



**HAL**  
open science

# ¿Cómo nos movemos y cuánto CO<sub>2</sub> emitimos hoy en día? Metodología para estimar la huella ambiental de los viajes cotidianos en Bogotá y Lima

Hugo Thomas, Florent Demoraes

## ► To cite this version:

Hugo Thomas, Florent Demoraes. ¿Cómo nos movemos y cuánto CO<sub>2</sub> emitimos hoy en día? Metodología para estimar la huella ambiental de los viajes cotidianos en Bogotá y Lima. Coloquio internacional Ciudades en transición: Modos de vida urbanos y escenarios futuros ante la transición socioecológica, Universidad Autónoma Metropolitana, Nov 2024, Ciudad de Mexico, México. hal-04807364

HAL Id: hal-04807364

<https://hal.science/hal-04807364v1>

Submitted on 27 Nov 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License



# ¿Cómo nos movemos y cuánto CO<sub>2</sub> emitimos hoy en día?

Metodología para estimar la huella ambiental de los viajes cotidianos en Bogotá y Lima

Hugo Thomas y Florent Demoraes

13 de noviembre de 2024

Analizar la huella ambiental de los viajes a partir de microdatos de encuestas de movilidad

***Método aplicado a las metrópolis de Latinoamérica***



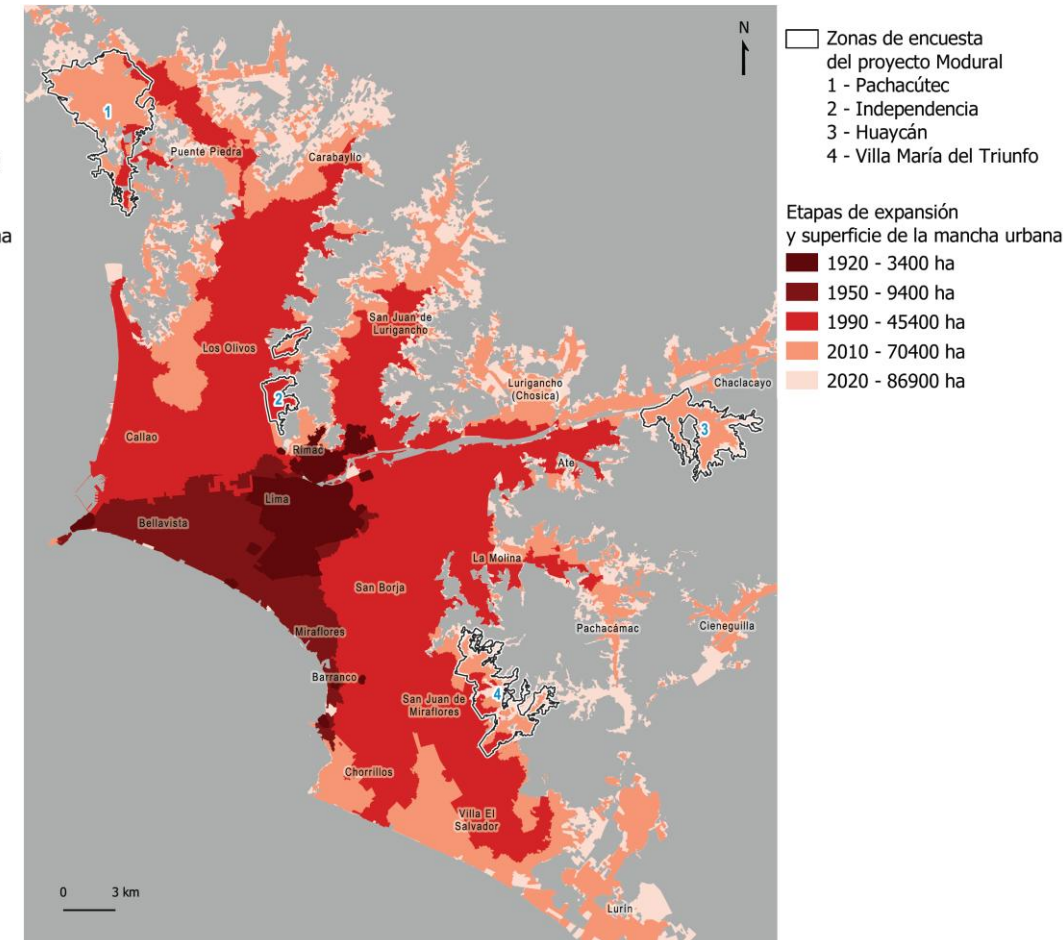
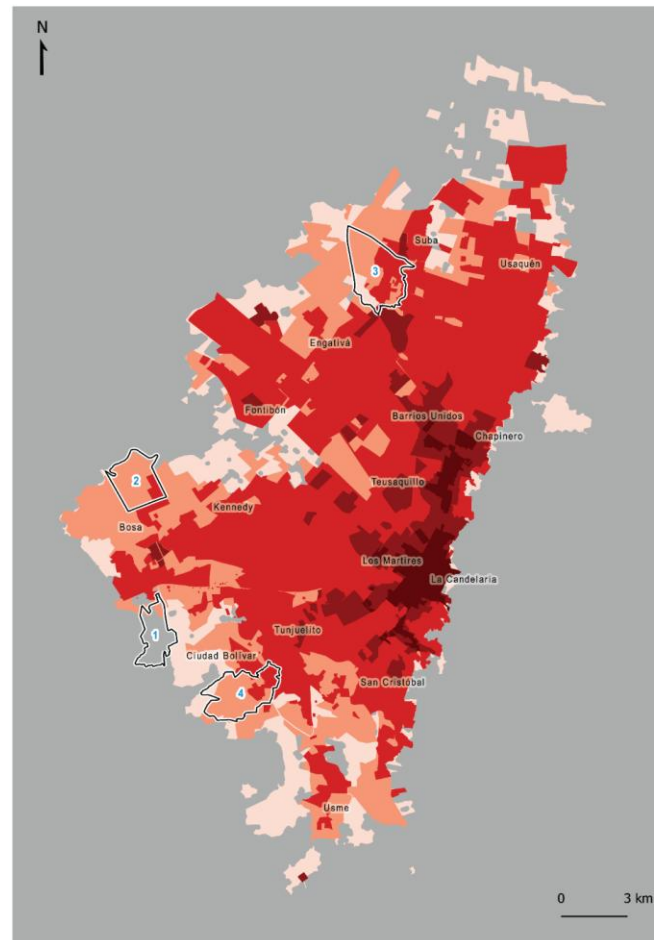


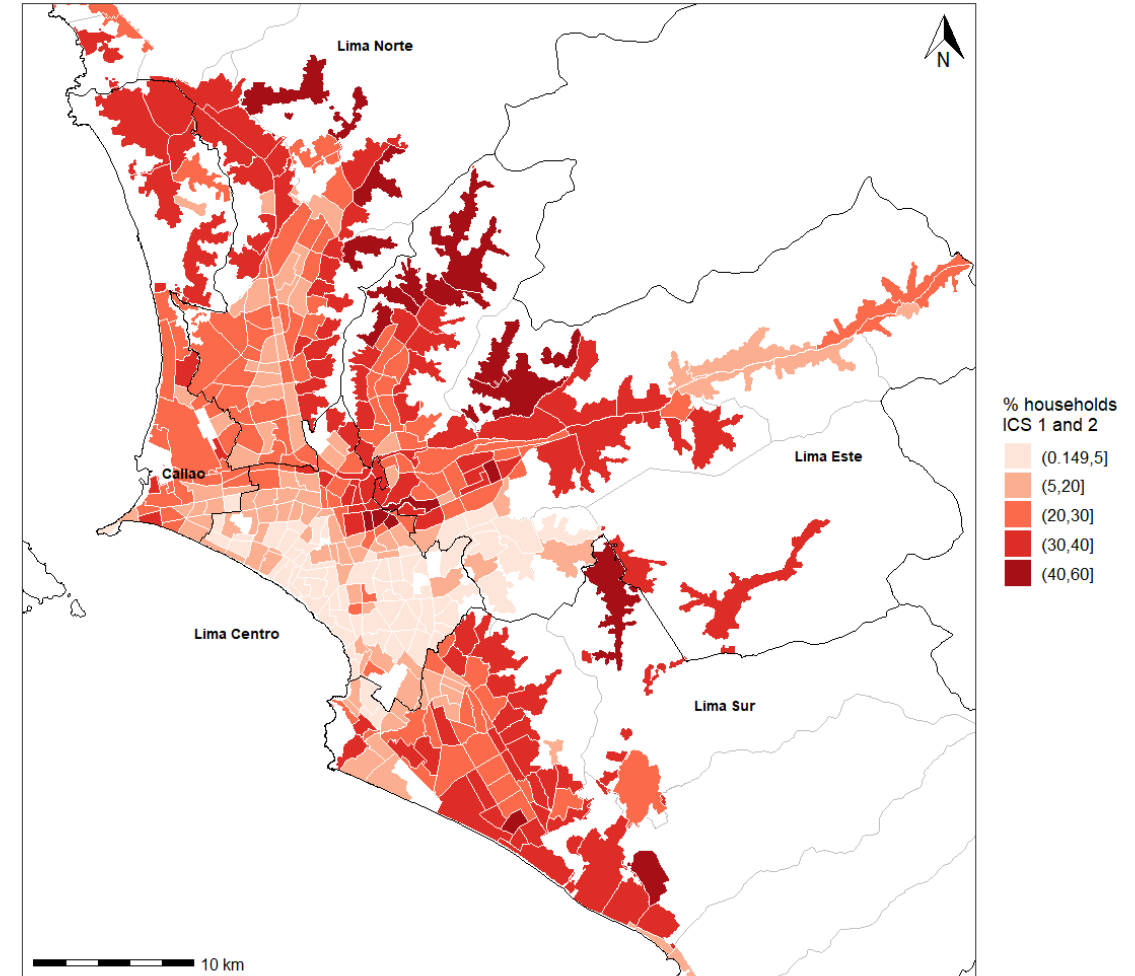
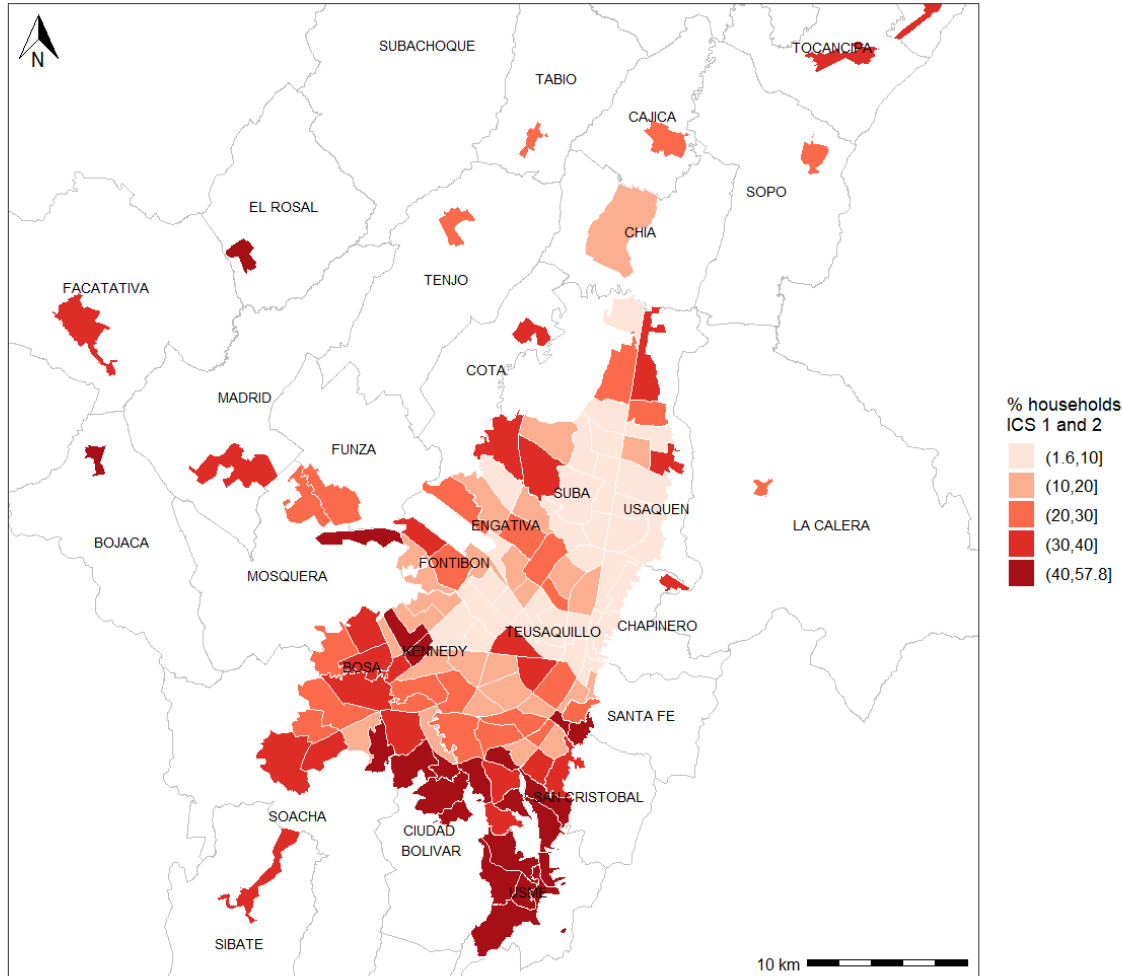
10 millones  
de habitantes cada  
una

Transición  
urbana en el  
siglo XX

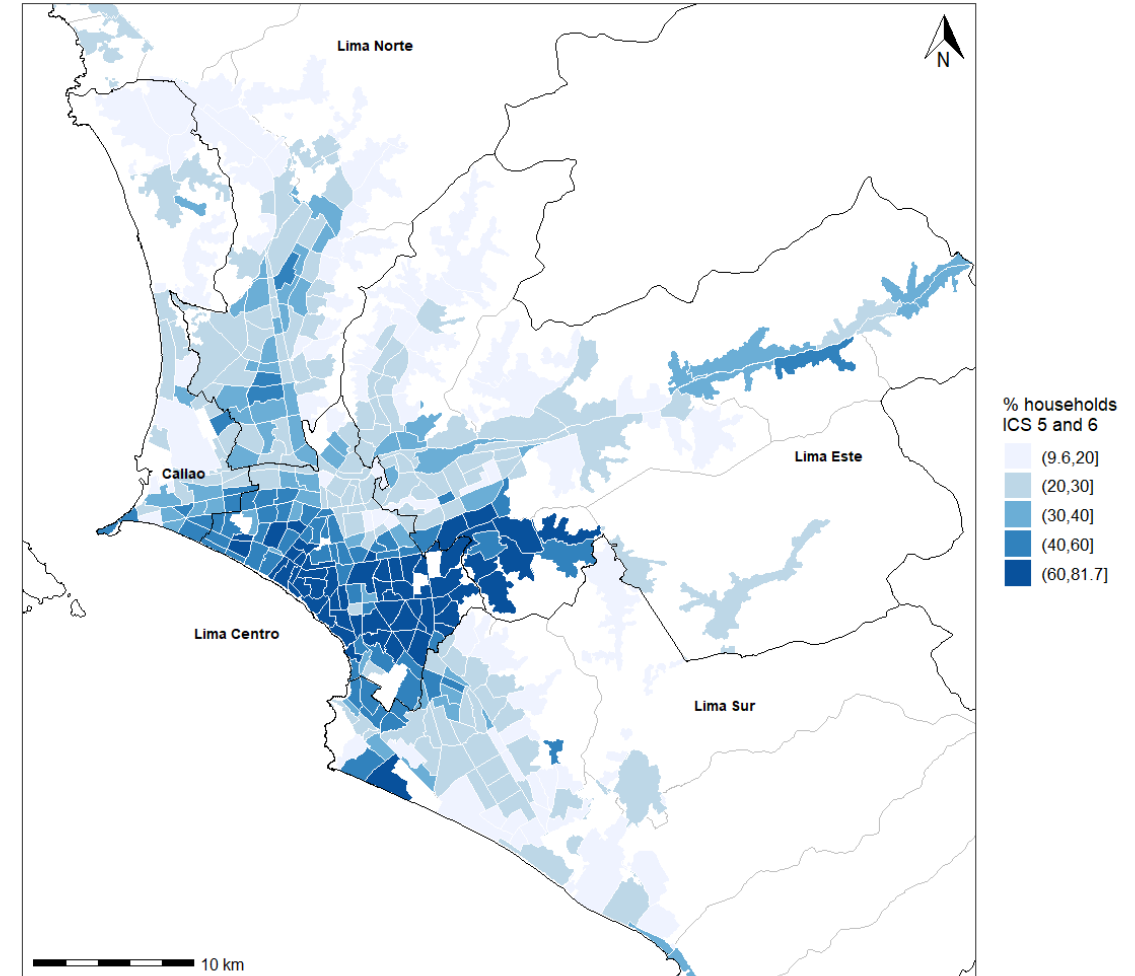
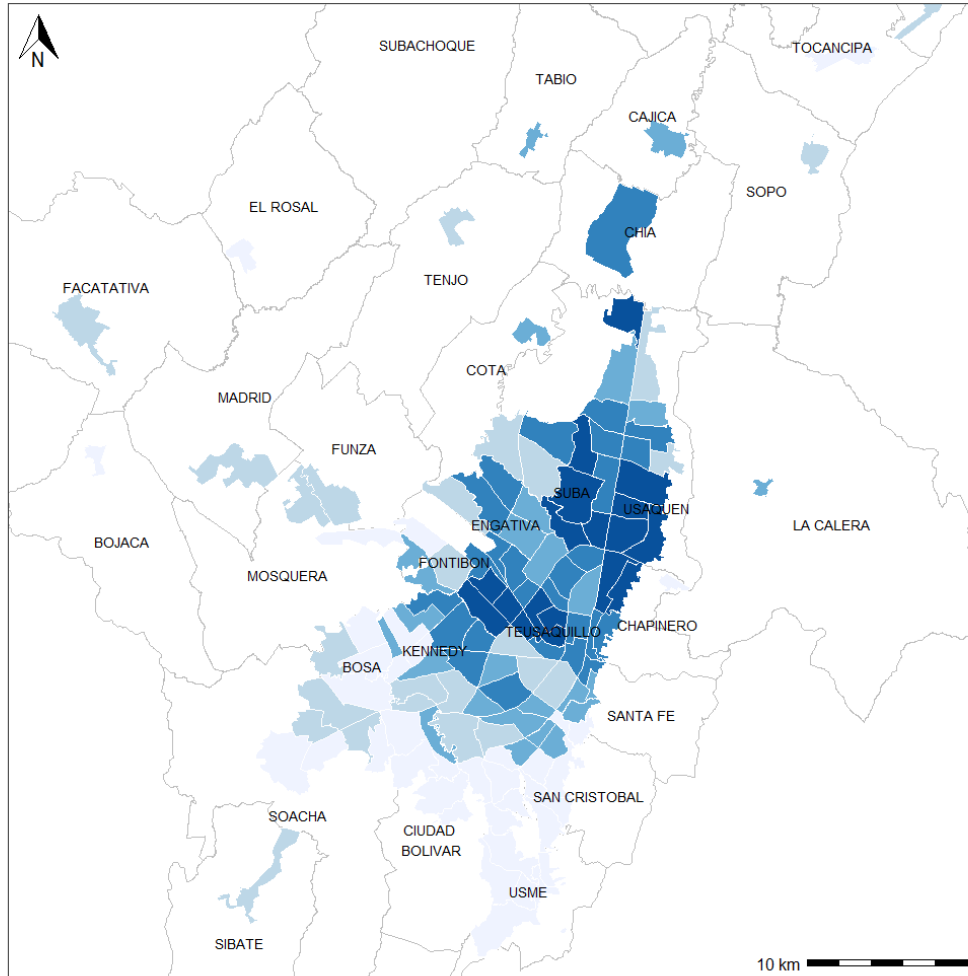
Crecimiento  
urbano **sin**  
planificar

## Manchas urbanas de Bogotá y Lima





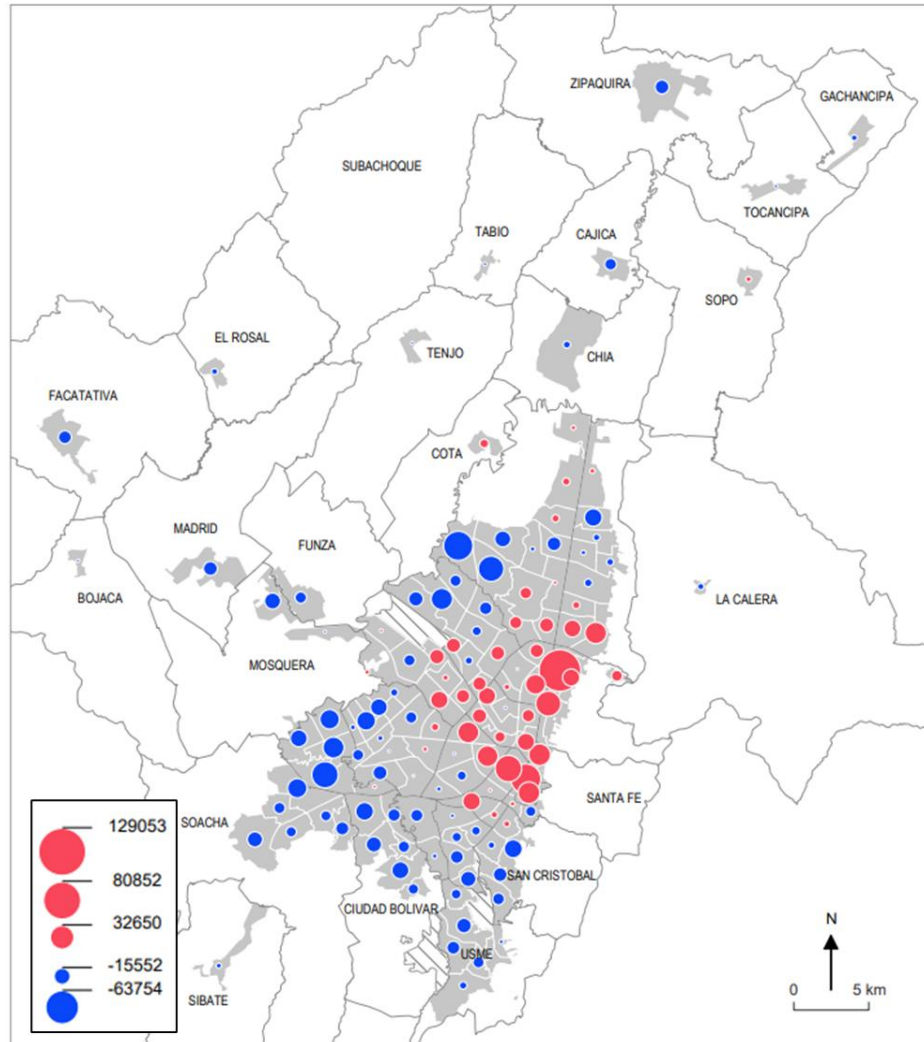
Ubicación de los hogares por Índice de Condición Social (ICS).  
**25% ICS más bajos.** Elaboración propia.



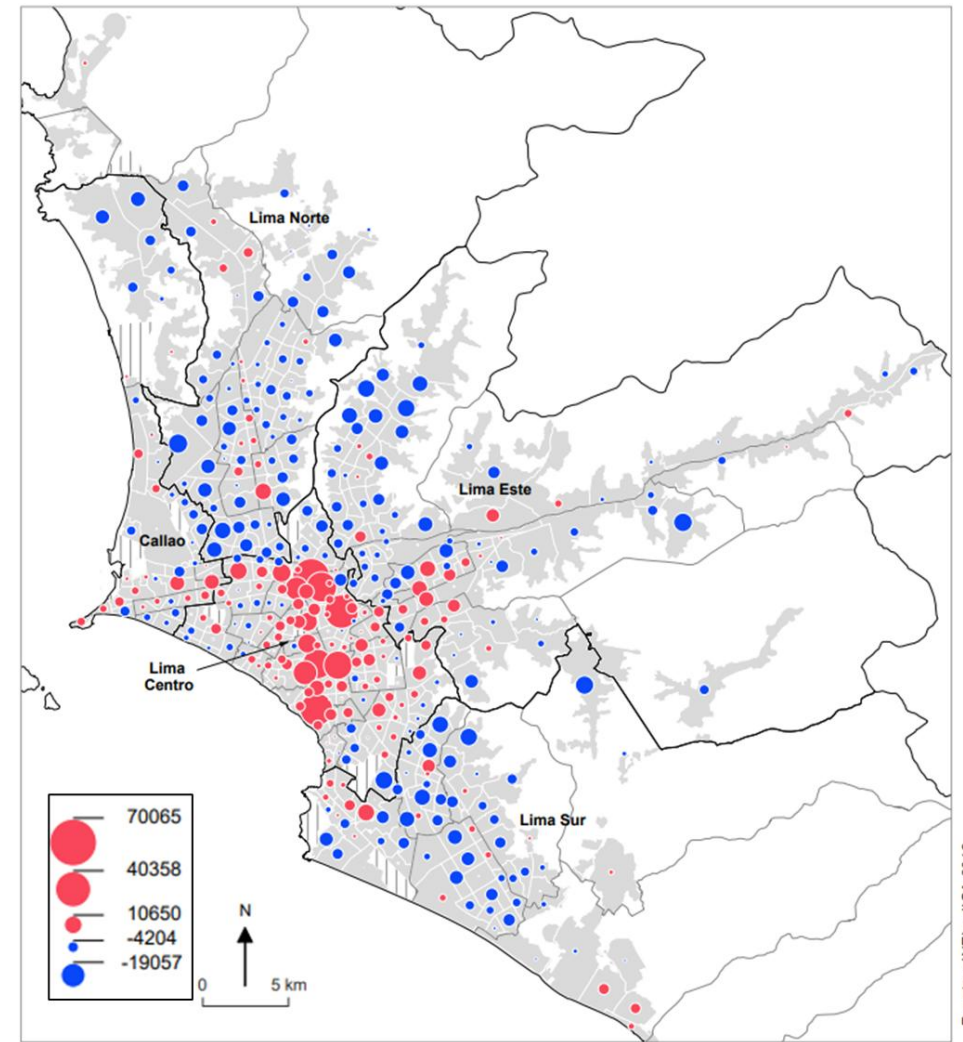
Ubicación de los hogares por Índice de Condición Social (ICS).  
**25% ICS más altos.** Elaboración propia.

Saldo de los viajes salientes y entrantes por zona en Bogotá y Lima en la mañana

*Spatial mismatch*



Fuentes: DANE 2018 y EMU 2019

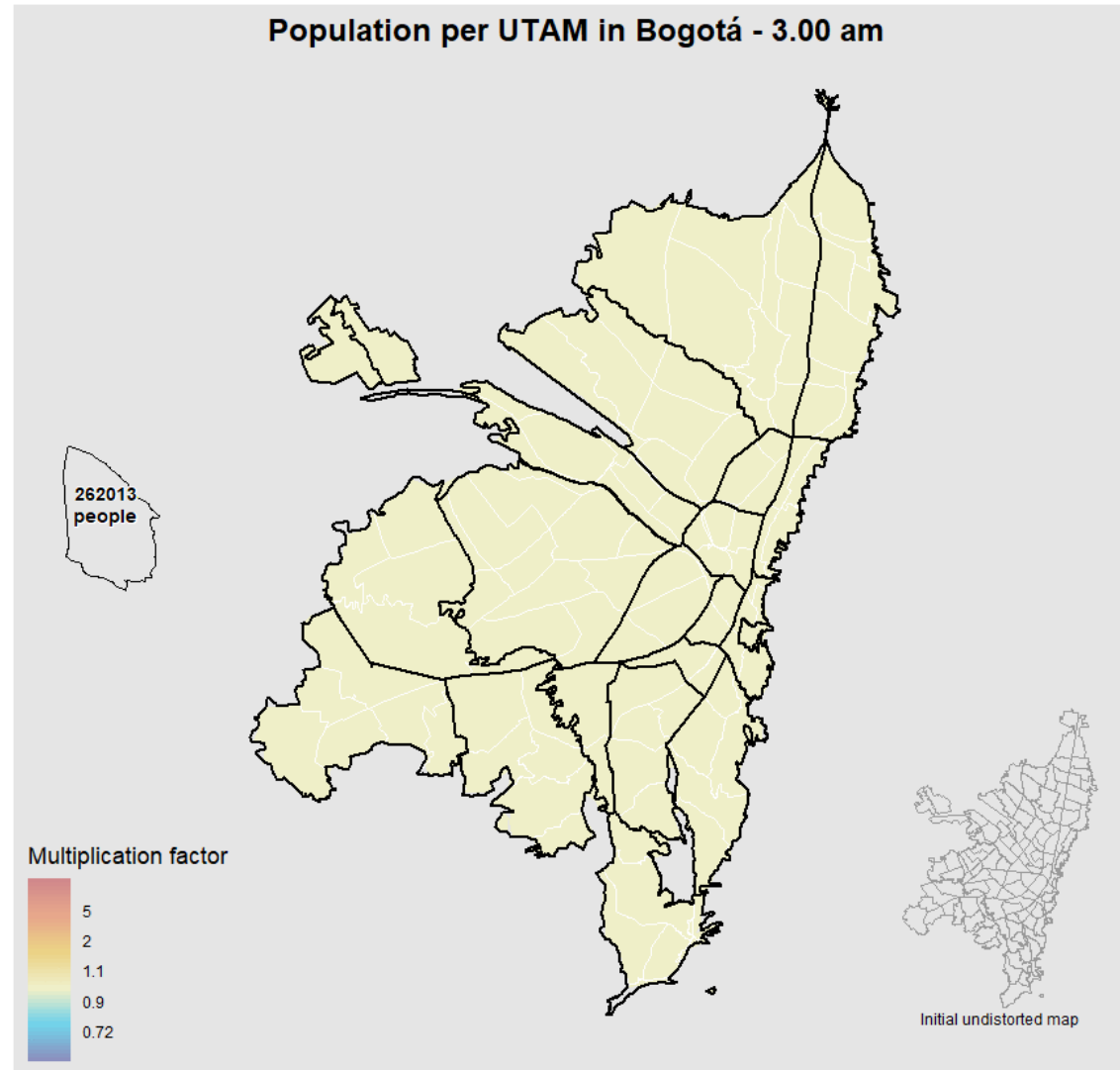


Fuentes: INEI y JICA 2012



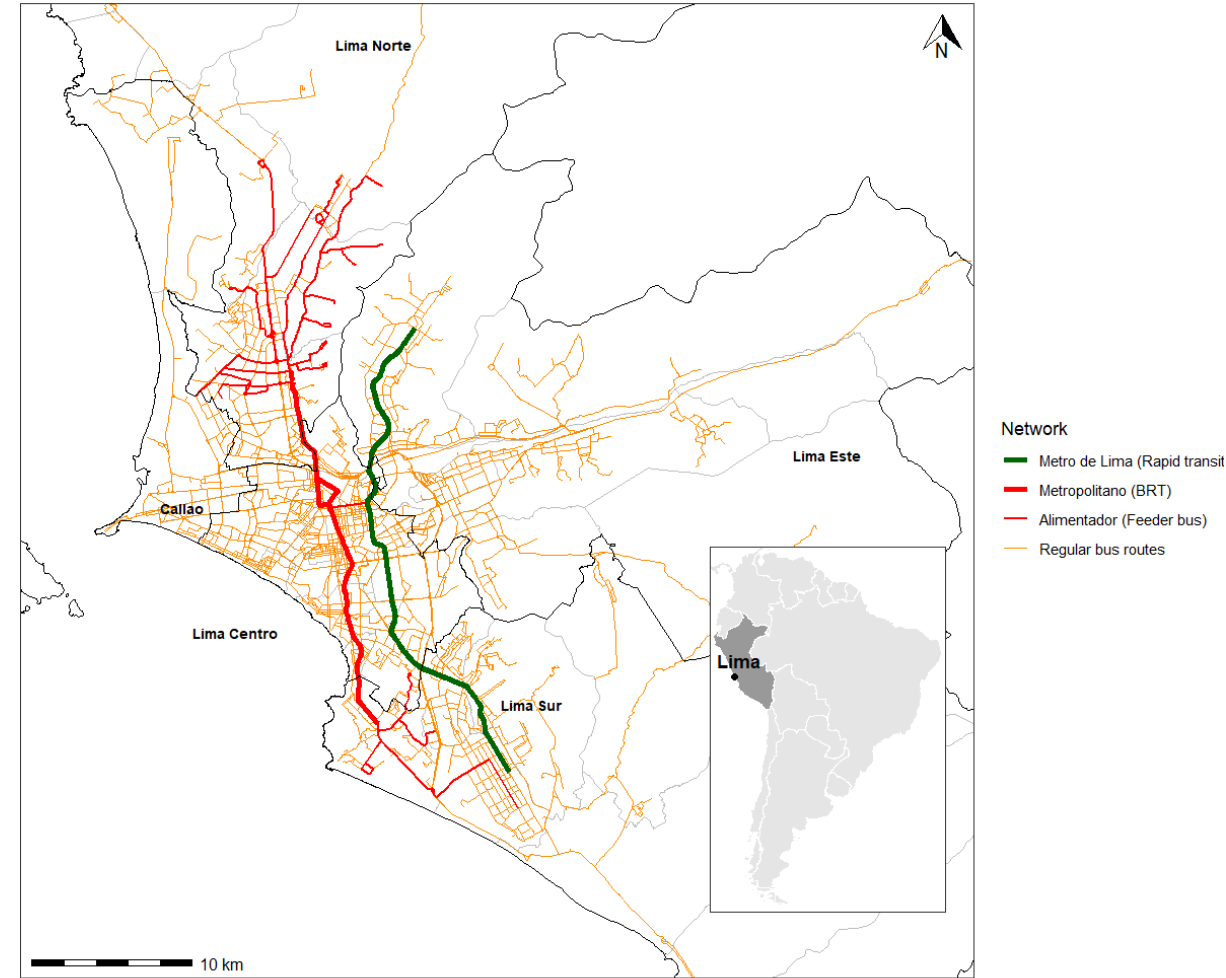
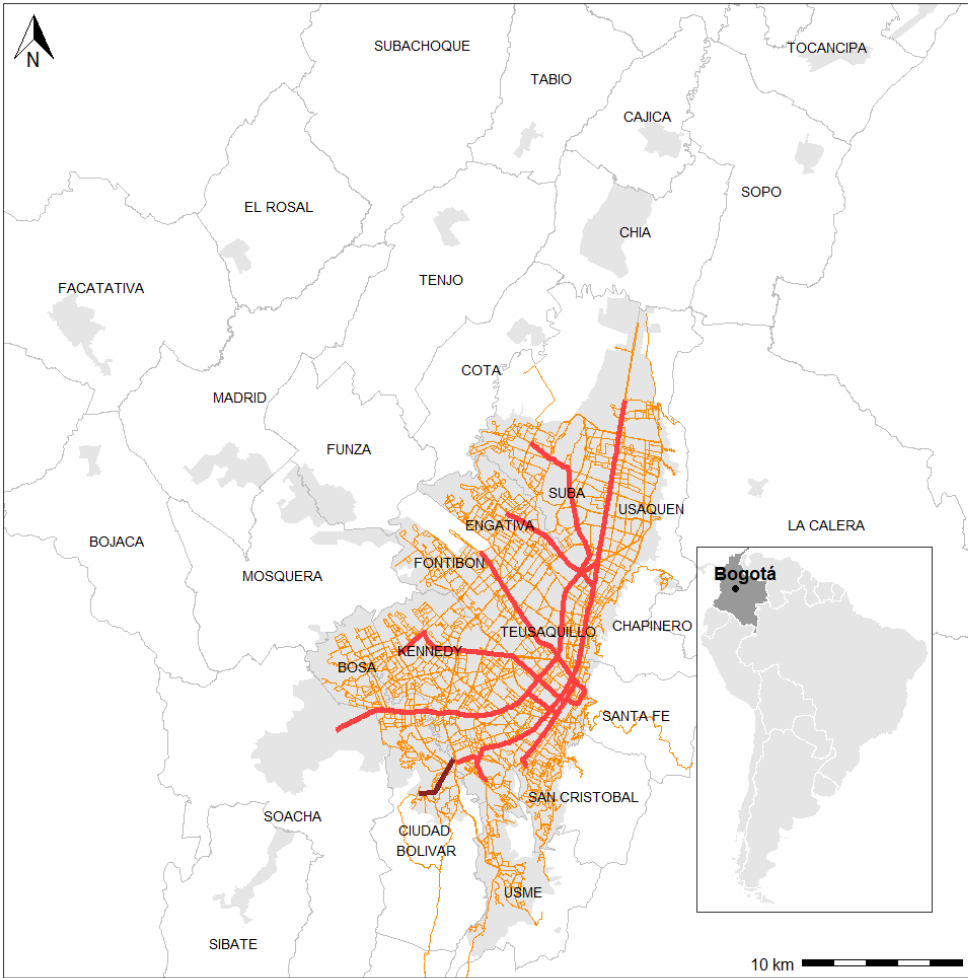
Evolución de la distribución espacial de la población urbana a lo largo de 24 horas.

« *Pulsos urbanos cotidianos* »



Se deforman las zonas (UPZ) para que su superficie sea proporcional a la población presente según el momento del día.





Redes de transporte público. Elaboración propia.

## ¿Cómo evaluar las emisiones de GEI y contaminantes aéreos producidas por la movilidad urbana con base en los **patrones individuales de viaje**?

- Analizar las emisiones a partir de los patrones individuales de viaje.
- Enfoque de **movilidad sostenible**.
- Evidenciar **desigualdades en cuanto a la huella ambiental** generada por los viajes de las personas según su **lugar de residencia**.
- Apoyar a las **políticas públicas** de movilidad urbana para reducir las emisiones a la vez que cerrar las desigualdades de movilidad.

## Filosofía del estudio

- **Ciencia abierta** y análisis de datos en R.
- Patrones de viajes usando las **encuestas de movilidad urbana** (EMU) existentes.
- Proponer un **método unificado y reproducible** para comparar ciudades.
- **Subsanar limitaciones** de estudios anteriores sobre emisiones de GEI y contaminantes aéreos.

El script y el detalle de la metodología en GitHub



[https://github.com/ESO-Rennes/Network\\_Routing\\_Mapping/blob/main/README.md](https://github.com/ESO-Rennes/Network_Routing_Mapping/blob/main/README.md)



(Sobre emisiones de GEI en LAC: Bedoya et al., 2016, Pérez-Criado & Ubilla-Bravo, 2023)

(Sobre emisiones de contaminantes aéreos: Giraldo Amaya, 2005; INECC, 2014; Koupal & Palacios, 2019; Rojas et al., 2023; Romero et al., 2020)

**Generación y distribución de los viajes**  
**Asignación de los modos**

EMU 2012 (Lima)  
 EMU 2019 (Bogotá)

**Asignación de la ruta**

Red de transporte público  
 (SDM en Bogotá / ATU en Lima)  
 Red vial OpenStreetMap



**DISTANCIA (km)**

**EMISIONES**

= Distancia x Factor de emisión

**Inventario de vehículos por tipo de combustible**

SDA (Bogotá) / MINAM, MML y otras fuentes (Lima)

**Factor de emission para GEI (CO2-eq)**

UPME (Bogotá) / MINAM (Lima)

**Número de pasajeros por vehículo**

UPME (Bogotá) / Gouldson et al, 2015 (Lima)

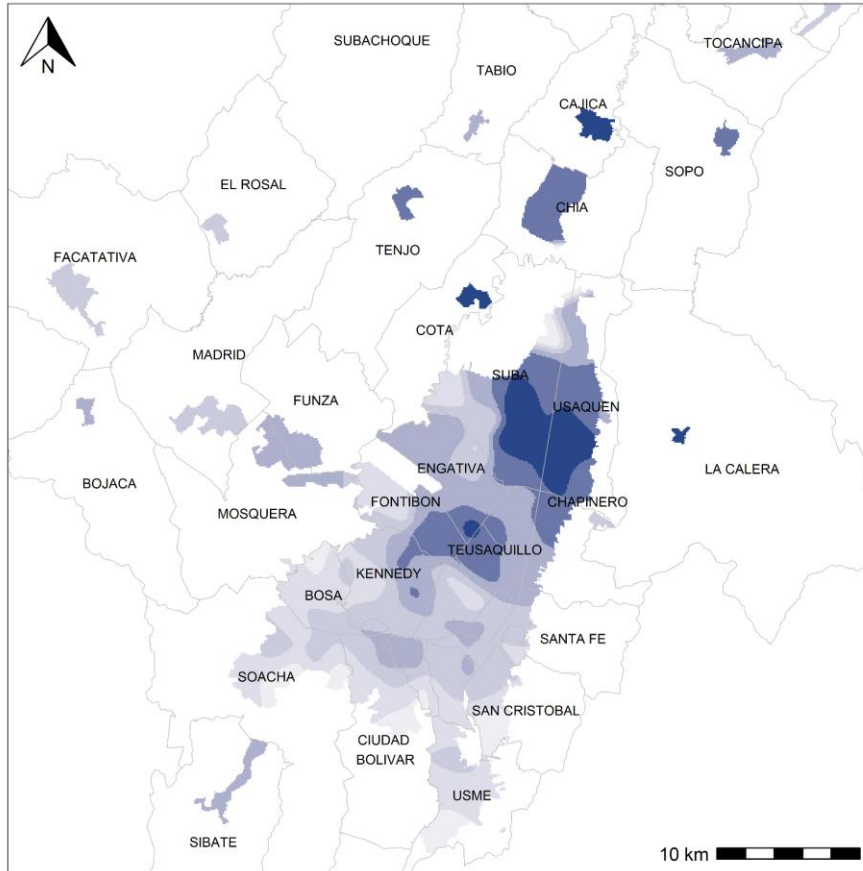
**FACTOR DE EMISION (g/pasajero-km)**



	Bogotá	Lima	Bogotá	Lima	Bogotá	Lima
<b>Modo principal</b>	<b>Partición modal (% N. viajes)</b>		<b>Millones de pasajeros- km por día</b>		<b>Emisiones de GEI (tCO2-eq por día)</b>	
BRT	13.3	2.1	30.1	5.8	121	87
Bicicleta	6.0	0.4	5.3	0.1	-	-
Moto	4.5	0.3	8.0	0.3	608	22
Otro	0.9	2.1	1.4	2.4	69	221
Transporte informal	3.5	8.6	4.7	4.3	351	243
Auto privado	11.6	8.5	16.0	10.9	2,435	1,474
Metro	-	0.4	-	0.8	-	0
Bus convencional	16.3	58.9	27.3	98.9	1,523	4,794
Escolar	2.3	-	2.5	-	130	-
Taxi	3.6	3.8	4.0	4.2	644	767
A pie	38.1	15.0	9.5	3.0	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>108.7</b>	<b>130.7</b>	<b>5,881</b>	<b>7,609</b>

Contexto		Problemática		Metodología		Resultados	
Modo principal	Bogotá	Lima	Bogotá	Lima	Bogotá	Lima	
	Partición modal (% N. viajes)		Millones de pasajeros-km por día		Emisiones de GEI (tCO2-eq por día)		
BRT	13.3	2.1	30.1	5.8	121	87	
Bicicleta	6.0	0.4	5.3	0.1	-	-	
Moto	4.5	0.3	8.0	0.3	608	22	
Otro	0.9	2.1	1.4	2.4	69	221	
Transporte informal	3.5	8.6	4.7	4.3	351	243	
Auto privado	11.6	8.5	16.0	10.9	2,435	1,474	
Metro	-	0.4	-	0.8	-	0	
Bus convencional	16.3	58.9	27.3	98.9	1,523	4,794	
Escolar	2.3	-	2.5	-	130	-	
Taxi	3.6	3.8	4.0	4.2	644	767	
A pie	38.1	15.0	9.5	3.0	-	-	
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>108.7</b>	<b>130.7</b>	<b>5,881</b>	<b>7,609</b>	

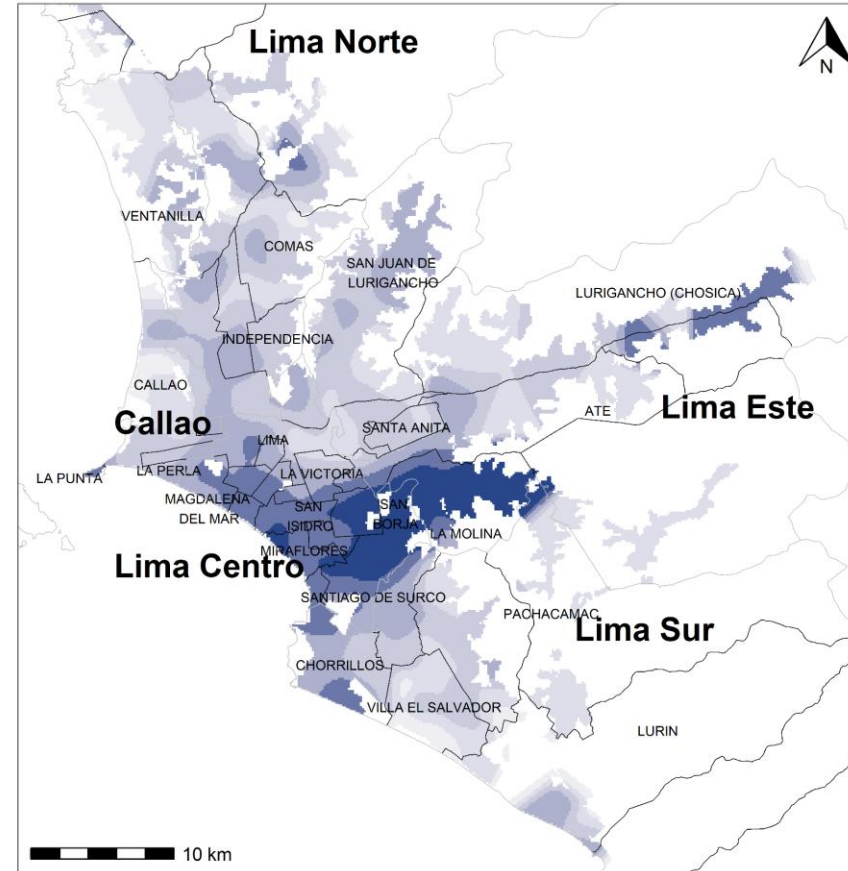
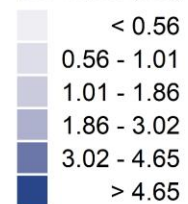
## Distancia cotidiana **en auto** per capita más alta en el Norte de Bogotá y el Centro-Sur de Lima



### Auto particular

Distancia cotidiana promedio per cápita (km)

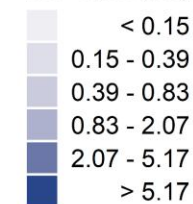
- Límite de municipio fuera de Bogotá DC
- Límite de localidad dentro de Bogotá DC



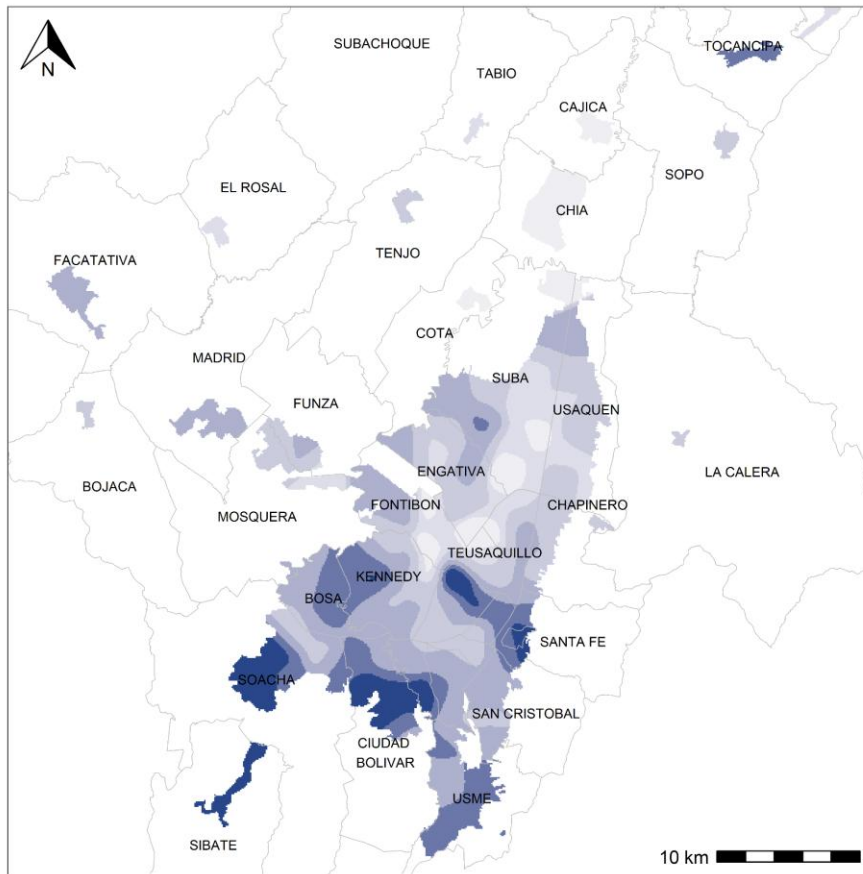
### Auto particular

Distancia cotidiana promedio per cápita (km)

- Área interdistrital
- Límite de distrito



**Distancia cotidiana a pie per capita más alta en los centros históricos, el sur de Bogotá y los conos de Lima**

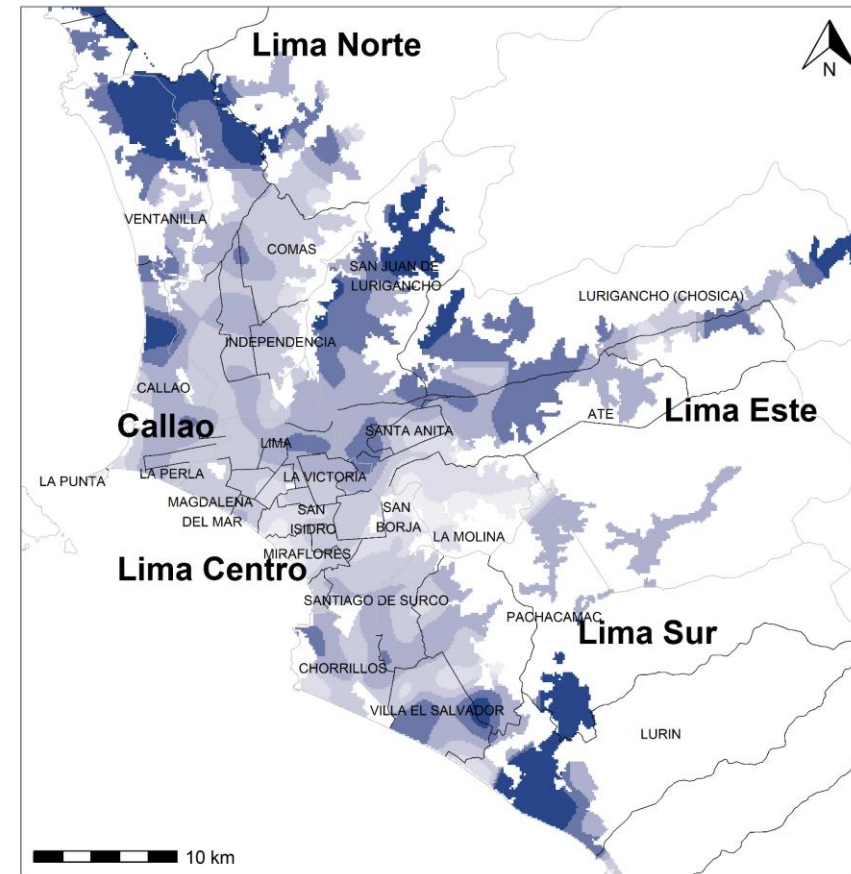


**A pie**

Distancia cotidiana promedio per cápita (km)

□ Límite de municipio fuera de Bogotá DC  
□ Límite de localidad dentro de Bogotá DC

- < 0.63
- 0.63 - 0.75
- 0.75 - 1.03
- 1.03 - 1.32
- 1.32 - 1.58
- > 1.58



**A pie**

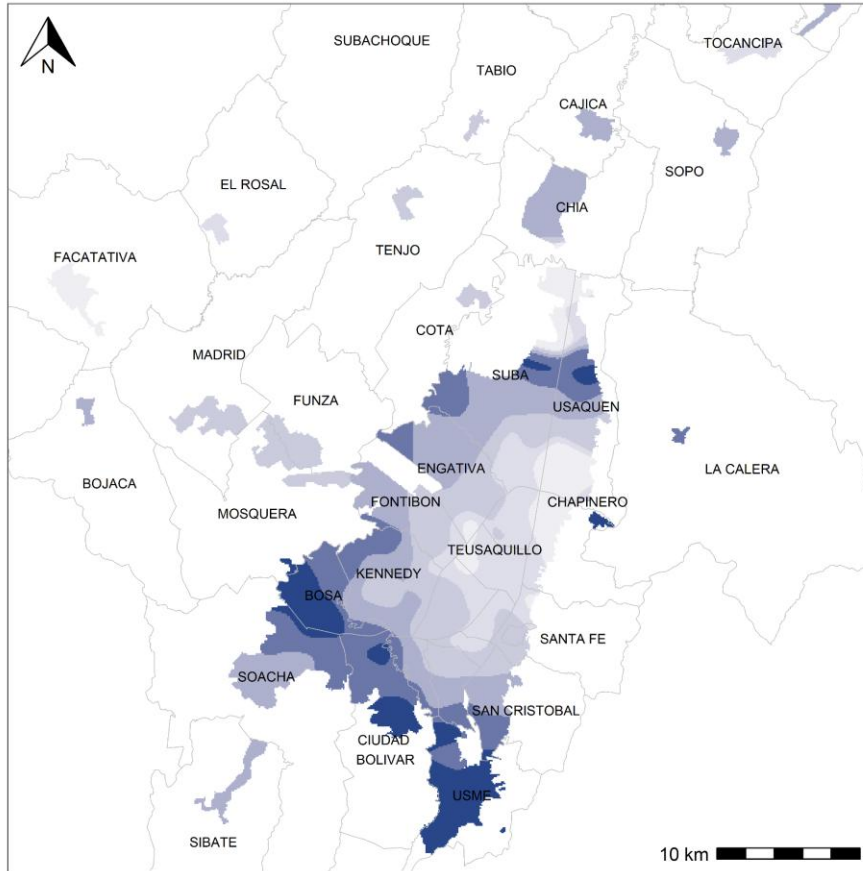
Distancia cotidiana promedio per cápita (km)

□ Área interdistrital  
□ Límite de distrito

- < 0.07
- 0.07 - 0.15
- 0.15 - 0.26
- 0.26 - 0.42
- 0.42 - 0.6
- > 0.6



**Distancia cotidiana en transporte público per capita más alta en las periferias**

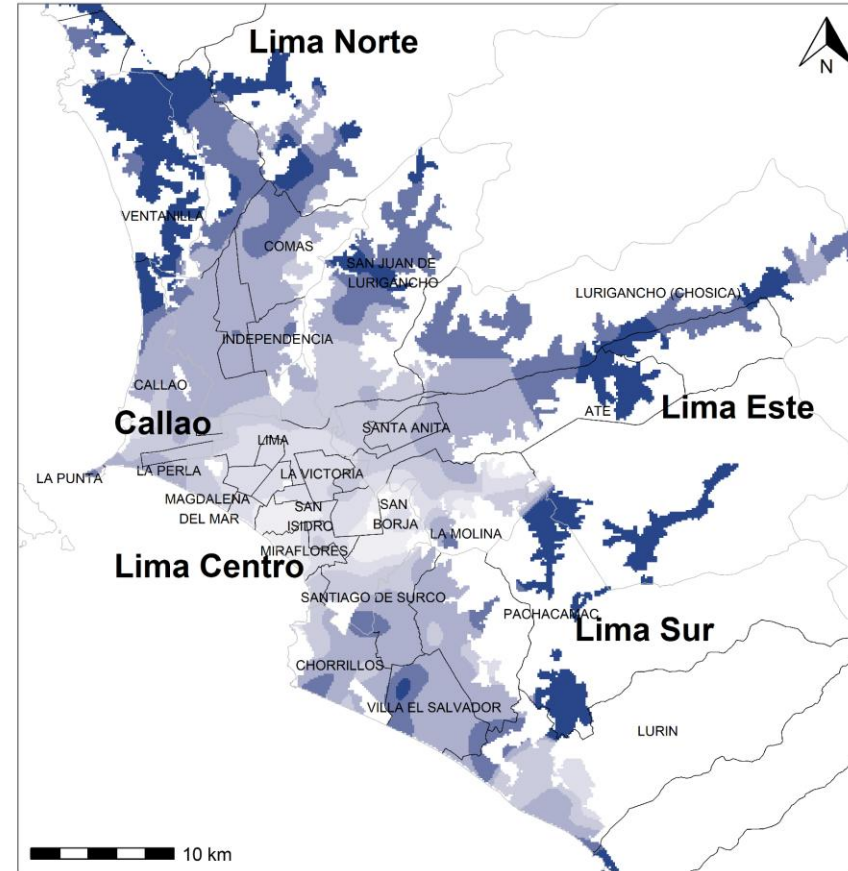


**Transporte público**

Distancia cotidiana promedio per cápita (km)

□ Límite de municipio fuera de Bogotá DC  
□ Límite de localidad dentro de Bogotá DC

- < 3.09
- 3.09 - 3.97
- 3.97 - 5.87
- 5.87 - 7.60
- 7.60 - 9.24
- > 9.24



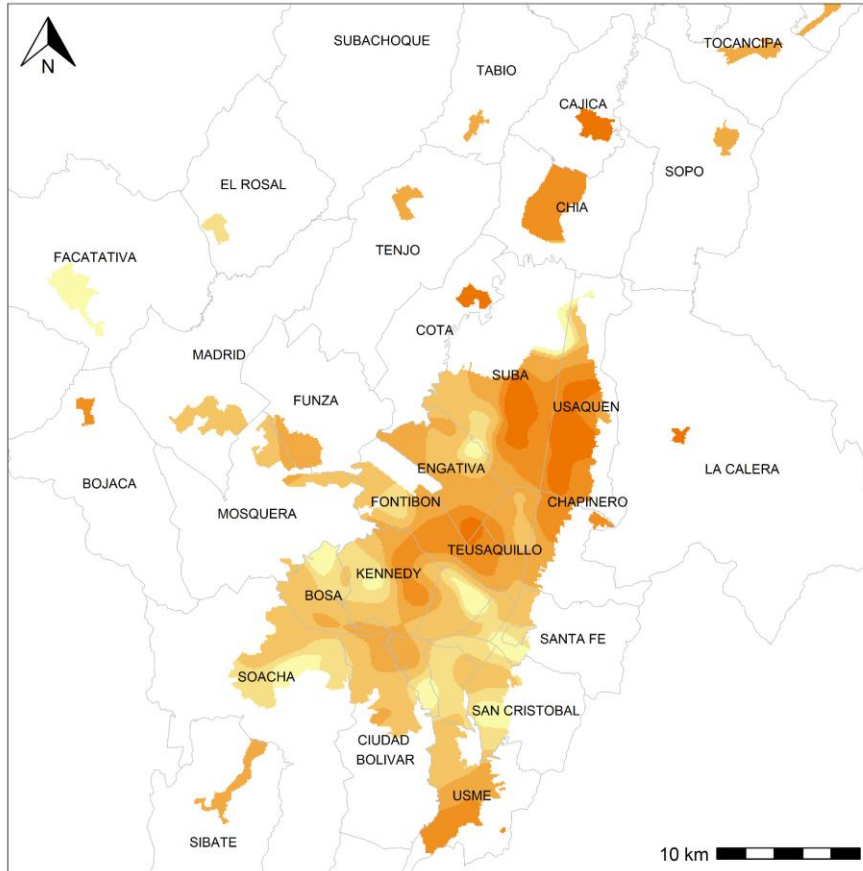
**Transporte público**

Distancia cotidiana promedio per cápita (km)

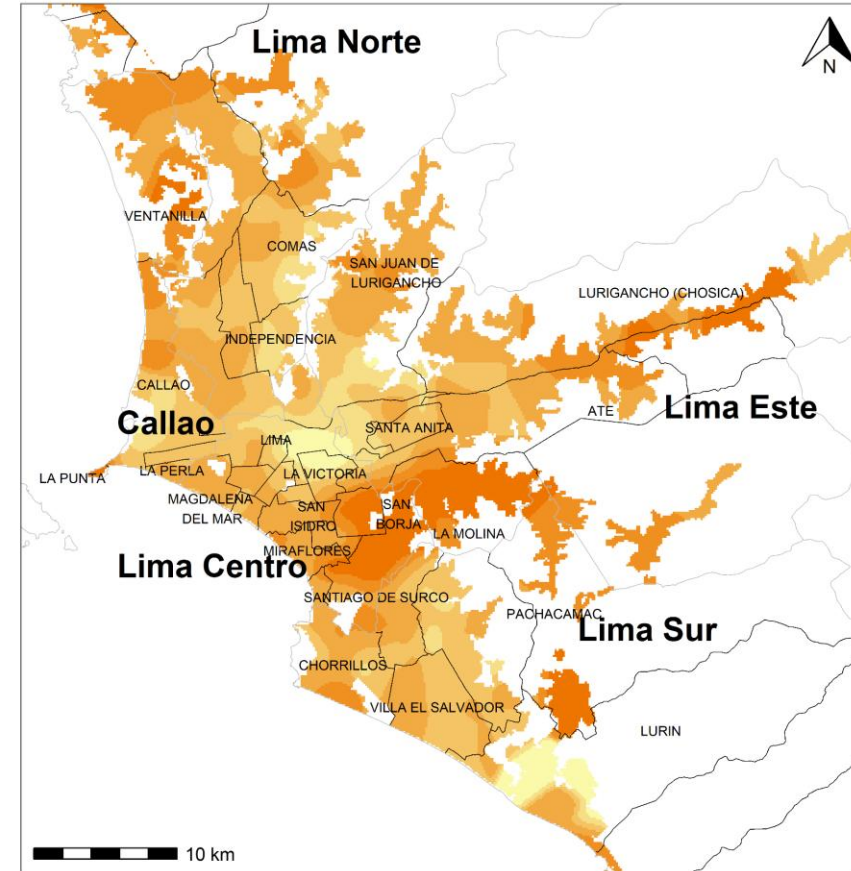
□ Área interdistrital  
□ Límite de distrito

- < 4.34
- 4.34 - 6.75
- 6.75 - 9.46
- 9.46 - 13.16
- 13.16 - 16.28
- > 16.28

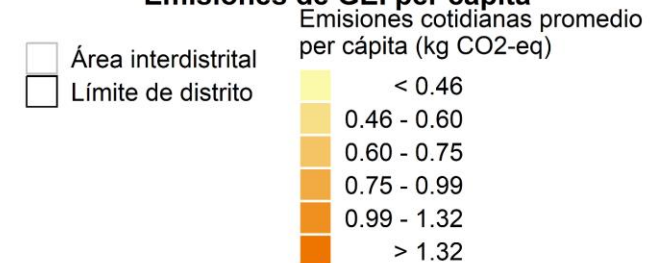
## Emisiones de GEI según el lugar de residencia de las personas que viajaron



### Emisiones de GEI per cápita



### Emisiones de GEI per cápita



## Aportes del estudio

- Modelización multimodal
- Cálculo de la distancia por la red vial y las rutas de transporte público
- Factores de emisiones basados en inventarios locales
- Metodología unificada que permite comparaciones
- Conocimiento sobre prácticas de movilidad y emisiones

## Limitaciones

- Caducidad de las encuestas de movilidad
- Hipótesis fuertes (uso sistemático del camino más corto en una red jerárquica)
- Representación de los viajes intermodales y de los viajes a pie en las encuestas de movilidad

## Conclusión y perspectivas: desigualdades ecológicas y futuro de la movilidad sostenible

- Un reto para las políticas públicas: el incremento del tráfico producto de **la individualización de la movilidad** en América Latina.
- Orientar las medidas de mitigación... sin sumar exclusión a la exclusión.
- **Modos distintos atienden poblaciones distintas** con necesidades y patrones de viaje distintos → ¿Cambio modal?
- Necesidad de triangulación con **métodos cualitativos** para entender el “por qué” de la elección modal y el potencial de cambio.



# Bibliografía (1/2)

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2021). *Plan de Acción Climática Bogotá 2020-2050*.

Bedoya, V., Marquet, O., & Miralles-Guasch, C. (2016). Estimación de las emisiones de CO2 desde la perspectiva de la demanda de transporte en Medellín. *Revista Transporte y Territorio*, 15, 302–322.

Bigo, A. (2020). *Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement*. [These de doctorat, Institut polytechnique de Paris]. <http://www.theses.fr/2020IPPAX068>

Bocarejo, J. P., & Urrego, L. F. (2020). The impacts of formalization and integration of public transport in social equity: The case of Bogota. *Research in Transportation Business & Management*, 42. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100560>

CAF. (2010). *Observatorio de Movilidad Urbana para América Latina*. CAF. <https://cafscioteca.azurewebsites.net/handle/123456789/420>

CORPOEMA. (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*. (p. 118). Ministerio de Energía y Minas.

Creutzig, F. (2016). Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation. *Transport Reviews*, 36(3), 341–360. <https://doi.org/10.1080/01441647.2015.1079277>

De Vos, J. (2024). Towards truly sustainable mobility. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 24, 101039. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2024.101039>

Dhakai, S., Minx, J. C., & Toth, F. L. (2022). Chapter 2: Emissions trends and drivers. In *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-2/>

Edelenbosch, O. Y., McCollum, D. L., van Vuuren, D. P., Bertram, C., Carrara, S., Daly, H., Fujimori, S., Kitous, A., Kyle, P., Ó Broin, E., Karkatsoulis, P., & Sano, F. (2017). Decomposing passenger transport futures: Comparing results of global integrated assessment models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 281–293. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.003>

Eichhorst, U., Bongardt, D., Fouchard, B., & Verry, D. (2017). *MobiliseYourCity | Mesure et rapportage des émissions de GES | MobiliseYourCity* (p. 40). MobiliseYourCity / GIZ. <https://www.mobiliseyourcity.net/fr/node/498>

Emelianoff, C. (2008). La problématique des inégalités écologiques, un nouveau paysage conceptuel. *Ecologie politique*, 35(1), 19–31.

Gallardo Klenner, L., Escribano, J., Dawidowski, L., Rojas, N., Andrade, M. de F., & Osses Alvarado, M. (2012). *Evaluation of vehicle emission inventories for carbon monoxide and nitrogen oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.11.051>

Giraldo Amaya, L. A. (2005). *Estimación del Inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes*. Universidad de los Andes.

Gouldson, A., McAnulla, F., Sakai, P., Sudmant, A., Castro, S., & Ramos, C. (2015). *La economía de ciudades resilientes y de bajas emisiones de carbono: Lima-Callao, Perú* (p. 144). BID. <https://publications.iadb.org/es/la-economia-de-ciudades-resilientes-y-de-bajas-emisiones-de-carbono-lima-callao-peru>

INECC. (2014). *Elaboración del Inventario Nacional de Emisiones de Fuentes Móviles para México 2013 y proyección 2030 mediante el uso del modelo Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES)* (p. 100). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

# Bibliografía (2/2)

- Koupal, J., & Palacios, C. (2019). Impact of new fuel specifications on vehicle emissions in Mexico. *Atmospheric Environment*, 201, 41–49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.12.028>
- Lee, K., & Michael, G. (2021). *Air Quality Life Index Annual Update*. Energy Policy Institute at the University of Chicago. <https://climateattribution.org/resources/air-quality-life-index-annual-update/>
- Marsden, G., Mullen, C., Bache, I., Bartle, I., & Flinders, M. (2014). Carbon reduction and travel behaviour: Discourses, disputes and contradictions in governance. *Transport Policy*, 35, 71–78. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.05.012>
- Mercier, J., Tremblay-Racicot, F., Carrier, M., & Duarte, F. (2019). *Governance and Sustainable Urban Transport in the Americas*. Palgrave MacMillan. <https://www.fss.ulaval.ca/actualites/governance-and-sustainable-urban-transport-americas>
- Municipalidad de Lima. (2021). *Plan Local de Cambio Climático de la Provincia de Lima 2021-2030*. <https://www.descubrelima.pe/plan-local-cambio-climatico/>
- Pérez-Criado, F., & Ubilla-Bravo, G. (2023). Movilidad en transporte privado y emisión de CO2: Patrones geoespaciales e implicancias en el ordenamiento territorial para el Área Metropolitana de Santiago, Chile. *Revista Transporte y Territorio*, 28, Article 28. <https://doi.org/10.34096/rtt.i28.10934>
- Rojas, N. Y., Mangones, S. C., Osses, M., Granier, C., Laengle, I., Alfonso A., J. V., & Mendez, J. A. (2023). Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 121, 103780. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103780>
- Romero, Y., Chicchon, N., Duarte, F., Noel, J., Ratti, C., & Nyhan, M. (2020). Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru. *Science of The Total Environment*, 698, 134313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134313>
- TARYET. (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)*. Ministerio de Energía y Minas. <http://namasenergia.minem.gob.pe/es-pe/estudio>
- Van Laake, T., Lozano, C., & Gillod, A. (2021). *Movilidad urbana, acceso a zonas rurales y conectividad interurbana sostenibles: Desafíos del transporte urbano para Colombia en el Siglo XXI*. Climate Chance. <https://www.despacio.org/portfolio/desafios-del-transporte-urbano-para-colombia-en-el-siglo-xxi/>



Gracias por su atención

 **Universidad de  
los Andes**  
Colombia



**Contacto**

Hugo Thomas

[h.thomas@uniandes.edu.co](mailto:h.thomas@uniandes.edu.co)





# Anexos

# Cuadros de datos

	Bogotá	Lima
<b>Modo principal</b>	<b>Distancia promedio por viaje (km)</b>	
BRT	13.4	17.0
Bicicleta	5.2	2.3
Moto	10.5	6.4
Otro	9.3	6.9
Transporte informal	7.8	3.0
Auto privado	8.2	7.8
Metro	-	12.9
Bus convencional	9.9	10.2
Escolar	6.6	-
Taxi	6.5	6.6
A pie	1.5	1.2
<b>PROMEDIO</b>	<b>6.4</b>	<b>7.9</b>
<b>(ponderado por el N° de viajes)</b>		



# Cuadros de datos

<i>Emission factors are in g/pax-km</i>	Average LF (pax/vehicle)	CO2-eq
Walking	1.0	-
Alimentador (BRT Feeder)	71.7	8
Private car	1.5	152
Bike	1.0	-
Bicitaxi	2.0	46
Cable car	10.0	7
Intermunicipal bus	13.6	71
Motorbike	1.2	76
e-scooter	1.0	2
Former traditional bus routes	13.6	51
SITP local bus routes	13.6	60
Transmilenio (BRT)	202.4	4
School bus	13.6	51
Informal transport	3.0	76
Taxi	1.1	163
Other	13.6	51

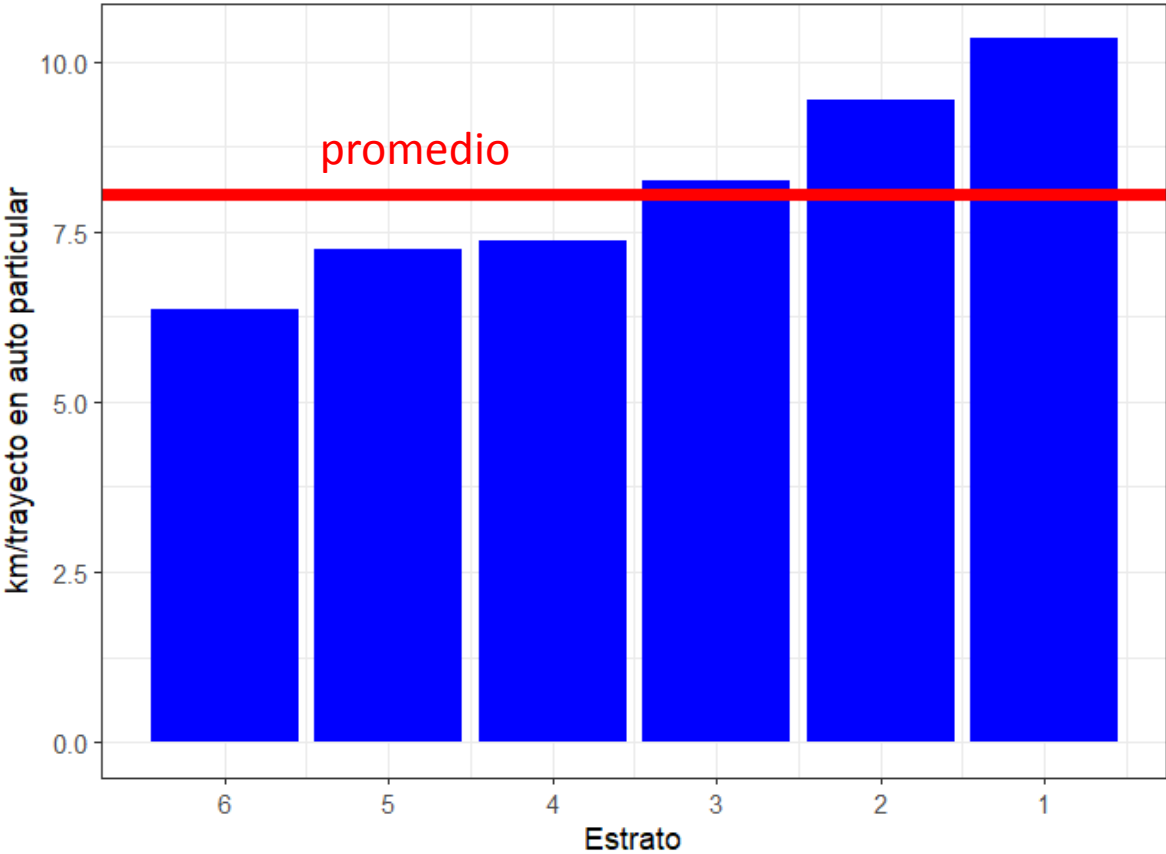
BOGOTA

<i>Emission factors are in g/pax-km</i>	Average LF (pax/vehicle)	CO2-eq
Walking	1.0	-
Bike	1.0	-
Motorbike	1.2	78.9
Mototaxi	2.0	47.4
Private car	1.5	134.6
Taxi	1.1	183.5
Colectivo	3.0	67.3
Combi	10.0	55.6
Custer	15.0	47.5
Bus	30.0	37.7
Metropolitano (BRT)	100.0	15.1
Small truck	2.0	406.6
Truck	2.0	406.6
Trailer	2.0	677.7
Metro de Lima (rapid transit)	1200.0	0.1
Other	2.0	100.9

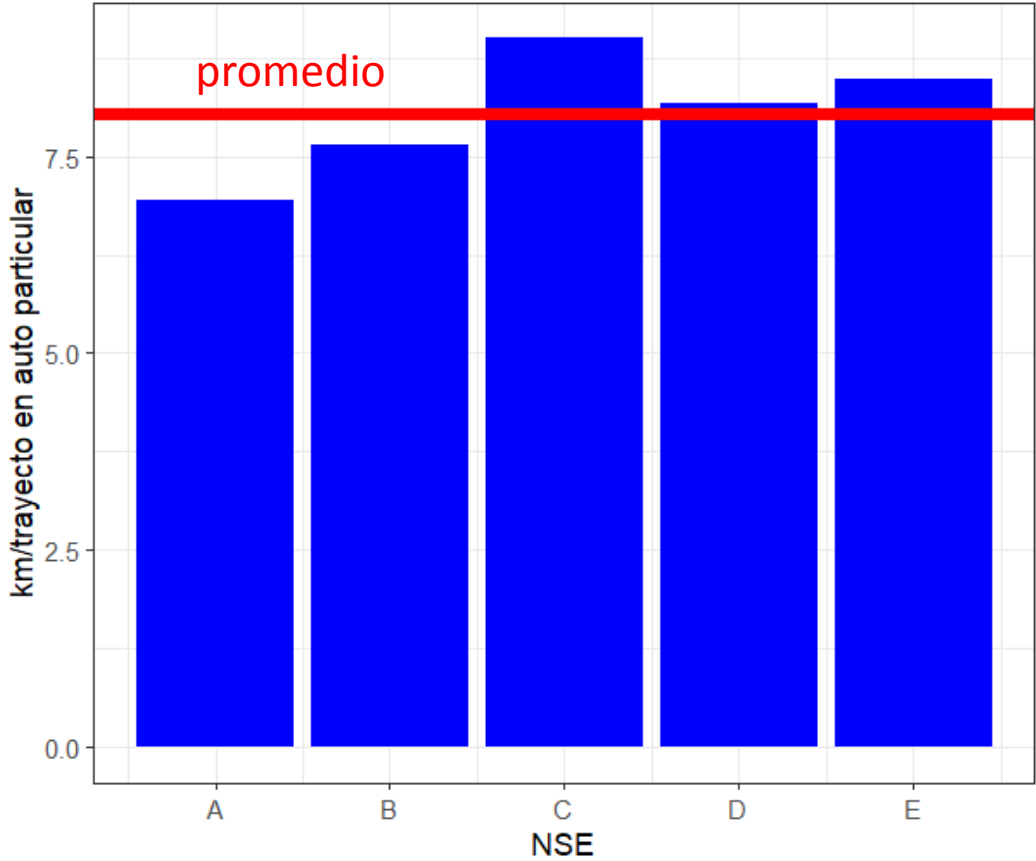
LIMA

# AUTO PARTICULAR

## Bogotá



## Lima



Distancias en auto **más largas** para los niveles socioeconómicos más bajos

# Palma ratios de intensidades de uso

$$Palma Ratio (PKT per capita) = \frac{(\sum_{10\% \text{ ICS más altos}} PKT \text{ per ca})}{(\sum_{10\% \text{ ICS más altos}} POI) \cdot (\sum_{4c})}$$

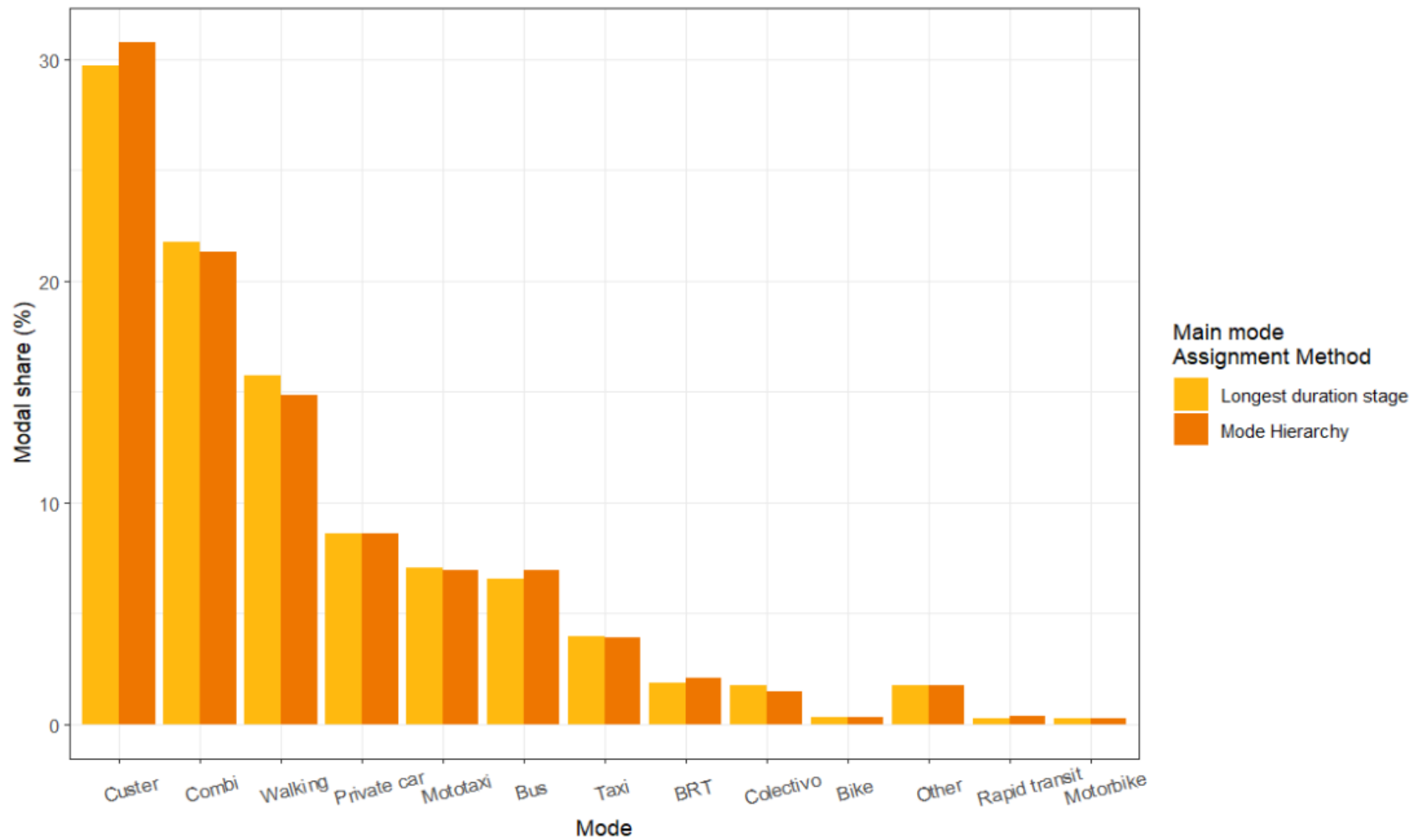
**Bogotá**

**Lima**

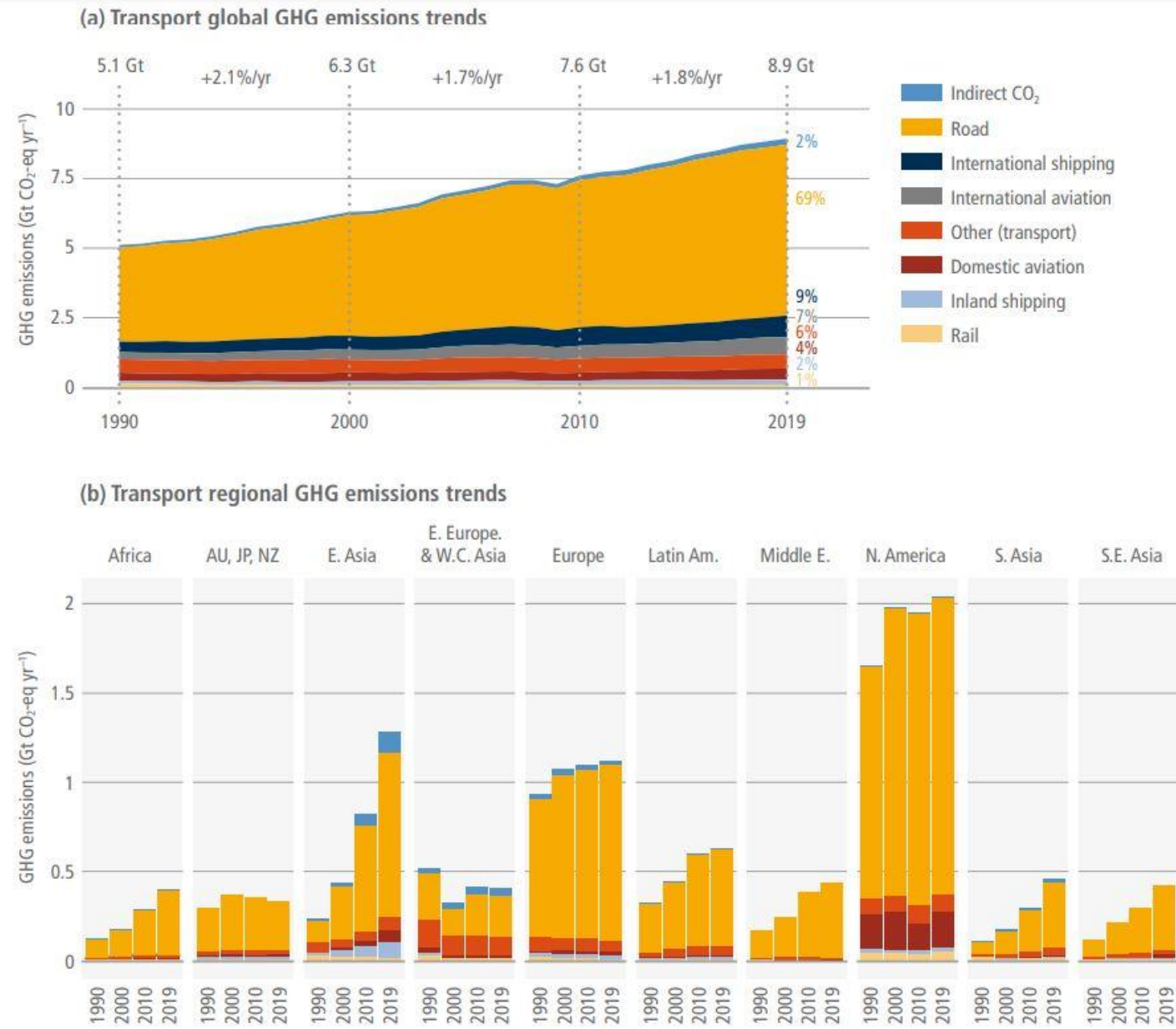
	Promedio (PKT/capita)	Palma ratio	Promedio (PKT/capita)	Palma ratio
Intensidad de uso del auto particular	1.8	9.64	1.2	3.34
Intensidad de uso de la caminata	1.1	0.65	0.3	0.42
Intensidad de uso del transporte público	6.3	0.37	10.1	0.44

Palma, 2011

Table by authors based on HMS 2019, HMS 2012, INEI 2017 and DANE 2018



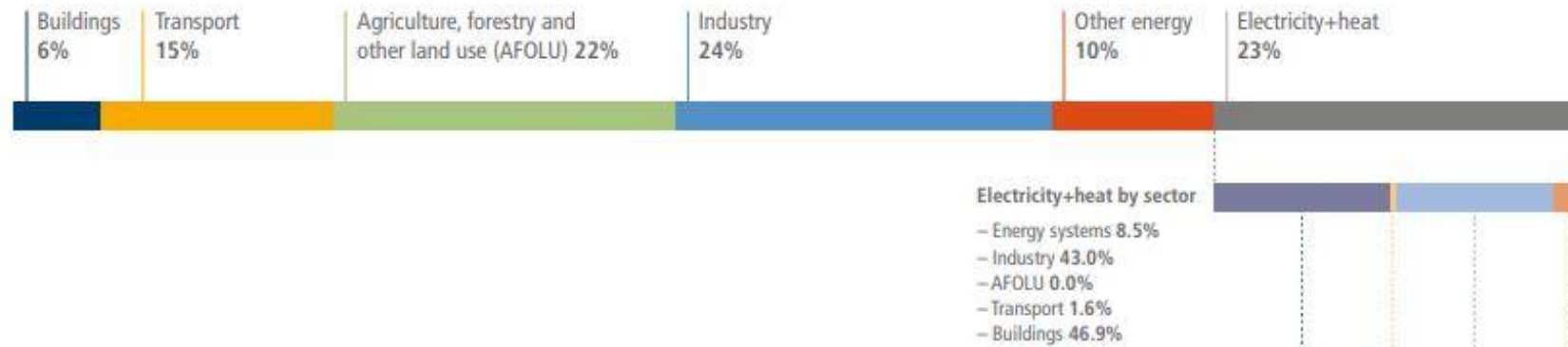
Two ways of assigning the main mode in Lima mobility survey. Chart by authors based on HMS 2012.



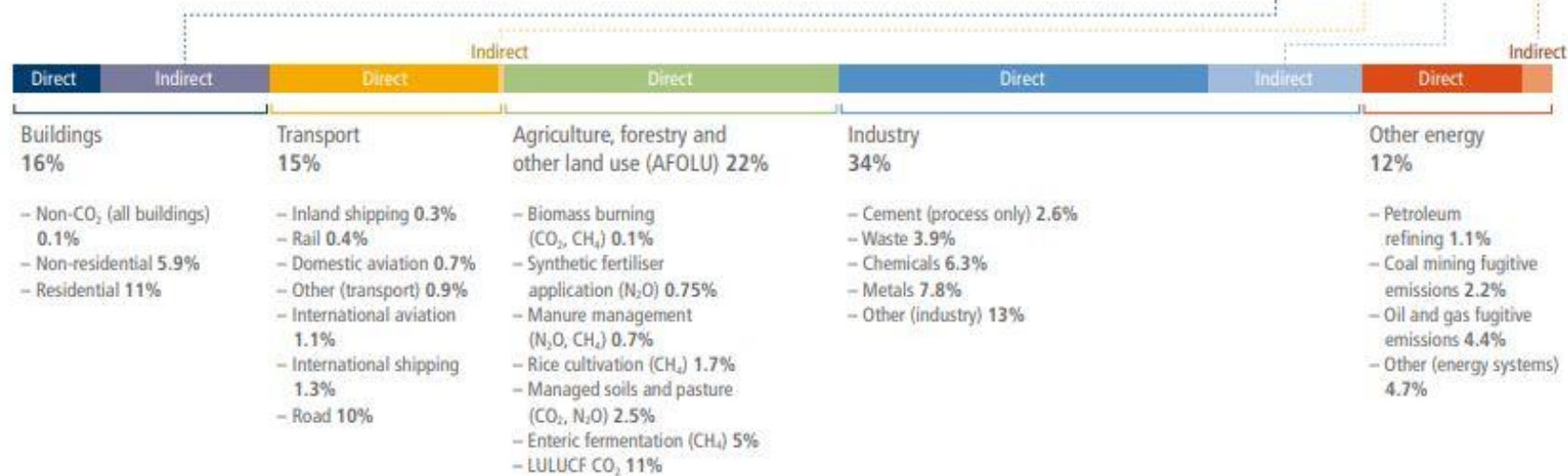
**Figure 10.1 | Global and regional transport greenhouse gas emissions trends.** Indirect emissions from electricity and heat consumed in transport are shown in panel (a) and are primarily linked to the electrification of rail systems. These indirect emissions do not include the full lifecycle emissions of transportation systems (e.g., vehicle manufacturing and infrastructure), which are assessed in Section 10.4. International aviation and shipping are included in panel (a) but excluded from panel (b). Indirect emissions from fuel production, vehicle manufacturing and infrastructure construction are not included in the sector total. Source: adapted from Lamb et al. (2021) using data from Minx et al. (2021).



## Direct emissions by sector (59 GtCO<sub>2</sub>-eq)



## Direct+indirect emissions by sector (59 GtCO<sub>2</sub>-eq)



**Figure 2.12 | Total anthropogenic direct and indirect GHG emissions for the year 2019 (in GtCO<sub>2</sub>-eq) by sector and subsector.** Direct emissions estimates assign emissions to the sector in which they arise (scope 1 reporting). Indirect emissions – as used here – refer to the reallocation of emissions from electricity and heat to the sector of final use (scope 2 reporting). Note that cement refers to process emissions only, as a lack of data prevents the full reallocation of indirect emissions to this sector. More comprehensive conceptualisations of indirect emissions including all products and services (scope 3 reporting) are discussed in Section 2.3 of this chapter. Emissions are converted into CO<sub>2</sub>-equivalents based on global warming potentials with a 100-year time horizon (GWP100) from the IPCC Sixth Assessment Report. Percentages may not add up to 100 across categories due to rounding at the second significant digit. Source: based on Lamb et al. (2021b); data: Minx et al. (2021).

# ¿Movilidad sostenible?

## Definición y cálculo de indicadores de la movilidad sostenible a la escala metropolitana, en Bogotá y Lima.

### Indicadores calculados

- Evolución de la mancha urbana
- Distribución espacial de la población
- Distancia y tiempo de viaje
- Partición modal
- Emisiones de gases de efecto invernadero
- Contaminación aérea

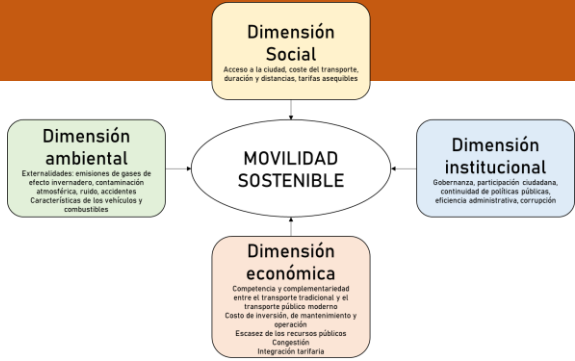
### Datos

- Censo (2017 en Lima, 2018 en Bogotá)
- Encuestas de movilidad urbana (2012 en Lima, 2019 en Bogotá, actualización en curso).
- Capas SIG de la red vial y las rutas de transporte público
- Inventarios de vehículos por motorización
- Factores de emisión de emisiones

Evidenciar las **desigualdades de movilidad** y las **desigualdades ecológicas** asociadas

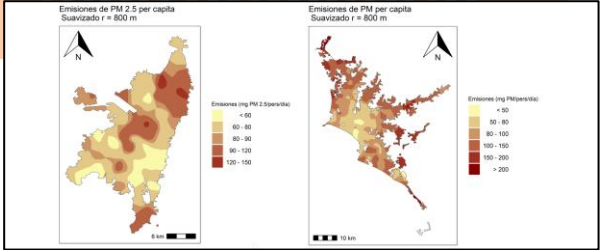
# Desarrollo de la tesis

Definición de un **marco teórico**



Profundizar la comprensión de las **prácticas de movilidad** a la **escala local**

Cálculo de **indicadores a nivel metropolitano**



Encuesta por cuestionario / **Entrevistas institucionales**


Conducir un **análisis tipológico** de las **prácticas de la movilidad**

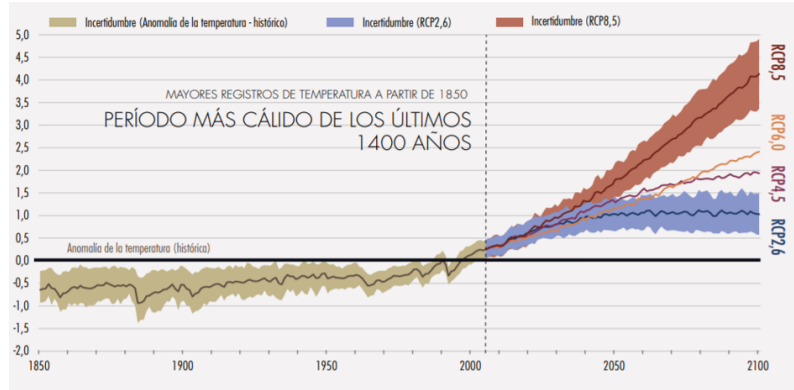
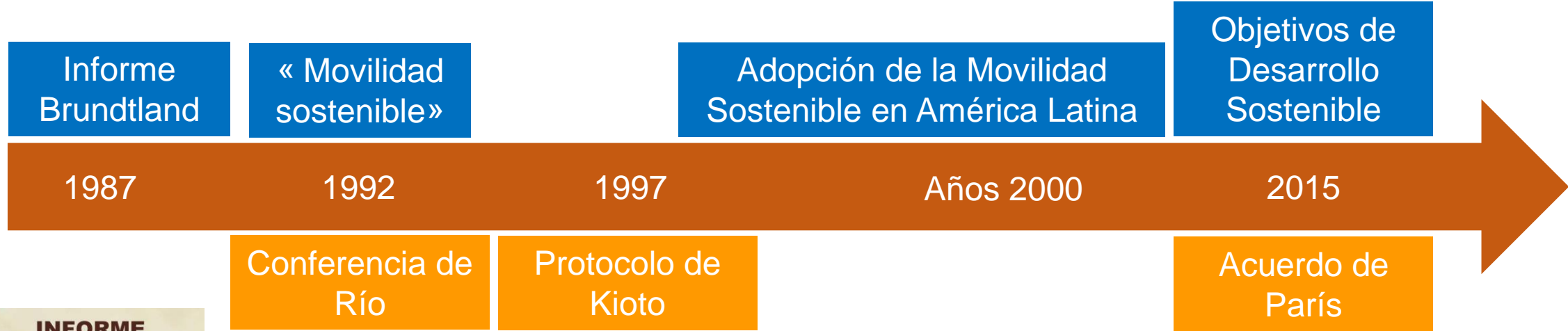
¿Quién se mueve? ¿Cómo y por qué?  
¿Contaminación?

**Análisis crítico de las políticas de movilidad** a la luz de los resultados

¿Tiempo y distancia?  
¿Costos?

# ¿Movilidad sostenible?

  
**1,5°C**



(Comisión mundial de Naciones Unidas para el medio ambiente y el desarrollo, 1987 ; Comisión Europea, 1992 ; Rockström et al., 2009)