

Desarrollo de estimaciones de superficies de concentraciones de $PM_{2.5}$ y NO_2 mediante regresiones de uso de suelo para cuatro ciudades de Colombia

Laura Andrea Rodríguez Villamizar, MD, MSc, PhD
Departamento de Salud Pública - Escuela de Medicina
Universidad Industrial de Santander (UIS)

Ponencia oral 097_5



Equipo de Trabajo

Proyecto “Calidad del aire y salud ambiental urbana en cinco ciudades de Colombia”



Laura A. Rodríguez

Yurley Rojas

Jhon J. Cáceres

Leandro López



Sara Grisales

Juan G. Piñeros



Diana Marín



Nestor Y. Rojas

Sonia C. Mangones

Luis C. Belalcázar



Jonathan Ochoa



Oscar A. Rojas



Dayana M. Agudelo



Scott Weichenthal

Jill Baumgartner



Victor M. Herrera



Margarita Castillo



Maria C. Vicini



Oscar M. Rojas



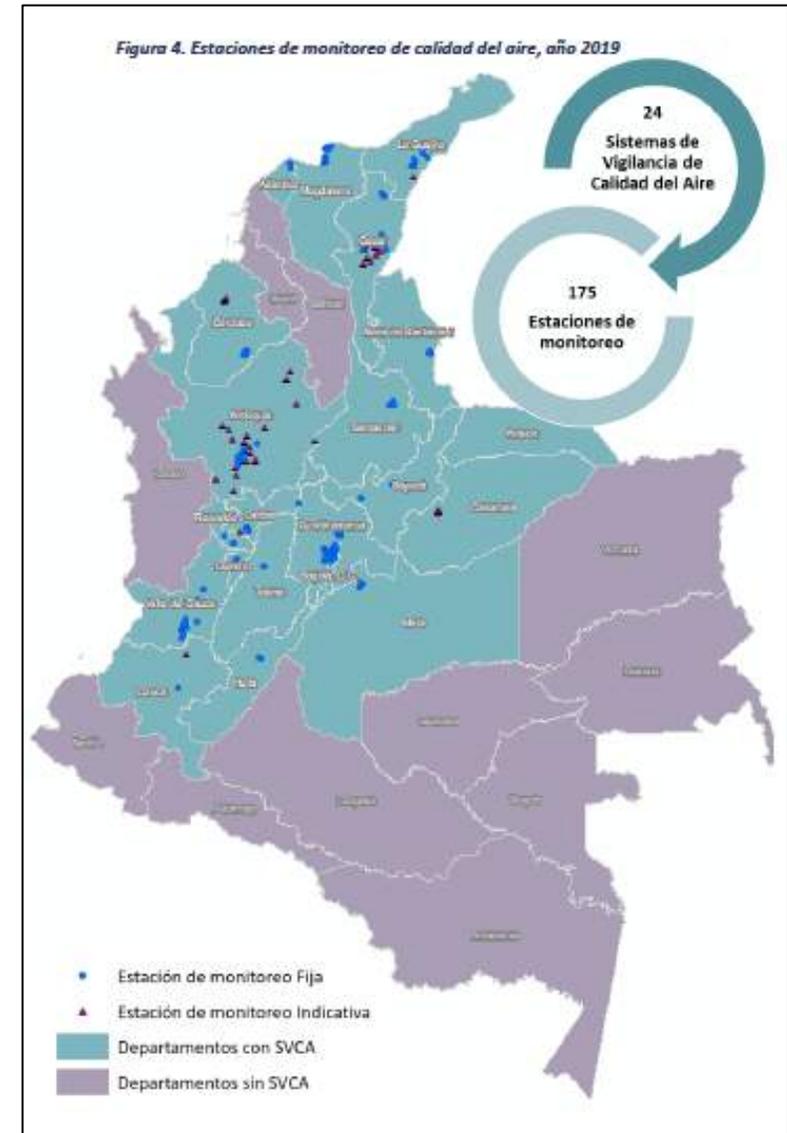
Gisela Arizabaleta



Ana Zuleima Orrego

Introducción

- La contaminación del aire es el principal factor de riesgo ambiental que afecta la salud.
- El material particulado fino ($PM_{2.5}$) y el dióxido de nitrógeno (NO_2) son los contaminantes del aire que más se han asociado con efectos adversos sobre la salud humana.
- La estimación de la exposición a estos contaminantes a nivel geográfico en las ciudades está limitada por la escasa cantidad de monitores de calidad de aire disponibles en las redes de monitoreo.
- Resolución temporal vs resolución geográfica

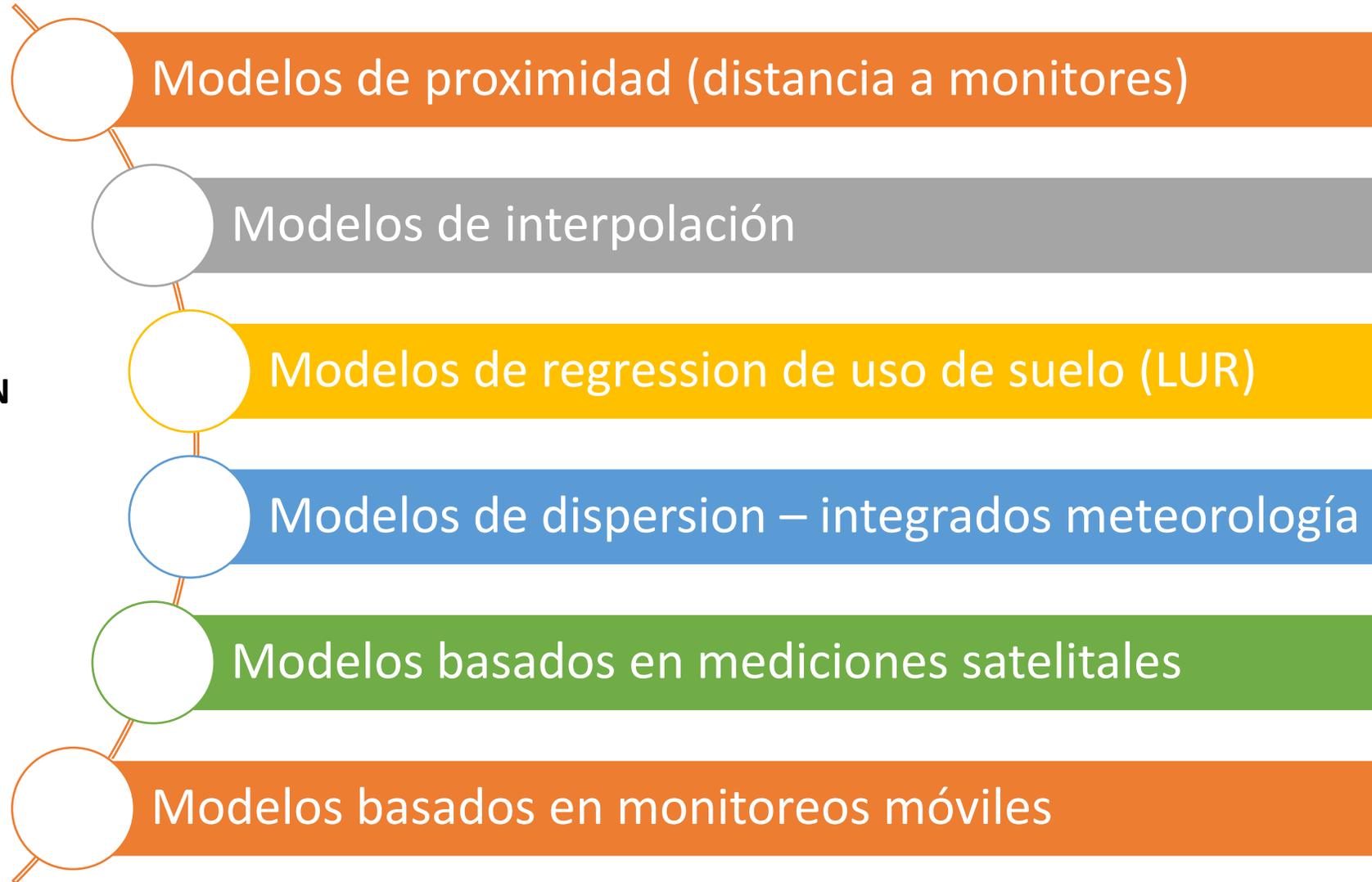


Fuente: IDEAM. Informe de la calidad de aire en Colombia 2019



Métodos para estimación de variación intraurbana de contaminantes

**MODELOS
DE ESTIMACIÓN
DE VARIACIÓN
INTRAURBANA**



**H
Í
B
R
I
D
O
S**

Jerret 2005;
Hoek 2008;
Kijkema 2011;
Hoek 2017



■ Objetivo

Desarrollar modelos de regresión de uso de suelo (Land Use Regression– LUR) para estimar las concentraciones ambientales de $PM_{2.5}$ y NO_2 en las zonas urbanas de Barranquilla, Bucaramanga, Cali y Medellín.



Métodos



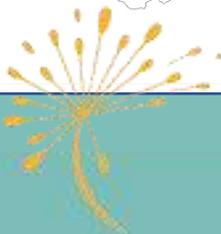
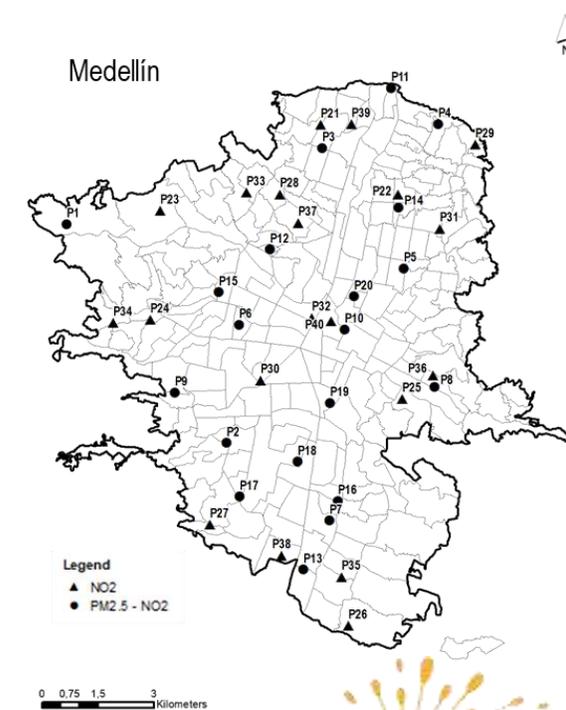
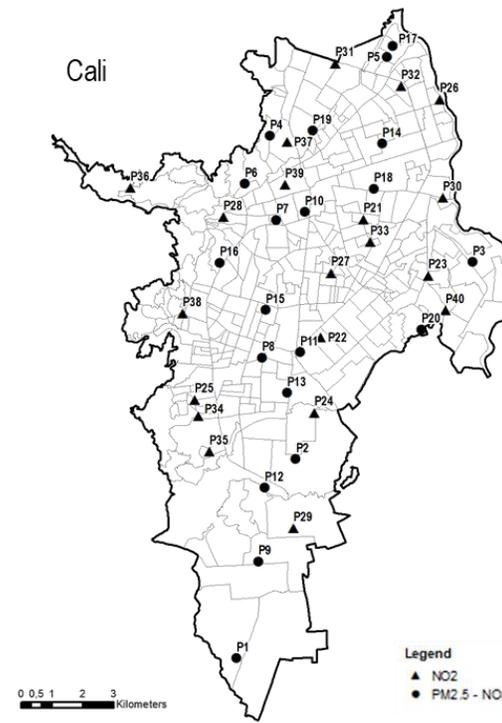
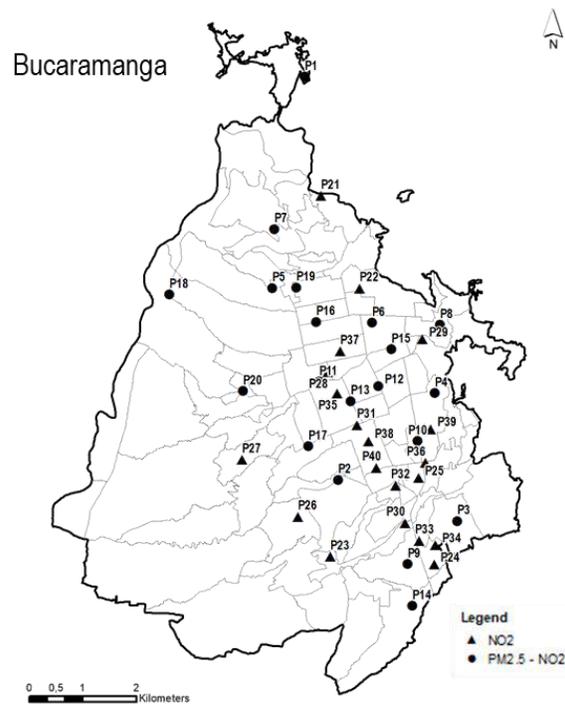
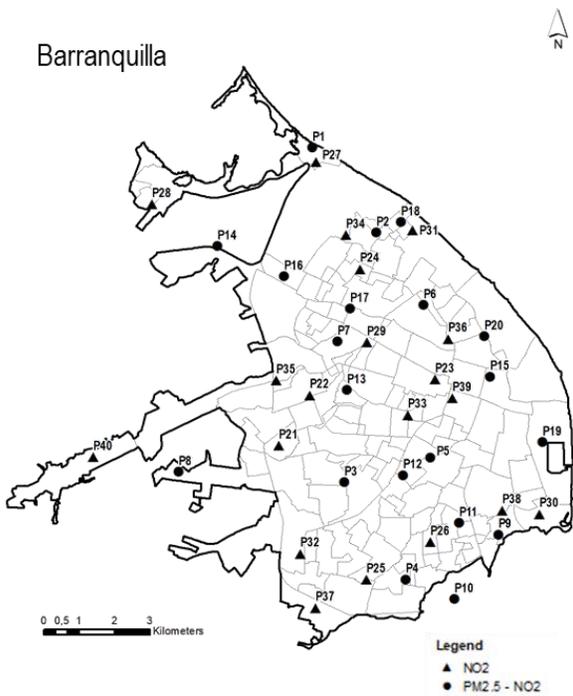
1. Selección de puntos de monitoreo para PM_{2.5} y NO₂



Selección de puntos de monitoreo con autoridades ambiental y de salud

Puntos tráfico, residencial, otro: industrial-comercial-portuario, 1 background

40 puntos NO₂ y 20 puntos PM_{2.5}



2. Campañas de monitoreo para PM_{2.5} y NO₂

Se realizaron dos campañas de medición de los contaminantes en cada una de las ciudades por un periodo de 2 semanas durante 2021 (una campaña en tiempo seco y otra en tiempo lluvioso).

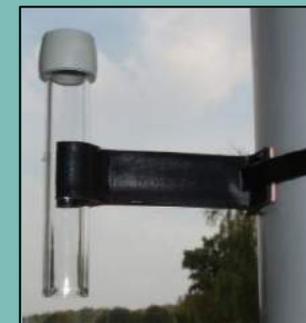


Medidores de bajo costo

UPAS – PM_{2.5}



Tubos Palmes – NO₂



Bucaramanga - **CDMB-AMB**

Barranquilla-**BV**

Cali – **DAGMA**

Medellín – **AMVA**

40 puntos NO₂ y 20 P_{M2.5}



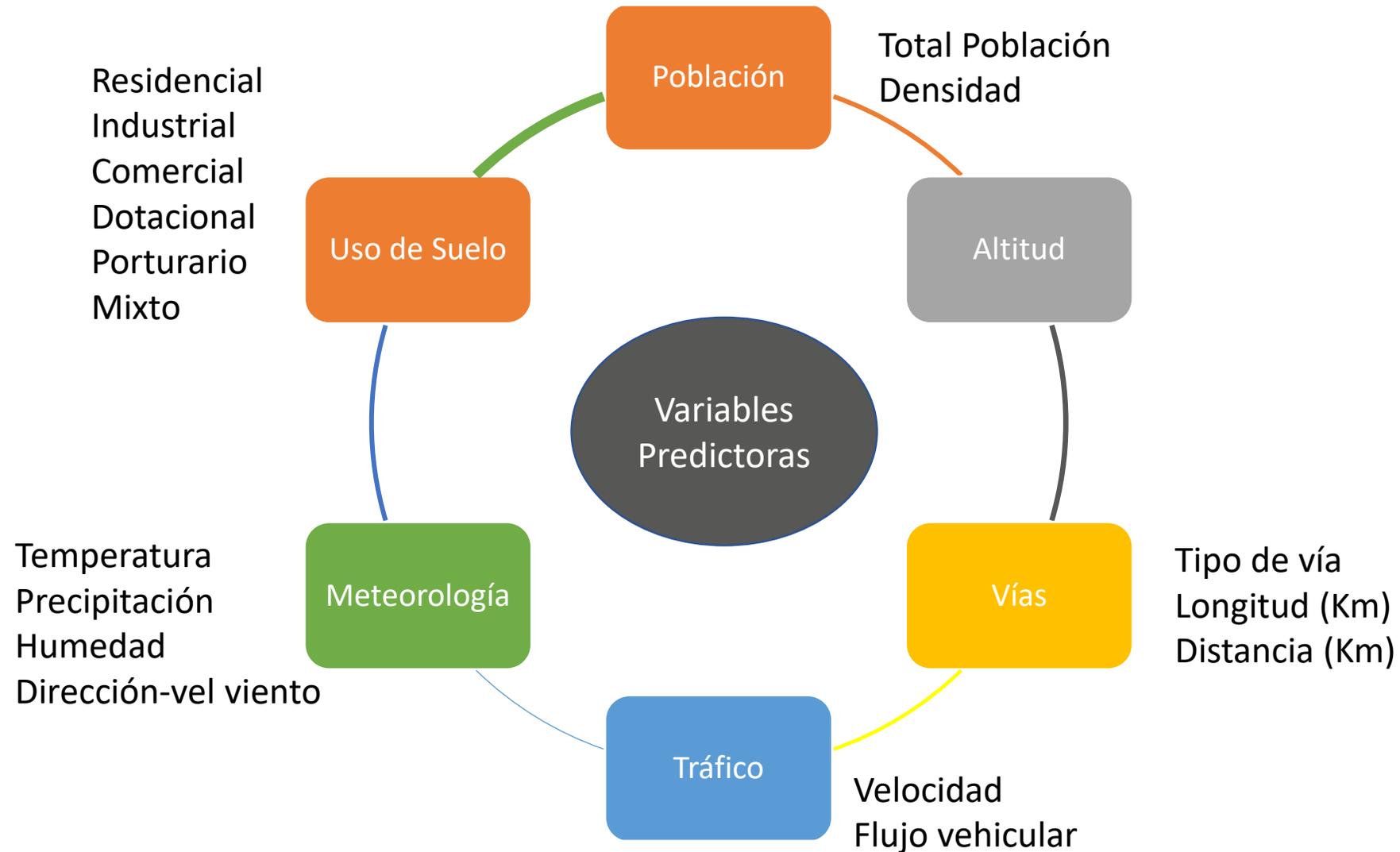
2. Campañas de monitoreo para PM_{2.5} y NO₂

Tipo de periodo	Mes – año 2021	Ciudad
CAMPAÑA 1		
Seco*	PM2.5: Febrero 24 – Marzo 15. NO2: Abril 19-Mayo 7	Bucaramanga
Seco*	Abril 19-21 hasta el –3 al 5 mayo (Ambos)	Barranquilla
Lluvioso*	Abril 28-29 hasta Mayo 12 al 14 (Ambos)	Medellín
Seco	Agosto 5 al 20 de 2021 (Ambos)	Cali
CAMPAÑA 2		
Lluvioso	Junio 15-30 (Ambos)	Bucaramanga
Seco	PM2.5: Agosto 20 a Septiembre 3 NO2: Agosto 27-Sept 13	Medellín
Lluvioso	Septiembre 10 al 24 (Ambos)	Barranquilla
Lluvioso	Septiembre 30 a octubre 15 (Ambos)	Cali

*últimas restricciones pico y cédula, toque de queda nocturno y fines de semana por pandemia



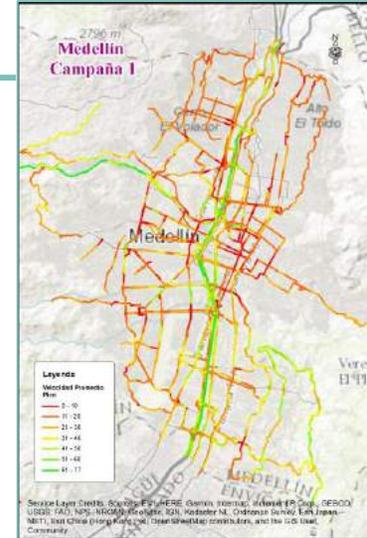
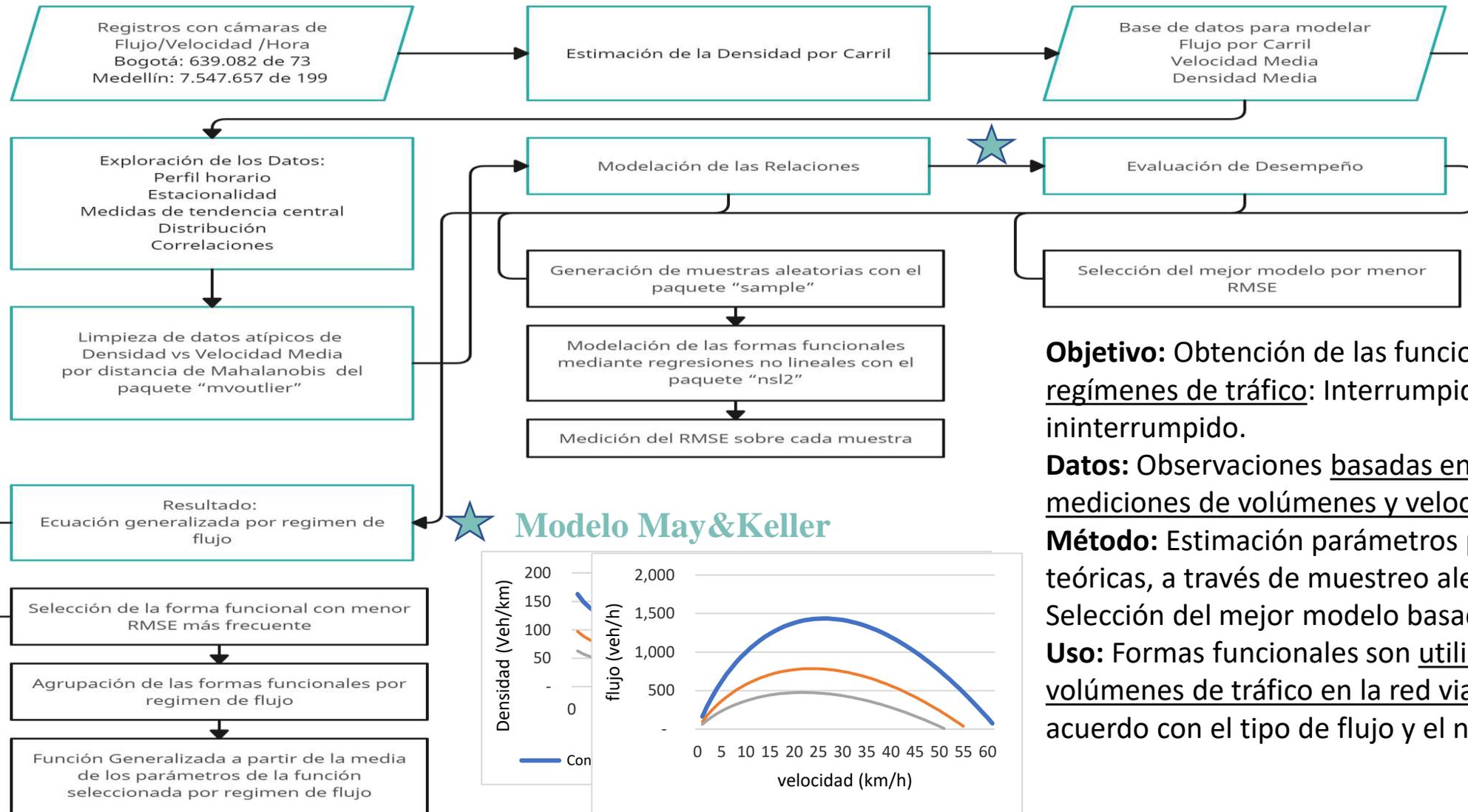
3. Estructuración geográfica de variables predictoras



Estructuración geográfica en buffers de 100, 200 y 500m



3. Estructuración geográfica de variables predictoras: Estimación de las funciones velocidad-flujo-demora vehicular

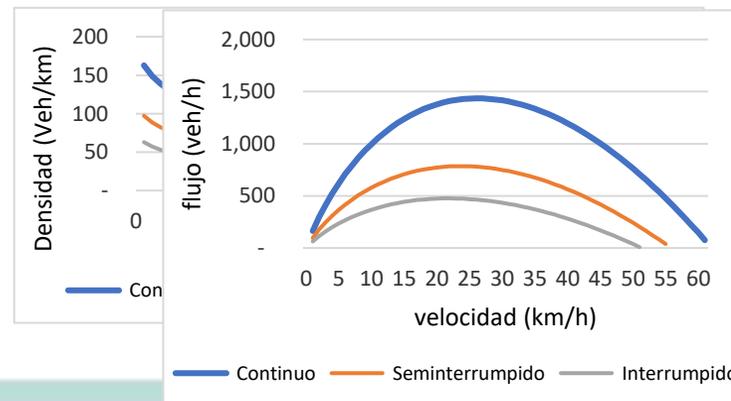


Objetivo: Obtención de las funciones para diferentes regímenes de tráfico: Interrumpido, seminterrumpido e ininterrumpido.

Datos: Observaciones basadas en sensores y cámaras con mediciones de volúmenes y velocidad

Método: Estimación parámetros para 6 formas funcionales teóricas, a través de muestreo aleatorio con remplazo. Selección del mejor modelo basado en RMSE.

Uso: Formas funcionales son utilizadas para estimar volúmenes de tráfico en la red vial de las 5 ciudades, de acuerdo con el tipo de flujo y el número de carriles.



4. Modelación y validación LUR

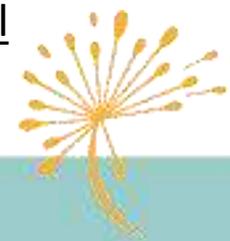
- ✓ Generar superficies de variables predictoras.
- ✓ Datos malla vial en formato vectorial
- ✓ Intersecar predictoras en cada buffer
- ✓ Calcular distancias y áreas en buffer
- ✓ Valor Anual: Promedio campañas 1 y 2

- ✓ Regresiones espaciales exploratoria (OLS)
- ✓ Evaluar dirección y significancia de predictoras
- ✓ Seleccionar mejor modelo según criterios de Rendimiento (R^2), consistencia ($JB > 0.1$), Multicolinealidad ($VIF < 7$), significancia ($KBP < 0.05$) Autocorrelación residuales ($Moran > 0.1$)
- ✓ Regresión ponderada geográficamente (GWR)
- ✓ Ecuaciones regresión locales celdas 200m x 200m



- ✓ Evaluar la estacionariedad contaminante
- ✓ Transformaciones (si es necesario)
- ✓ Evaluar presencia de >90% datos predictoras
- ✓ Evaluar correlación contaminante-predictoras

- ✓ Observados vs estimados
- ✓ Estimación error RMSE
- ✓ Validación cruzada (LOOV)
- ✓ Generación superficie visual



■ Resultados Barranquilla



LUR anual 2021 Barranquilla PM_{2.5}

MODELO

$$PM_{2.5} = 19.83344 - 0.1489524 * ALTIMETRIA - 0.0230902 * DTRON500 + 44.43591 * IND200 + 21.93109 * CEN500 + 23.10317 * PORT500$$

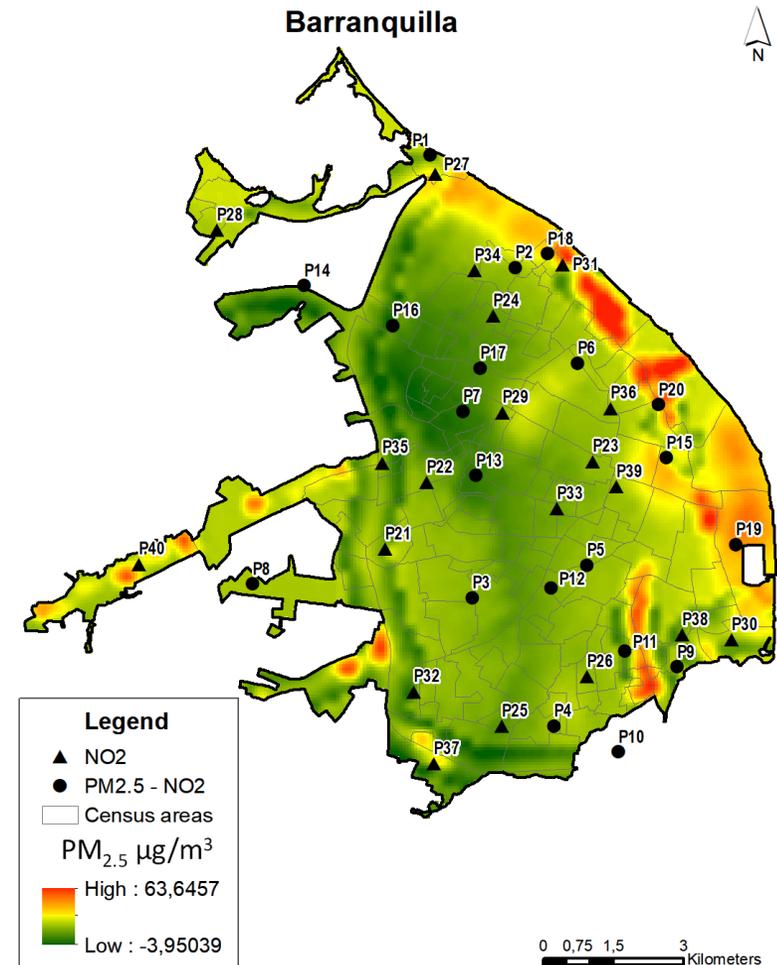
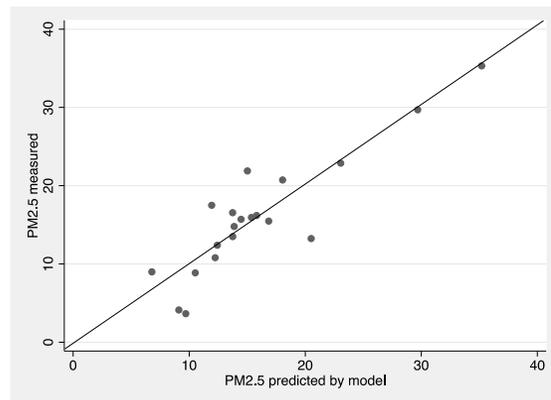
N=20

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

Modelo	R2	AIC	JB(>0.1)	K(BP)<0.05	VIF<7.5	SA>0.1
5	0.73	128.24	0.86	0.64	1.9	0.39

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

Modelo	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
5	3.98	5.09	3.84	0.54



LUR anual 2021 Barranquilla NO₂

MODELO

$$\text{NO}_2 = 12.89591 + 25.45936 * \text{PRIM100} - 0.1583713 * \text{VEL100} + 0.0061518 * \text{VOL500}$$

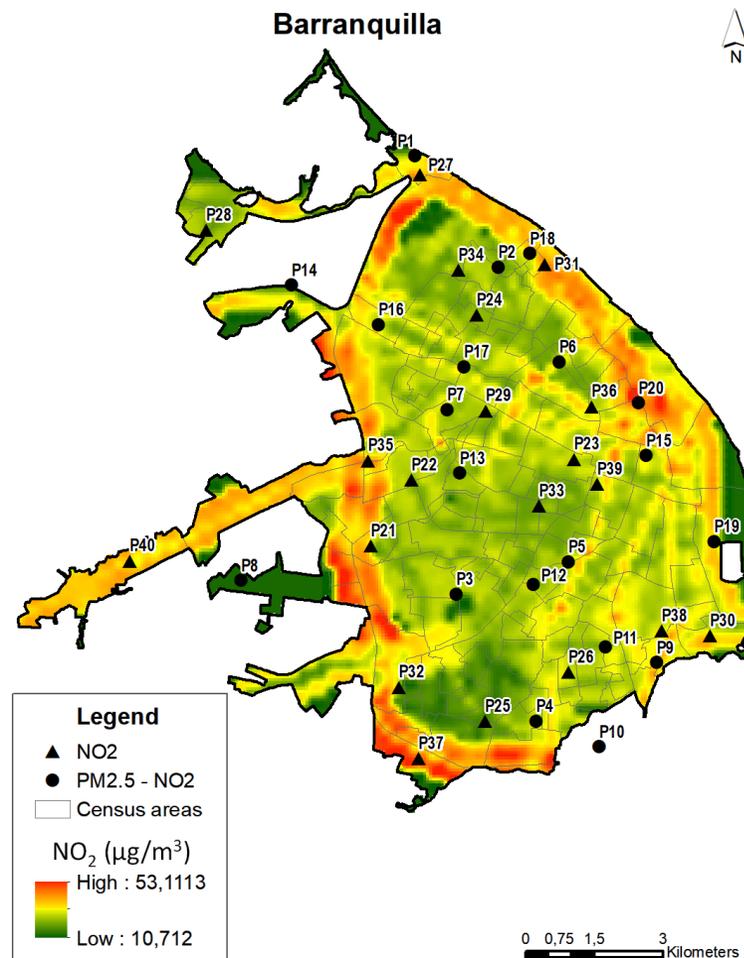
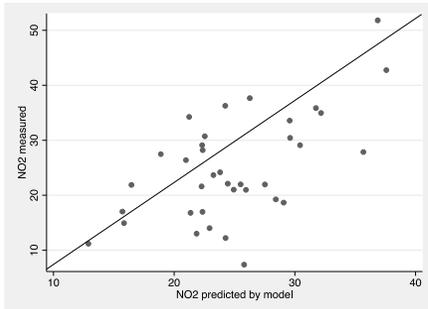
N=36

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

Modelo	R2	AIC	JB(>0.1)	K(BP)<0.05	VIF<7.5	SA>0.1
1	0.3	259.82	0.87	0.36	1.28	0.92

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

Modelo	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
1	8.02	8.59	6.92	0.19



■ Resultados Bucaramanga



LUR anual 2021 Bucaramanga PM_{2.5}

MODELO

$$\ln(PM_{2.5}) = 2.199057 + 0.0014062 * SEC100 + 0.0000327 * LOC500 - 0.0012659 * DPRIM500 + 0.0215501 * VEL100 - 0.000242 * VOL200$$

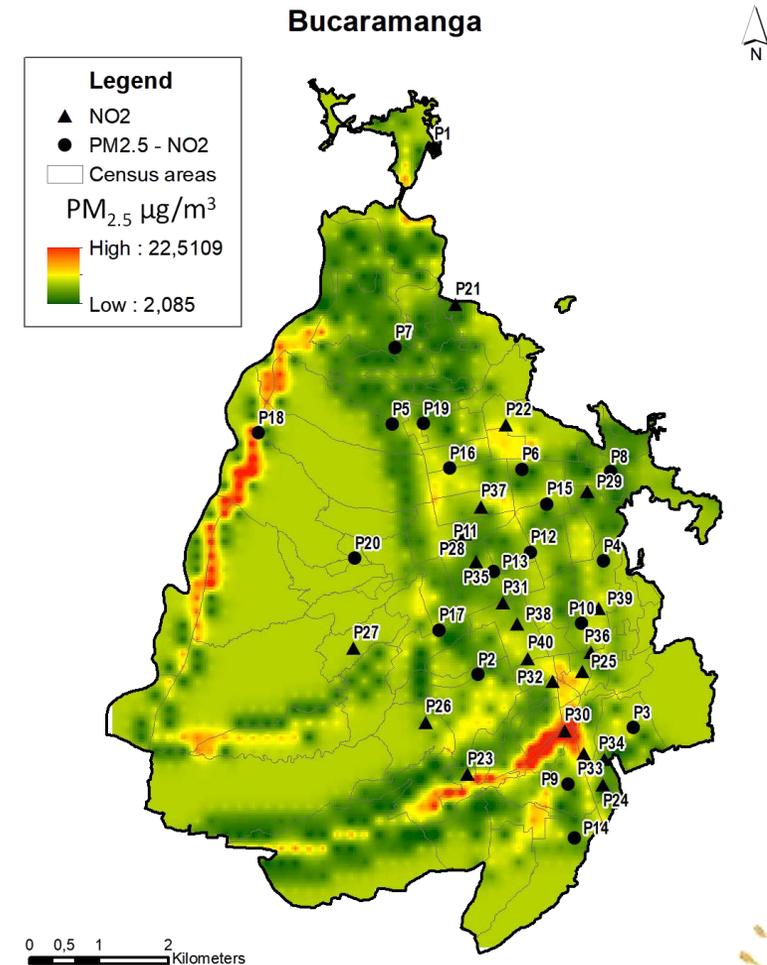
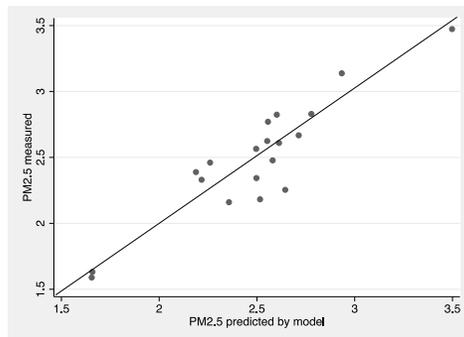
N=20

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

Modelo PM2.5	R2	AIC	JB(>0.1)	K(BP)<0.05	VIF<7.5	SA>0.1
9	0.77	14.38	0.61	0.42	1.78	0.86

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

Modelo PM2.5	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
ug/m3	1.23614789	1.40494759	1.29693009	0.46



LUR anual 2021 Bucaramanga NO₂

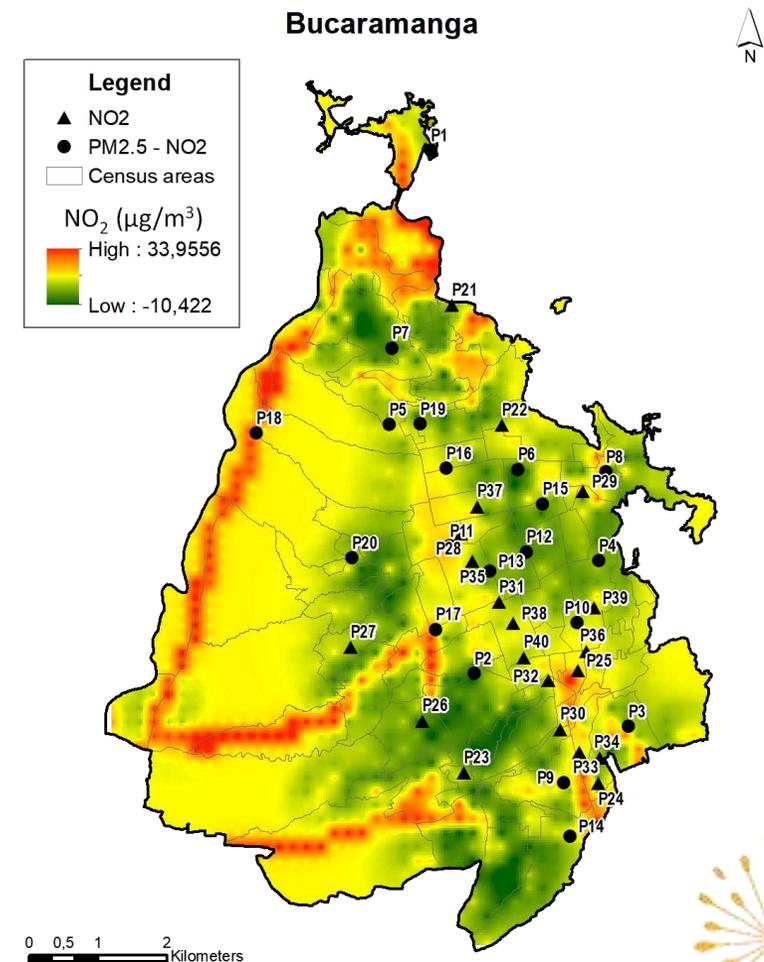
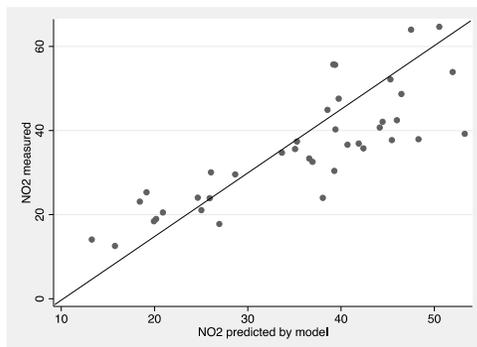
MODELO $NO_2 = 13.00243 + 291.5302 * DEN100 - 0.0013283 * POB500 + 0.0025503 * TER500$
 $+ 0.0020514 * LOC500 + 0.0057464 * VOL100$
N=40

Criteria de especificación del modelo LUR seleccionado

Modelo NO2	R2	AIC	JB(>0.1)	K(BP)<0.05	VIF<7.5	SA>0.1
5	0.65	290.59	0.38	0.09	1.66	0.81

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

Modelo NO2	RMSE ug/m3	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
5	8.08	8.885	6.66	0.55



■ Resultados Cali



LUR anual 2021 Cali PM_{2.5}

MODELO

$$\ln(\text{PM}_{2.5}) = 2.3387 + 0.00001 * \text{USO DOTACIONAL}_{200} + 1.0713 * \text{LONGITUD VÍA PRIMARIA}_{200} + 0.5943 * \text{LONGITUD VÍA SECUNDARIA}_{200} - 0.0004 * \text{VOLUMEN VEHICULAR}_{100}$$

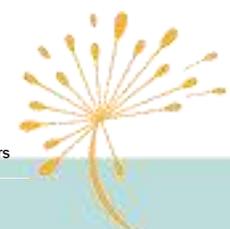
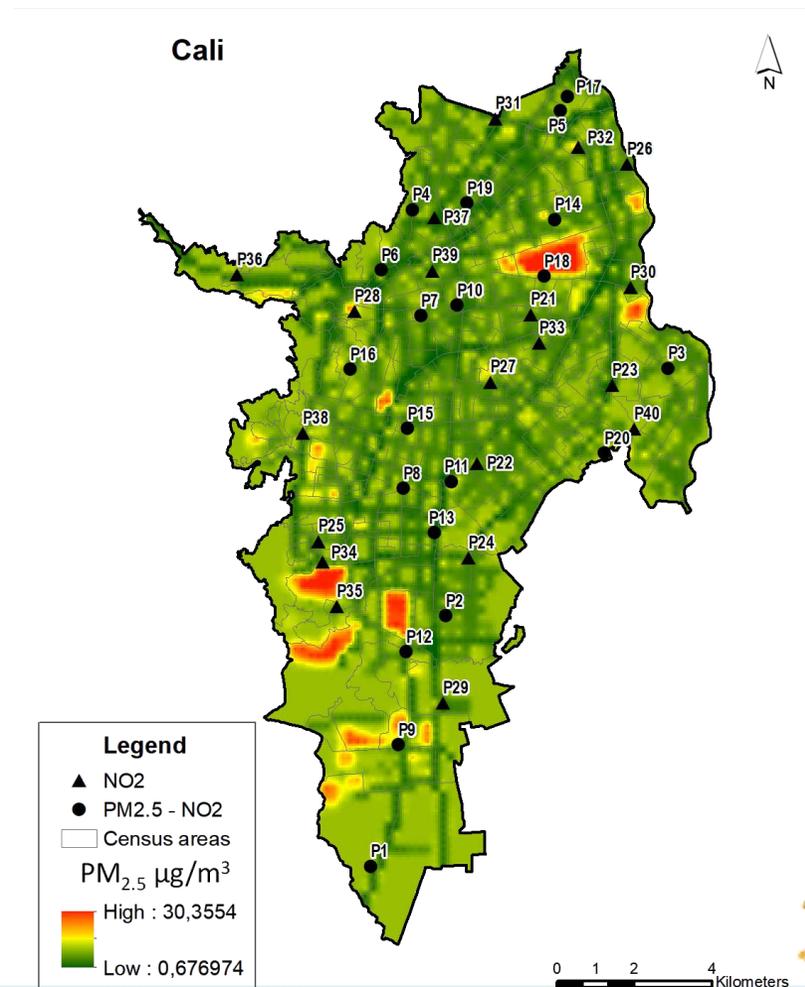
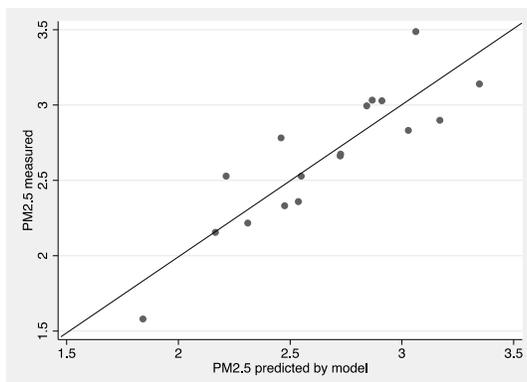
N=17

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

AdjR2	AIC	JB	K(BP)	VIF	SA
0.7	15.34	0.5	0.23	2.06	0.66

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

PM	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
LN	0.25	0.31	0.26	0.51
ug/m3	1.28402542	1.36342511	1.29693009	



LUR anual 2021 Cali NO₂

MODELO

$$\ln(\text{NO}_2) = 3.47834312 + 0.49126931 * \text{LONGITUD VÍA PRIMARIA}_{200} + 0.39823891 * \text{LONGITUD VÍA SECUNDARIA}_{200} + 0.36505469 * \text{LONGITUD VÍA Terciaria}_{200} - 0.01475995 * \text{VELOCIDAD VEHICULAR}_{200}$$

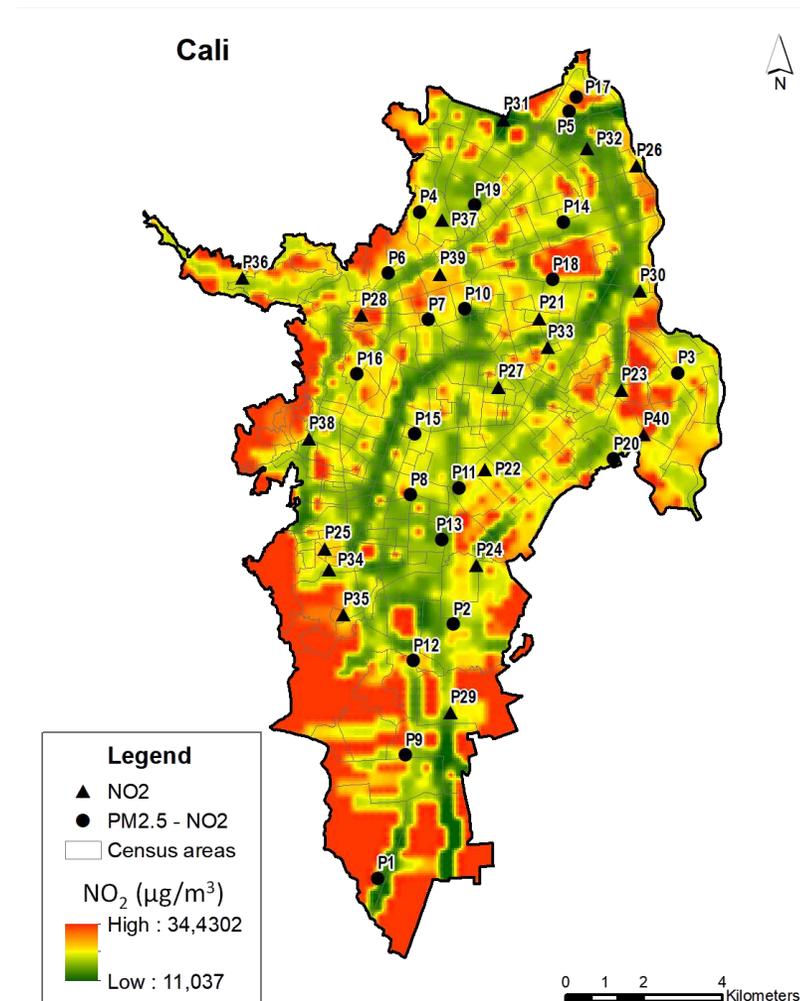
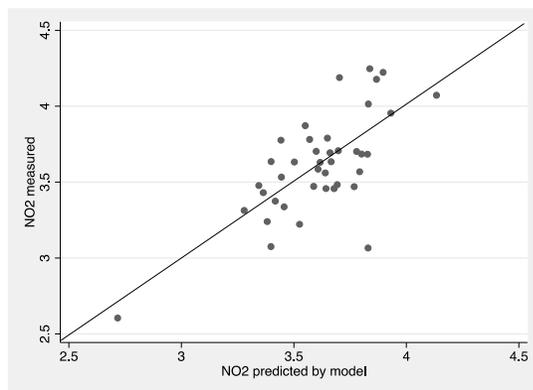
N=40

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

AdjR2	AICc	JB	K(BP)	VIF	SA
0.44	11.95	0.14	0.25	1.56	0.04

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

NO2	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
LN	0.25	0.26	0.21	0.36
ug/m3	1.28402542	1.29693009	1.23367806	



■ Resultados Medellín



LUR anual 2021 Medellín PM_{2.5}

MODELO $(PM_{2.5}) = 13.77207 - 1.357455 * PPRM - 5.589831 * DOT100 + 2.269679 * DEN200 + 70.23039 * MIX500 + 0.0043842 * VOL500$

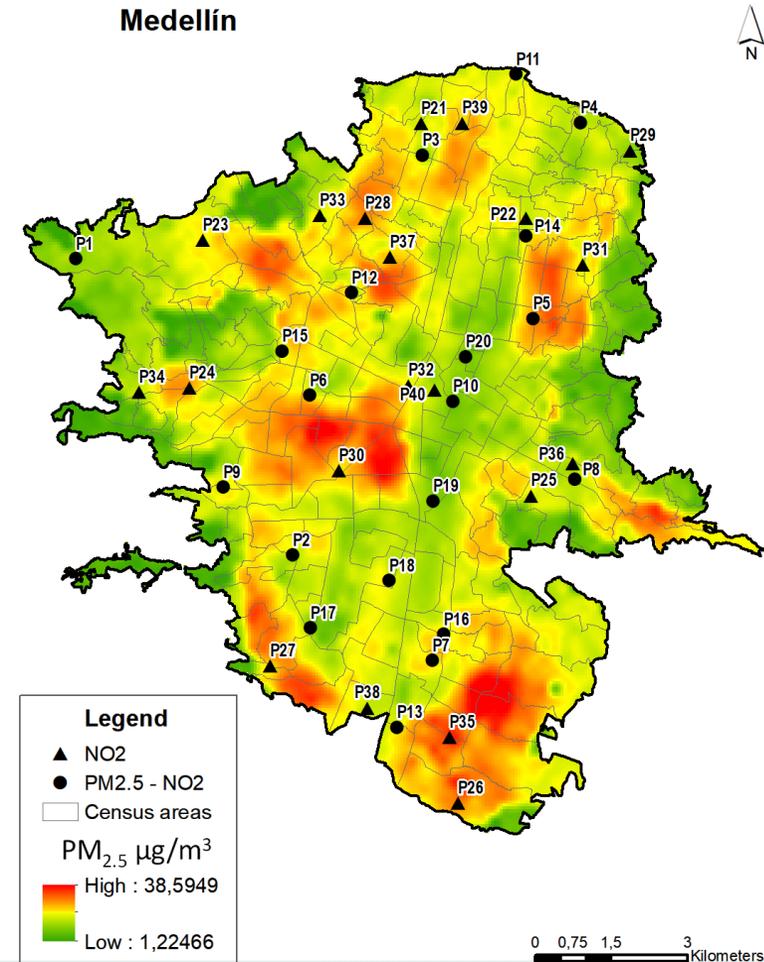
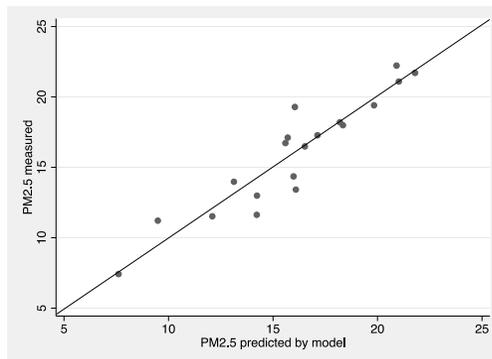
N=19 PPRM= precipitación promedio; DOT100 = Uso dotacional en buffer 100m; DEN200= Densidad poblacional buffer 200m
 MIX500= Uso mixto en buffer 500m; VOL500= Volumen vehicular (flujo) buffer 500m

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

Modelo	R2	AIC	JB(>0.1)	K(BP)<0.05	VIF<7.5	SA>0.1
1	0.82	91.25	0.99	0.18	1.48	0.76

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

Modelo	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adj r2
1	1.71	1.78	1.36	0.79



LUR anual 2021 Medellín NO₂

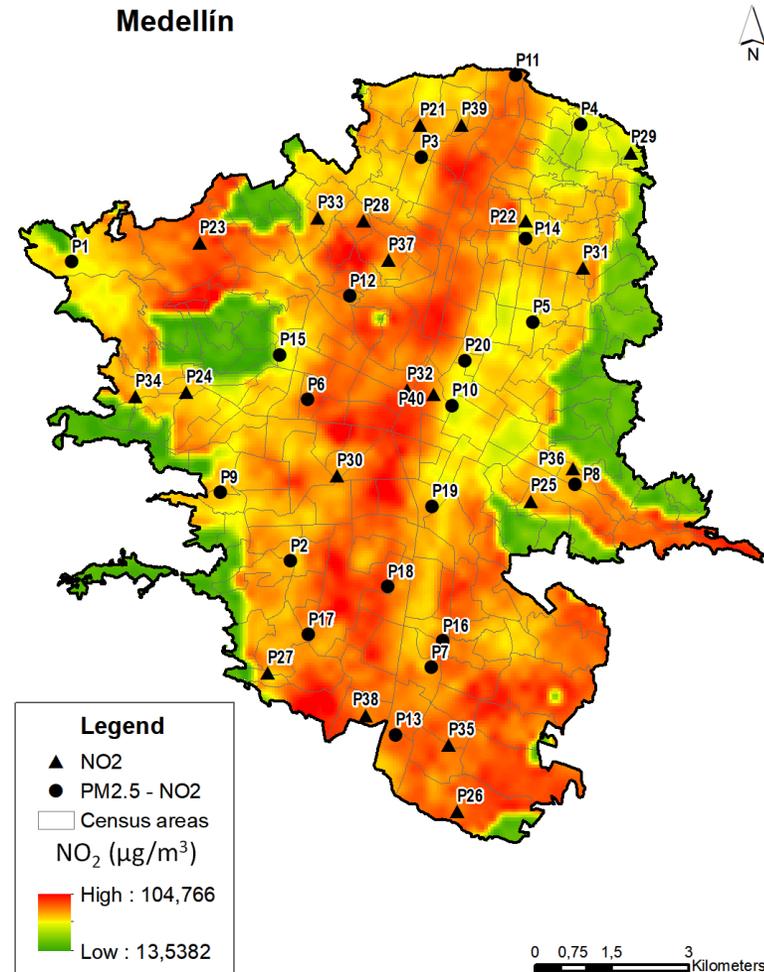
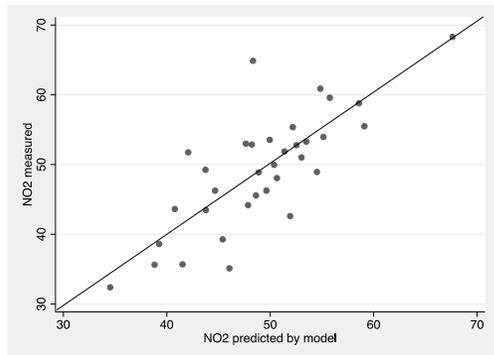
MODELO $NO_2 = 46.06516 - 3.625967 * PrecipitPROM - 0.0299678 * DistViaSEC200 + 0.0225605 * VOLVehicular500$
 N=34

Criterios de especificación del modelo LUR seleccionado

Modelo	R2	AIC	JB(>0.1)	K(BP)<0.05	VIF<7.5	SA>0.1
1	0.57	220.66	0.04	0.02	1.06	0.58

Estadísticos de error del modelo LUR seleccionado

Modelo	RMSE	loocv RMSE	loocv abs error	loocv adjs r2
1	5.53	6.29	4.41	0.45



Resumen modelos LUR desarrollados

Ciudad	LUR para PM _{2.5}				LUR para NO ₂			
	N	R ²	RMSE	R ² LOOV	N	R ²	RMSE	R ² LOOV
Barranquilla	20	0.73	3.98	0.54	36	0.30	8.02	0.19
Bucaramanga	20	0.77	1.23	0.46	40	0.65	8.08	0.55
Cali	17	0.70	1.28	0.51	40	0.44	1.28	0.36
Medellín	19	0.82	1.71	0.79	34	0.57	5.53	0.45

RMSE= Root mean square error ; LOOV= Leave-one-out validation



Conclusiones

- ✓ Se desarrollaron modelos LUR con una buena explicación de la variabilidad de las concentraciones, particularmente para $PM_{2.5}$.
- ✓ Estos modelos permiten predecir las concentraciones anuales promedios en zonas intraurbanas de cuatro ciudades capitales.
- ✓ Los modelos desarrollados pueden ser usados como insumos para la asignación de la exposición a $PM_{2.5}$ y NO_2 en estudios de calidad de aire y efectos a largo plazo sobre la salud.
- ✓ Estos resultados pueden informar las decisiones de política pública en términos de gestión de calidad del aire en las ciudades al caracterizar su variación geográfica que se complementa con la variación temporal que aportan las mediciones de los sistemas de vigilancia de calidad del aire.





¡Muchas gracias!

Contacto: laurovi@uis.edu.co

Más información

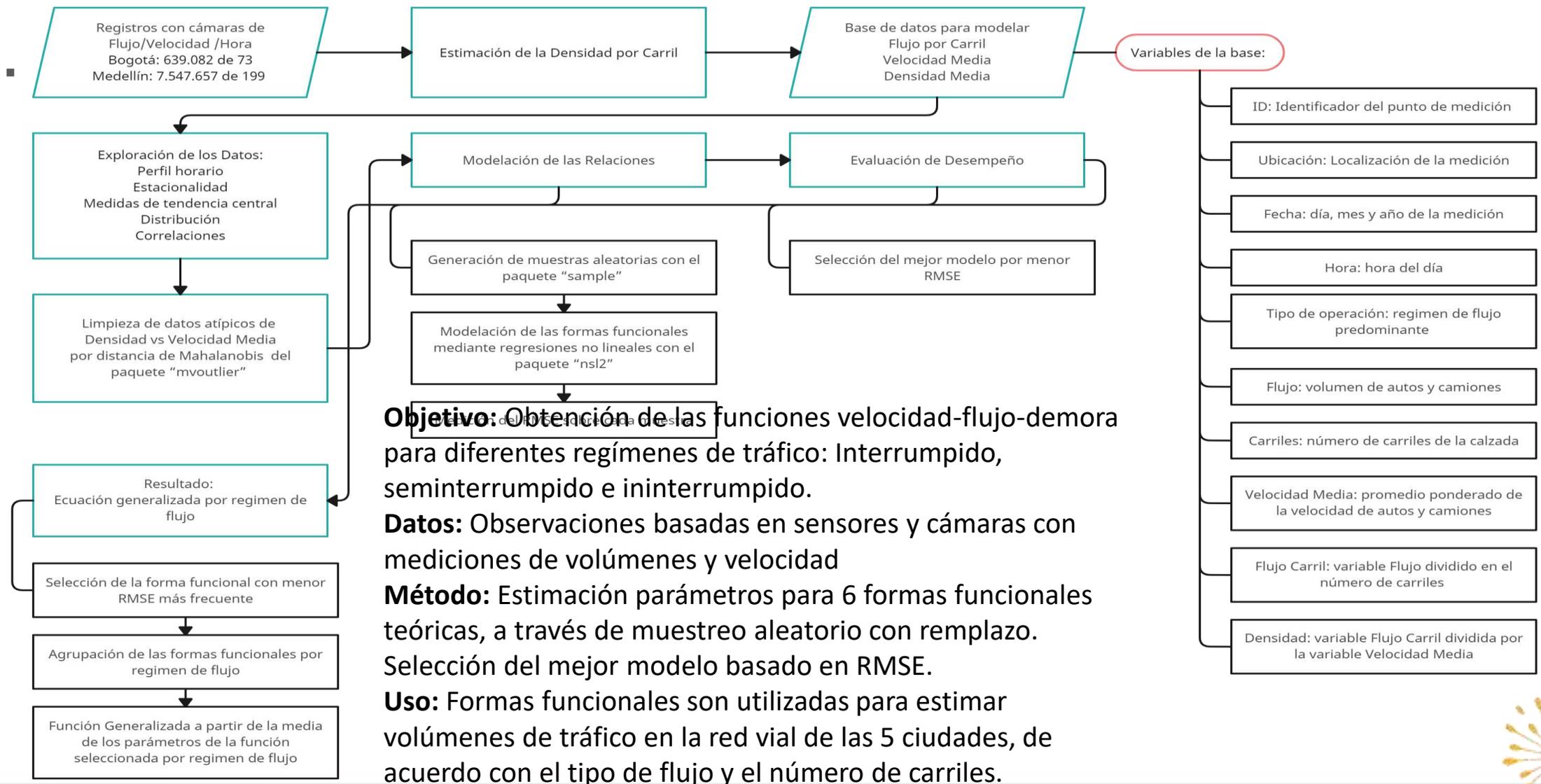


<https://casap.science/>



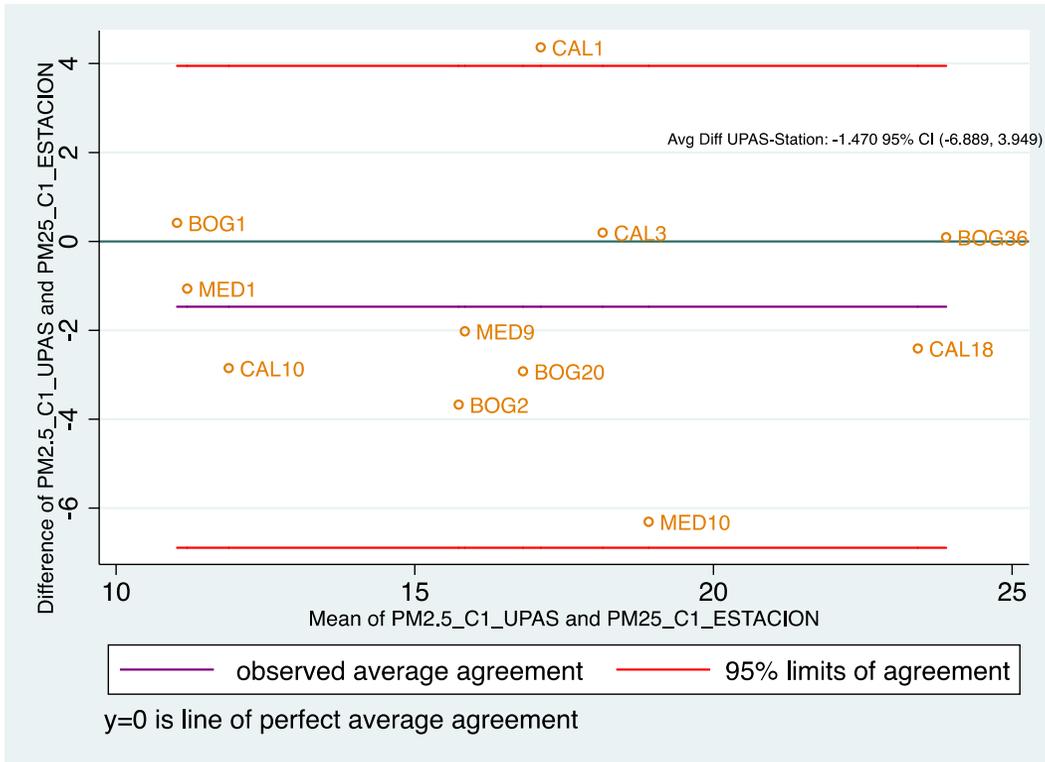
casap@casap.science

3. Estructuración geográfica de variables predictoras: Estimación de las funciones velocidad-flujo-demora vehicular



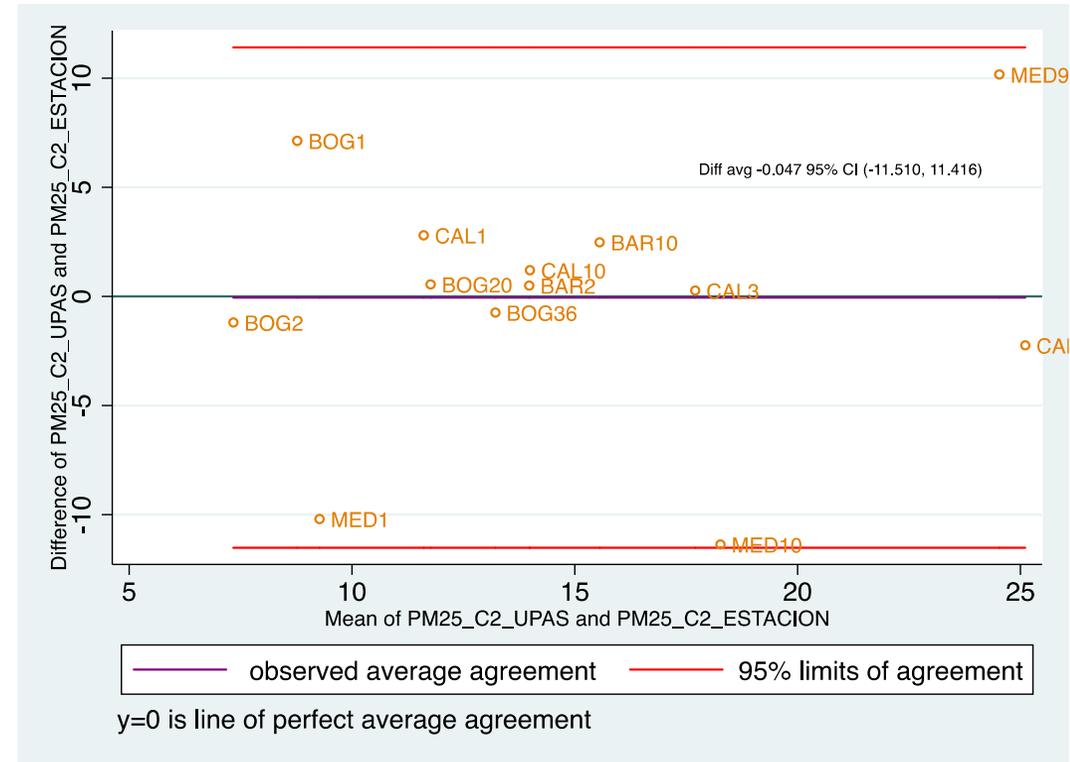
Resultados: Comparación mediciones UPAS con estaciones de monitoreo locales

Campaña 1



Promedio diferencias: -1.470

Campaña 2



Promedio diferencias: -0.047

Para Tubos Palmes: diferencia promedio 5,88 ug/m3 cocmparando 5 estaciones (Bogotá y Medellín)

