de Corpoema (2019), para la provincia de Lima, pero no están desagregados por tipo de vehículo, por lo que debemos plantear varias hipótesis adicionales sobre la distribución de los combustibles y el tipo de vehículo. Conociendo los combustibles utilizados por cada tipo de vehículo (tabla 1), estimamos las siguientes distribuciones: en ambas ciudades

asignamos los kilómetros recorridos con gasolina a los vehículos livianos (automóviles); y los kilómetros con diésel, a los autobuses. En Bogotá, los kilómetros recorridos con GNV se los atribuimos a los taxis, y en Lima los repartimos entre los buses (80%) y los taxis (20%).

Este método tampoco está exento de fuentes de incertidumbre: (1) abarca todas las ventas de combustible en el área considerada, incluido el transporte de carga, lo que tiende a sobrestimar las distancias recorridas; (2) las ventas de combustible en un territorio no implican únicamente viajes en la propia jurisdicción, al mismo tiempo que es posible que algunos vehículos se abastezcan de combustible en otra provincia; y (3) las hipótesis que tuvimos que elaborar para asociar los combustibles a cada tipo de vehículo son fuertes. Pese a estas

▼ **Tabla 2**

Velocidades promedio usadas para calcular las distancias.

MODO	VELOCIDAD PROMEDIO (KM/H)	COMENTARIOS
<i>A pie</i>	4	
<i>Bicitaxi</i>	10	
<i>Mototaxi</i>	15	
<i>Bicicleta</i>	15	
<i>Autobús sin carril preferencial</i>	15	
<i>Cable</i>	15	Calculada para TransMiCable
<i>BRT*</i>	22	Dato proporcionado por TransMilenio S. A.
<i>Taxi colectivo</i>	22	
<i>Taxi</i>	24	Como el automóvil
<i>Automóvil</i>	24	
<i>Moto</i>	26	
<i>Metro</i>	40	Velocidad del Metro de Lima

* Bus de tránsito rápido, sistema de transporte masivo organizado alrededor de corredores segregados de autobuses que hacen paradas en determinadas estaciones, complementado por una red de alimentación que conecta algunos barrios ubicados cerca de las estaciones terminales con los corredores. Elaboración propia.

aproximaciones, la estimación nos permite generar órdenes de magnitud para establecer una comparación con los otros métodos.

Comparación de los resultados y propuestas de mejora

Presentamos en esta sección los valores agregados de las distancias diarias totales en Bogotá y Lima calculados por los tres métodos, expuestos en millones de viajeros.kilómetros por día (tabla 3).

La comparación muestra que, en las dos ciudades, la estimación más baja corresponde al cálculo en línea recta, mientras que la estimación por venta de combustible genera los valores más altos. Tomando en cuenta las incertidumbres antes planteadas, esta ordenación es consistente con el carácter probablemente sobrestimado de la venta de combustible y subestimado de la distancia en línea recta. La aproximación por la velocidad promedio da un valor de la distancia alrededor de 2 a 2,5 veces más alto que la aproximación por línea recta; y en el caso de Bogotá, un orden de magnitud consistente con el dato de control. La variación de un método a otro es también mucho más alta en Lima (factor 8) que en Bogotá (factor 3). Por lo tanto, este trabajo preliminar abre un campo para futuras investigaciones.

Entre los objetivos a desarrollar en futuros trabajos está automatizar el cálculo de la distancia por la red vial en vez de emplear la línea recta; por ejemplo, a partir de la interfaz de programación de OpenStreetMap. En cuanto al segundo método, las fuertes diferencias entre Lima y Bogotá nos interrogan sobre la relevancia de usar las mismas velocidades promedio en ciudades distintas.

Dado que las emisiones son proporcionales a las distancias, desarrollamos a continuación únicamente el ejemplo de Bogotá, calculando las distancias mediante la velocidad promedio. A partir de la propuesta presentada, esto nos parece lo más acertado.

▼ Tabla 3
Comparación entre los métodos de cálculo de la distancia.

MILLONES DE VIAJE (KM/DÍA)	BOGOTÁ	LIMA
<i>Distancia en línea recta</i>	99	72
<i>Aproximación por la velocidad promedio</i>	240	132
<i>Dato de control: ventas de combustible</i>	306	576

* Elaboración propia.

Cálculo de los factores de emisión para Bogotá

El factor de emisión de un modo de transporte, en gramos por viajero.kilómetro (g/viaj.km), representa la cantidad de GEI emitida por cada kilómetro recorrido con este modo por una persona. Para calcularlo, nos basamos en (ver la tabla 1):

- el factor de emisión unitario de cada vehículo, en gramos por kilovatio hora (g/kWh), que representa la cantidad de GEI emitida por el consumo de 1 kWh de combustible. Es la suma de un factor para la combustión (Alcance 1) y otro para la producción del combustible (Alcance 2);

▼ **Tabla 4**

Factores de emisión de GEI por modo por viaj.km para Bogotá.

MODO (SEGÚN FORMULARIO EODH 2019)	TASA DE OCUPACIÓN PROMEDIO (VIAJ/VEHÍC)	GCO ₂ -EQ/VIAJ.KM
<i>Alimentador</i>	72	14
<i>Automóvil</i>	1,5	152
<i>Bicitaxi</i>	2	46
<i>Transmicable</i>	10	7
<i>Bus intermunicipal</i>	14	71
<i>Moto</i>	1,2	76
<i>Patineta eléctrica</i>	1	2
<i>SITP* Provisional</i>	14	69
<i>SITP* Zonal</i>	14	69
<i>TransMilenio</i>	202	5
<i>Transporte escolar</i>	14	73
<i>Transporte informal</i>	3	76
<i>Taxi</i>	1,1	163
<i>Otro</i>	14	69

* Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá. Elaboración propia con base en la UPME, la Ademe y el IPCC (ver la tabla 1).

- el rendimiento del vehículo, en kilovatios hora por vehículo.kilómetro (kWh/vehíc.km), que representa la cantidad de energía consumida por el mismo en un kilómetro; y
- la tasa de ocupación de cada vehículo, en viajeros por vehículo (viaj/vehíc).

Los factores obtenidos para Bogotá se presentan en la tabla 4. Estos valores son consistentes con los datos que se conocen para los automóviles: 152 gCO₂-eq/viaj.km en Bogotá, para comparar con los 120 gCO₂-eq/viaj.km para un automóvil en Francia en 2021, según la Agencia Francesa para la Transición Ecológica (Ademe).

Resultados preliminares para Bogotá

En esta sección presentamos los resultados del modelo para Bogotá; es decir, las emisiones diarias de GEI desagregadas por modo y lugar de residencia de los hogares.

Comparamos las emisiones de GEI totales procedentes del modelo con las emisiones del sector *movilidad* del inventario del Plan de Acción Climática Bogotá 2020-2050. El modelo da un total de 14 817 toneladas de dióxido de carbono equivalentes por día (tCO₂-eq/día) en Bogotá, del mismo orden de magnitud que las 15 020 tCO₂-eq/día del inventario (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2021). Estos valores no son directamente comparables, porque el inventario abarca el transporte de carga. No conocemos la distribución porcentual del transporte de carga en Bogotá; sin embargo, a nivel nacional, en Colombia, el transporte de carga representa la mitad de las emisiones de GEI del transporte (Van Laake, Lozano & Gillod, 2021). Se puede suponer que en el entorno urbano este porcentaje es menor.

Emisiones desagregadas por modo de transporte

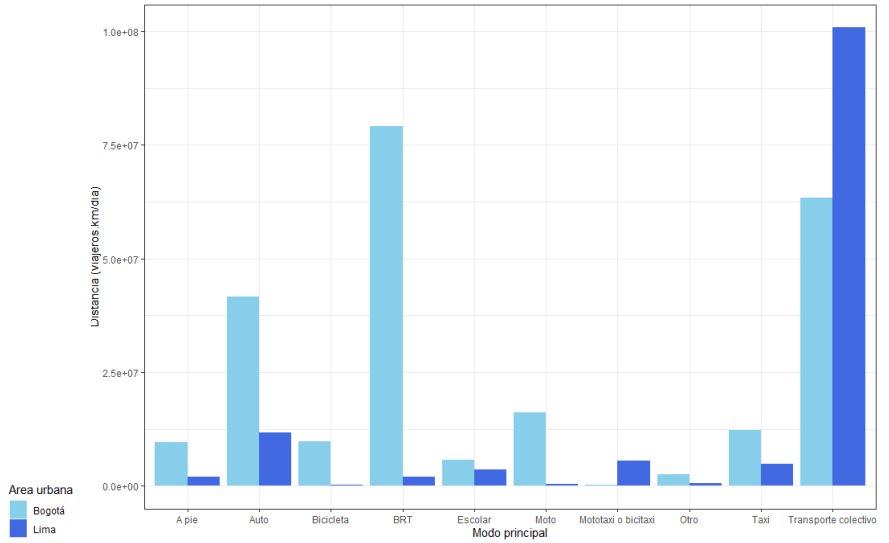
La representación de las emisiones de GEI por modo discrimina los modos de alta emisión por viajero.kilómetro, como es el caso del automóvil, que, a pesar de ocupar el tercer lugar en cuanto a la distancia recorrida (imagen 1), es el primer emisor de GEI (imagen 2). La misma conclusión es válida para el taxi. El balance resulta más matizado para el transporte público —SITP Zonal y Provisional—, que ocupa el segundo lugar tanto en distancia como en emisiones: posiblemente se trate de numerosos viajes con emisiones no muy altas, pero cuya suma termina implicando una emisión alta. TransMilenio resulta tener un factor de emisión por viajero.kilómetro muy bajo, sobre todo debido a su alta tasa de ocupación (202 pasajeros por vehículo), por lo que sus emisiones permanecen bajas a pesar de tener el primer lugar en número de viajeros.kilómetros.

Emisiones por zona de residencia

El uso conjunto de este modelo con las herramientas de análisis espacial permite representar las diferencias entre las zonas en términos de emisiones de GEI per cápita. Los mapas de la imagen 3 muestran las emisiones

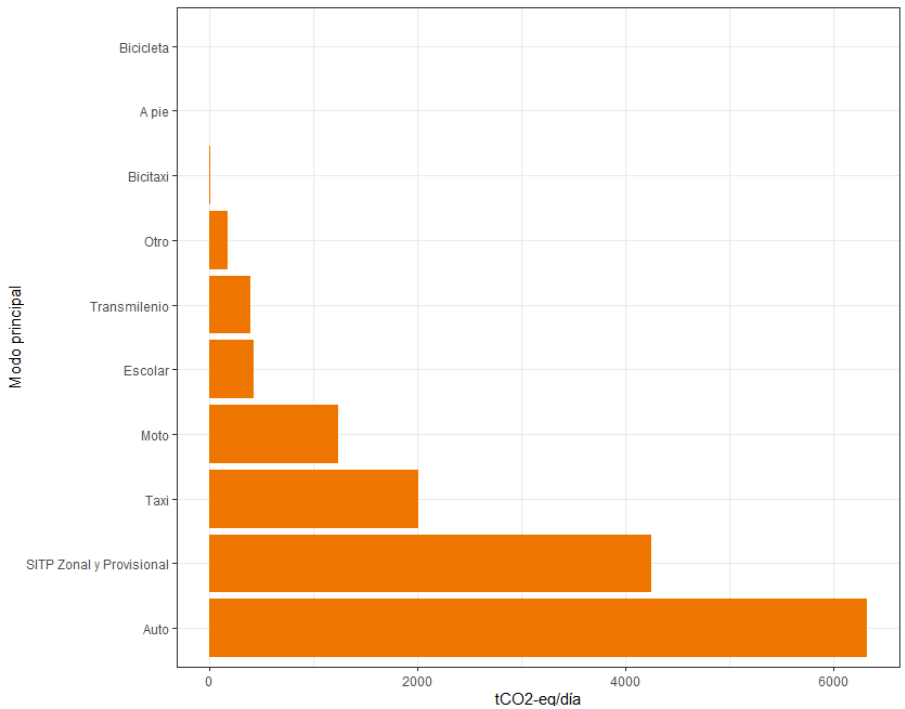
► **Imagen 1**

Distancias cotidianas recorridas en Bogotá y Lima según el modo. Elaboración propia a partir de la velocidad media.

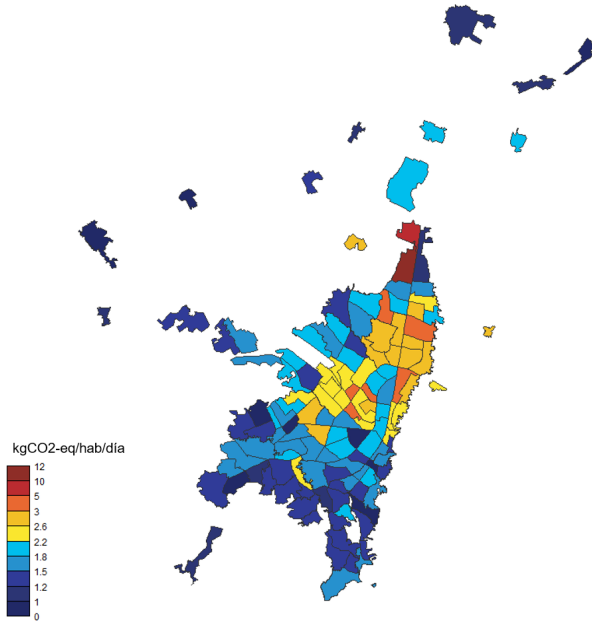


► **Imagen 2**

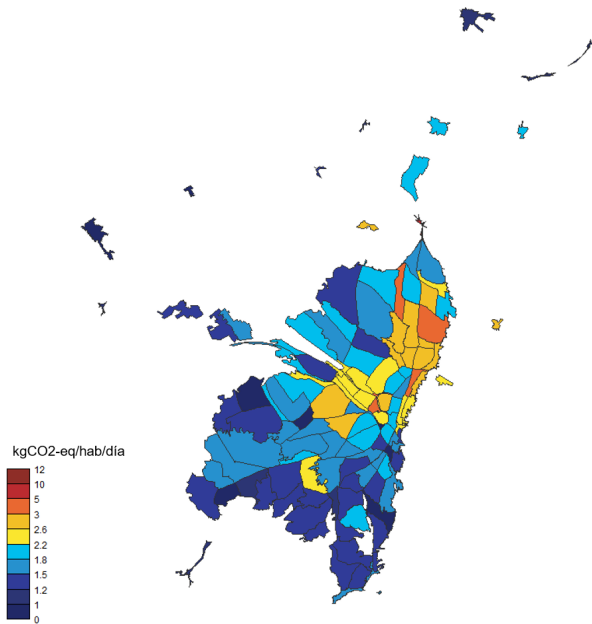
Emisiones cotidianas de GEI del transporte urbano en Bogotá. Elaboración propia.



Emisiones cotidianas *per capita* de gases de efecto invernadero relacionadas con la movilidad



Emisiones cotidianas *per capita* de gases de efecto invernadero relacionadas con la movilidad



► **Imagen 3**

Emisiones cotidianas de GEI relacionadas con la movilidad *per cápita* en Bogotá por zona (UTAM) de residencia. Izq.: mapa no deformado; der.: cartograma deformado según las distancias recorridas. Elaboración propia.

per cápita según la unidad territorial de análisis de la movilidad (UTAM) de residencia en Bogotá.⁵

El mapa de la izquierda no está deformado, mientras que en el de la derecha deformamos las zonas de residencia para producir un cartograma de tal forma que una zona aparezca más grande cuantos más viajes se originen en ella. Para esto usamos el paquete *cartogramR* en el lenguaje de programación R, desarrollado por Cornillon y Demoraes (2021). Combinado con la variable principal —las emisiones—, el cartograma ofrece una nueva perspectiva que se adapta muy bien para describir situaciones de desigualdad, como sucede en Bogotá (Bertin, 1967). Se observa que gran parte de la zona sur y de la periferia occidental genera la mayoría de los viajeros.kilómetros recorridos. Sin embargo, estos viajes son bajos en carbono (color azul, imagen 3). Las UTAM del noroeste, en cambio, que generan una menor proporción de los viajeros.kilómetros recorridos, tienen altas emisiones per cápita, lo que puede estar asociado a un uso mayor del automóvil. Así, este cartograma hace hincapié en lo que Emelianoff (2008) llama *desigualdades ecológicas*: las personas y los grupos sociales son desiguales no solo por su exposición a los riesgos ambientales, sino también por los impactos que generan en los ecosistemas. En tal sentido, este tipo de mapa plantea interesantes perspectivas de análisis.

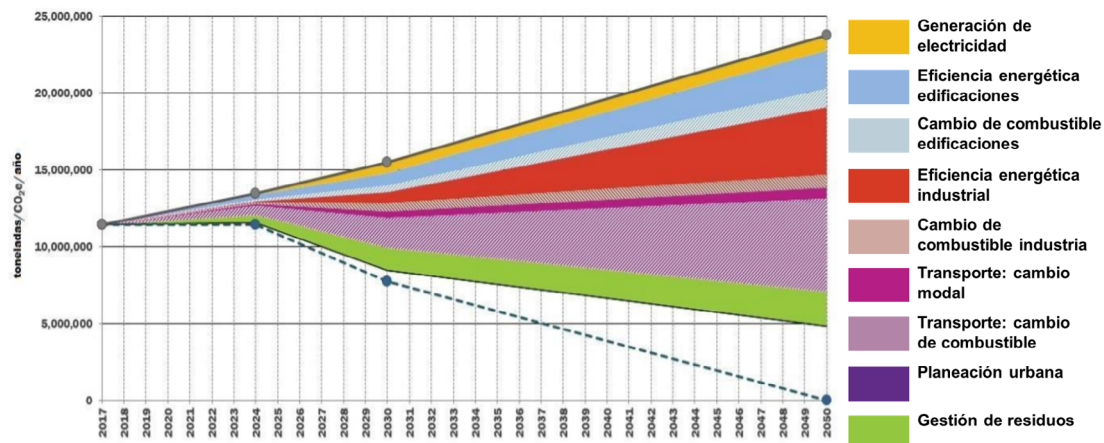
④ DISCUSIÓN Y PERSPECTIVAS

Este artículo presenta una metodología exploratoria de modelización de las emisiones del transporte basada en la demanda. Si bien el marco conceptual propuesto por el IPCC es bastante sencillo y ha generado resultados importantes en otras investigaciones en cuanto a las emisiones de GEI (Gouldson y otros, 2015; Bedoya, Marquet & Miralles-Guasch, 2016) y de contaminantes aéreos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020; Minam, 2021), aún contiene limitaciones importantes que vale la pena discutir.

Una mejor estimación de la distancia es clave para la verosimilitud de los resultados y para mejorar los órdenes de magnitud de las emisiones calculadas, como planteamos ampliamente en el ítem «Cálculo de las distancias» de la sección 2. Más allá de un modelo de emisiones, el enfoque de distancia permite salir de una descripción de la movilidad por las encuestas de movilidad basada únicamente en las distribuciones modales. La distancia les da mayor importancia a los modos rápidos, en comparación con su participación modal. En Bogotá, por ejemplo, si bien el peatón tiene la mayor participación modal porcentual, el modo con el mayor número de kilómetros recorridos es el transporte público —principalmente, TransMilenio—. Este vacío de información es un impedimento mayor para las políticas públicas de movilidad sostenible: las medidas de DOTS promovidas desde los trabajos de Calthorpe (1993) y trasladadas a América Latina por Pardo y Calderón Peña (2014) buscan reducir la longitud de los viajes mediante el ejercicio de la planificación urbana.

5 En Bogotá, la EODH 2019 es representativa a nivel de UTAM para la localización de los hogares.

TRANSPORTE URBANO Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN AMÉRICA LATINA. UNA MODELIZACIÓN DE LAS EMISIONES DE LA MOVILIDAD URBANA APLICADA A BOGOTÁ Y LIMA



▲ Imagen 4

Escenario de reducción ambiciosa de las emisiones del Plan de Acción Climática Bogotá 2020-2050. La línea superior es el escenario de emisiones *business as usual*. Las áreas coloreadas son los descuentos aportados por cada sector. El transporte está en rosado oscuro (cambio modal) y claro (cambio de combustible, principalmente electrificación). Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá (2021)..

Otra limitación mayor de este trabajo es la calidad de los datos de partida, en cuanto a su precisión y actualización. Tuvimos que elaborar hipótesis fuertes sobre las características del parque vehicular en circulación en torno a sus combustibles y rendimientos, sobre todo para el parque informal. El mayor reto de futuras investigaciones al respecto será cerrar esta brecha.

Las implicaciones de esta modelización en términos de políticas públicas son apremiantes para darles un sustento sólido a los planes de acción climática adoptados por las ciudades latinoamericanas. Los recientes planes adoptados en Lima y Bogotá exploran varios conjuntos de medidas de mitigación, pero no tienen las herramientas necesarias para cuantificar sus efectos. El Plan de Acción Climática Bogotá 2020-2050, por ejemplo, basa la mayor parte de la reducción de GEI en la electrificación de los vehículos, mientras que las medidas orientadas a la disminución de la demanda (cambio modal) contribuyen muy poco (imagen 4). El interés de cuantificar bien las reducciones de emisiones como producto de cada medida es hacer visible el efecto de las políticas públicas de reducción de la demanda, que suele ser invisibilizado por los ingenieros y economistas (Creutzig, 2016).

Invertir solo en medidas tecnológicas o de combustibles es una apuesta arriesgada (Wright & Fulton, 2005) y también una forma de ineficiencia por los altos costos de la tonelada de CO₂ reducida (Salas y otros, 2017; Hinicio, 2017).

⑤ CONCLUSIÓN

Los países latinoamericanos enfrentan problemáticas complejas y tal vez contradictorias. Por una parte, la reducción de las desigualdades y la satisfacción de las necesidades básicas de la población es una prioridad de corto y mediano

plazo de las agendas políticas del subcontinente; pero, por otra parte, el cambio climático implica retos de mediano-largo plazo que ponen en peligro la habitabilidad del mismo. Si bien el IPCC, en su último informe, insiste en la urgencia de la adaptación al cambio climático en América Latina (Pörtner y otros, 2022), en el sentido de anticipar sus consecuencias sobre las condiciones de vida y el aumento de los riesgos naturales, el transporte entra directamente en el campo de la mitigación. Por ser la mayor fuente de las emisiones energéticas en los países estudiados, tiene mucho sentido acompañar las políticas públicas que buscan mejorar las condiciones de movilidad de la gente y a la vez reducir sus externalidades; entre ellas, mitigar el cambio climático.

REFERENCIAS

- ADEME, Agencia Francesa para la Transición Ecológica (2016). Les potentiels du véhicule électrique. *Les avis de l'ADEME*.
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2020). *Inventario de emisiones de Bogotá. Contaminantes atmosféricos*. Bogotá: Secretaría de Ambiente. <https://bit.ly/438iKlz>
- Alcaldía Mayor de Bogotá (2021). *Plan de Acción Climática Bogotá 2020-2050*. Bogotá: Secretaría Distrital de Ambiente. <https://bit.ly/3GkRExX>
- Bedoya, Vanessa; Oriol Marquet & Carme Miralles-Guasch (2016, julio-diciembre). Estimación de las emisiones de CO₂ desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín. *Transporte y Territorio*, 15, 302-322. <https://doi.org/10.34096/trt.t15.2862>
- Bertin, Jacques (1967). *Sémiologie graphique: les diagrammes, les réseaux, les cartes*. París y La Haya: Mouton y Gauthier-Villars.
- Bigo, Aurélien (2020). «Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement» (tesis de doctorado). Institut Polytechnique de Paris. <http://www.theses.fr/20201PPAX068>
- Bocarejo, Juan Pablo (2015). *¿Cómo mejorar la movilidad de los bogotanos? 2016-2020. Diagnóstico, buenas prácticas y proyectos prioritarios*. Bogotá: Universidad de Los Andes y Cámara de Comercio de Bogotá. <https://bit.ly/3MiHWQD>
- Bogotá Cómo Vamos (2021). *Vigésimo tercer Informe de Calidad de Vida en Bogotá, 2020. Presentación*. Bogotá: Bogotá Cómo Vamos. <https://bit.ly/413VhAa>
- Bourdages, Jade & Eric Champagne (2012, mayo). Penser la mobilité durable au-delà de la planification traditionnelle du transport. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*, 11, edición especial. <https://doi.org/10.4000/vertigo.11713>
- Calthorpe, Peter (1993). *The Next American Metropolis: Ecology, Community, and the American Dream*. Princeton Architectural Press.
- Cornillon, Pierre-André & Florent Demoraes (2021). *Package cartogramR: User guide*. HAL, Science Ouverte. <https://bit.ly/413jXV5>
- Corpoema, Corporación para la Energía y el Medio Ambiente (2019). «Estimación de los rendimientos de una flota representativa de automóviles usados como taxi en el ámbito de Lima Metropolitana a través de la aplicación de encuestas y proceso de determinación de parámetros en combustibles (diesel y gasolina) mediante pruebas en laboratorio internacional». Consultoría para el Ministerio de Energía y Minas, Perú. Bogotá: Corpoema. <https://bit.ly/3MD7WGz>
- Creutzig, Felix (2016). Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation. *Transport Reviews*, 36(3): 341-360. <https://bit.ly/40Xfuri>
- Demoraes, Florent; Vincent Gouëset & Carlos Moreno Luna (2020). *Características de la movilidad diaria en el Área Metropolitana de Bogotá, con base en la Encuesta de Movilidad de Bogotá 2019. Un panorama en mapas*. Informe de investigación. UMR ESO, Espaces et Sociétés; Institut Français d'Etudes Andines y Universidad Piloto de Colombia. <https://bit.ly/41kNC0H>
- Demoraes, Florent; Jérémy Robert, Pablo Vega Centeno, Omar Pereyra & Vincent Gouëset (2020). *Características de la movilidad diaria en el Área Metropolitana de Lima y Callao, con base en la Encuesta de Viaje Personal en Hogares de 2012. Un panorama en mapas*. Informe de investigación. UMR ESO, Espaces et Sociétés; Institut Français d'Etudes Andines y Pontificia Universidad Católica del Perú. <https://bit.ly/3zUQt18>
- Dureau, Françoise; Olivier Barbary, Vincent Gouëset, Olivier Pissot & Thierry Lulle (eds.) (2007). *Ciudades y sociedades en mutación: lecturas cruzadas sobre Colombia*. Travaux de l'Institut Français d'Études Andines, tomo 242. Bogotá: Universidad Externado de Colombia. <https://bit.ly/3ml1DwE>
- Econometría Consultores (2010). *Caracterización energética del sector transporte de carga y pasajeros, urbano e interurbano en Colombia*. Bogotá: Unidad de Planeación Minero-Energética.
- Edelebenbosch, Oreane; David McCollum, Detlef van Vuuren, Christoph Bertram, Samuel Carrara, Hannah Daly, Shinichiro Fujimori, Alban Kitous, Page Kyle, Eoin Ó Broin, Panagiotis Karkatsoulis, Fuminori Sano (2017, agosto). Decomposing Passenger Transport Futures: Comparing Results of Global Integrated Assessment Models. *Transportation Research. Part D: Transport and Environment*, 55, 281-293. <https://bit.ly/43rp1SY>
- Emelianoff, Cyria (2008). La problématique des inégalités écologiques, un nouveau paysage conceptuel. *Ecologie Politique*, 35, 19-31. <https://bit.ly/3KAN4OC>
- Espinosa, Mónica; Florentino Márquez, Darío Hidalgo & Juan Felipe Franco (2021). *Movilidad baja en carbono para el desarrollo sostenible y equitativo de las ciudades: desafíos y oportunidades para el transporte de pasajeros en América Latina y el Caribe*. Documentos CODS, 9. Bogotá: Centro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible para América Latina (CODS). <https://bit.ly/3zzgQnt>
- Gobillon, Laurent; Harris Selod & Yves Zenou (2007). The Mechanisms of Spatial Mismatch. *Urban Studies* 44(12), 2401-2427. <https://bit.ly/3KwNXqb>

- Gouldson, Andy; Faye McAnulla, Paola Sakai, Andrew Sudmant, Sofía Castro & Cayo Ramos (2015). *La economía de ciudades resilientes y de bajas emisiones de carbono: Lima-Callao, Perú*. Monografía 213, Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Washington DC: BID. <https://bit.ly/438EVbj>
- Guzmán, Luis A. & Santiago Gómez Cardona (2021, marzo). Density-Oriented Public Transport Corridors: Decoding Their Influence on BRT Ridership at Station-Level and Time-Slot in Bogotá. *Cities*, 110. <https://bit.ly/3KBGpUz>
- Hinicio (2017). «Estudio de diagnóstico, evaluación, análisis y propuesta para apoyar la NAMA de preparación del sector energético para la transformación hacia una matriz energética limpia a través del uso de transporte limpio en el Perú». Informe para el Ministerio de Energía y Minas, Perú. Bogotá: Hinicio
- IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2005). *Calculating CO₂ Emissions from Mobile Sources. Guidance to Calculation Worksheet*. Vol 3. The Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)-Mobile Guide. <https://bit.ly/3Gj0oor>
- JICA, Agencia de Cooperación Internacional del Japón (2013). Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao. Lima: JICA y Ministerio de Transportes. <https://bit.ly/3GjtdAY>
- Jirón Martínez, Paola; Carlos Lange Valdés & María Yolanda Bertrand Suazo (2010, mayo). Exclusión y desigualdad espacial: Retrato desde la movilidad cotidiana. *Invi*, 25(68), 15-57. <https://bit.ly/3ZJKSsg>
- Lima Cómo Vamos (2019). *Lima y Callao según sus ciudadanos. Décimo informe urbano de percepción sobre calidad de vida en la ciudad*. Lima: Lima Cómo Vamos. <https://bit.ly/3ZHrln1>
- Lima Cómo Vamos (2021). *Informe urbano de percepción ciudadana en Lima y Callao 2021*. Lima: Lima Cómo Vamos. <https://bit.ly/3zCt5ZH>
- Minam, Ministerio del Ambiente (2021). *Plan de Acción para el mejoramiento de la calidad del aire de Lima-Callao 2021-2025*. Lima: Ministerio de Ambiente.
- Montezuma, Ricardo (ed.) (2000). *Presente y futuro de la movilidad urbana en Bogotá: retos y realidades*. Bogotá: Centro Editorial Javeriano (CEJA). <https://bit.ly/3Kr2cge>
- Moscoso, Marina; Thomas van Laake, Lina Marcela Quiñones, Carlos Felipe Pardo & Darío Hidalgo (2019). *Transporte urbano sostenible en América Latina: evaluaciones y recomendaciones para políticas de movilidad*. Bogotá: Fundación Despacio, TUMI y GIZ. <https://bit.ly/439avFT>
- Municipalidad de Lima (2021). *Plan local de cambio climático de la provincia de Lima, 2021-2030*. Lima: Sistema Metropolitano de Información Ambiental de la Municipalidad de Lima. <https://bit.ly/3GiwpNc>
- Ortiz Gómez, Andrés & Secretaría Distrital de Planeación (2019). *¿Influye la densidad de población y de empleo en el perfil de demanda de TransMilenio?* Bogotá: Secretaría Distrital de Planeación.
- Paquette, Catherine (2017). Des villes durables dans les Suds : une utopie ? Réflexions à partir de l'Amérique latine. En Patrick Caron & Jean-Marc Châtaigner (ed.), *Un défi pour la planète: les Objectifs de développement durable en débat*, pp. 151-160. Marsella: Quae e IRD Éditions. <https://bit.ly/414P5YG>
- Pardo, Carlos Felipe & Patricia Calderón Peña (2014). *Integración de transporte no motorizado y DOTS*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá y Fundación Despacio. <https://bit.ly/415Z8N4>
- Pörtner, Hans-Otto; Debra Roberts, Melinda Tignor, Elvira Poloczanska, Katja Mintenbeck, Andrés Alegría, Marlies Craig, Stefanie Langsdorf, Sina Löschke, Vincent Möller, Andrew Okem, Bardhyl Rama (eds.) (2022). «Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability». Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change AR6. Cambridge: IPCC. <https://bit.ly/3MDp3bk>
- Salas, Edgar; Sandra Mendoza, Nara Vargas, Sintia Yáñez, Cecilia Guerra, Juan Carlos Palacios, Mauricio Velásquez & Marcos Mejía (2017). *Huella de Ciudades 4. Ciudad de Lima. Fortalecimiento de la capacidad de gestión ambiental del gobierno municipal de Lima*. Lima: Corporación Andina de Fomento. <https://bit.ly/414cCZT>
- Secretaría Distrital de Ambiente (2021). *Plan Aire 2030*. Bogotá: Alcaldía de Bogotá y Secretaría Distrital de Ambiente. <https://bit.ly/3Ue0KIU>
- Secretaría Distrital de Movilidad (2017). *Observatorio de Movilidad. Bogotá D. C. 2017*. Alcaldía de Bogotá y Secretaría Distrital de Movilidad. <https://bit.ly/3GmuHdH>
- Táryet, Ingeniería del Transporte (2019). «Estimación de los rendimientos de una flota representativa de buses en el ámbito de Lima Metropolitana a través de la aplicación de encuestas y procesos de determinación mediante pruebas de laboratorio del contenido de carbono en combustibles (diésel y gasolina)». Consultoría para el Ministerio de Energía y Minas, Perú. <https://bit.ly/41kCoZI>
- Theys, Jacques & Cyria Emelianoff (2001). Les contradictions de la ville durable. *Le Debat* 113, 122-135.
- Urry, John (2007). *Mobilities*. Cambridge (Reino Unido) y Malden (Estados Unidos): Polity.
- Van Laake, Thomas; Camila Lozano & Antoine Gillod (2021). *Movilidad urbana, acceso a zonas rurales y conectividad interurbana sostenibles: desafíos del transporte urbano para Colombia en el siglo XXI*. Bogotá: Fundación Despacio y Climate Chance. <https://bit.ly/40LSVGt>

TRANSPORTE URBANO Y EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO EN AMÉRICA LATINA. UNA MODELIZACIÓN DE LAS EMISIONES DE LA MOVILIDAD URBANA APLICADA A BOGOTÁ Y LIMA

- Warburg, Niels; Alexander Forell, Laura Guillon, Hélène Teulon & Benjamin Canaguier (2013). Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux induits par l'ensemble des filières de véhicules électriques et de véhicules thermiques, VP de segment B (citadine polyvalente) et VUL à l'horizon 2012 et 2020. Estudio realizado por encargo de la Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (Ademe) por PE International y Ginkgo. <https://bit.ly/3zxGwtM>
- Wright, Lloyd & Lewis Fulton (2005, diciembre). Climate Change Mitigation and Transport in Developing Nations. *Transport Reviews*, 25(6), 691-717. <https://bit.ly/41lzNPt>