

# ESTIMACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE POR EFECTO DE LA CIRCULACIÓN VEHICULAR EN LA AV. DON BOSCO DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR

**Christian Marcelo Moyano Tobar  
(Speaker)**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
Cuenca, Ecuador**



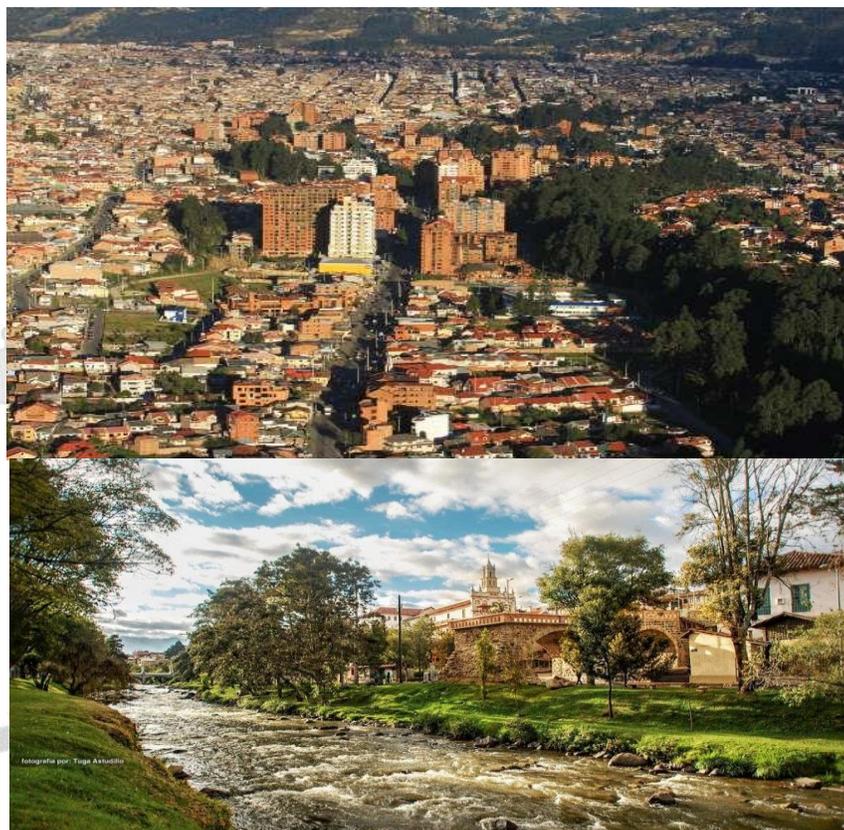
**Berenice Estefanía Cubides Álvarez**

**Gissella Anabel Chávez Araujo**

**CITRAMSIT Cía. Ltda  
Consultores en Ingeniería de Transporte  
Cuenca, Ecuador**



# SANTA ANA DE LOS RIOS DE CUENCA



603.269 habitantes  
Tasa crecimiento 2%



85235 vehículos RTV <sup>2018</sup>  
Tasa crecimiento 10 %



Patrimonio Cultural  
de la humanidad  
Desde 1999



Ciudad pionera  
políticas Movilidad  
Sustentable

# DEMANDA DE VIAJES

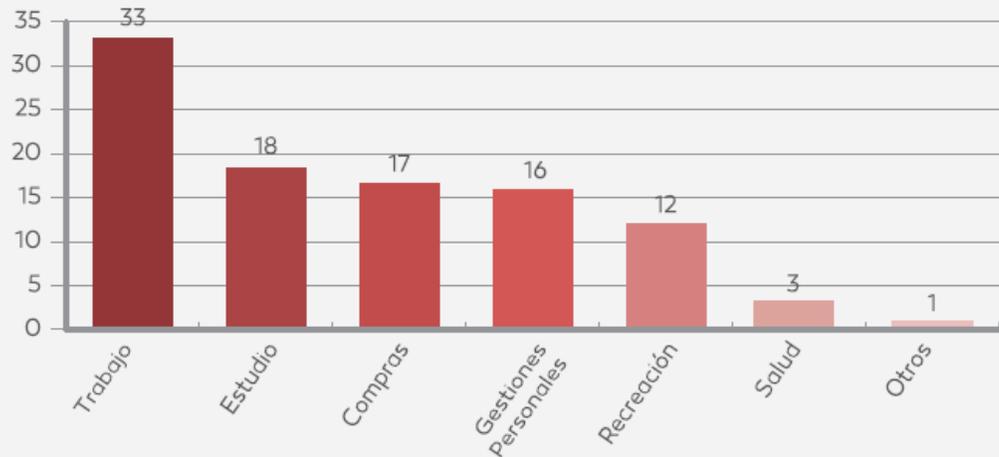
1.330.948 viajes en todo el cantón en día laboral.

22% externos - internos  
El 26% internos – externos  
52% internos (área urbana)

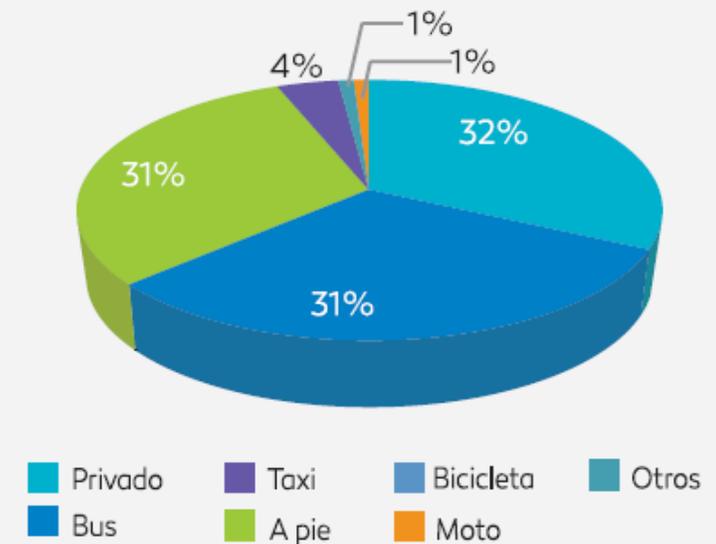
694.876 viajes en área urbana

69% modos motorizados  
31% No motorizados

REPARTO POR MOTIVOS



DISTRIBUCIÓN MODAL EN CUENCA

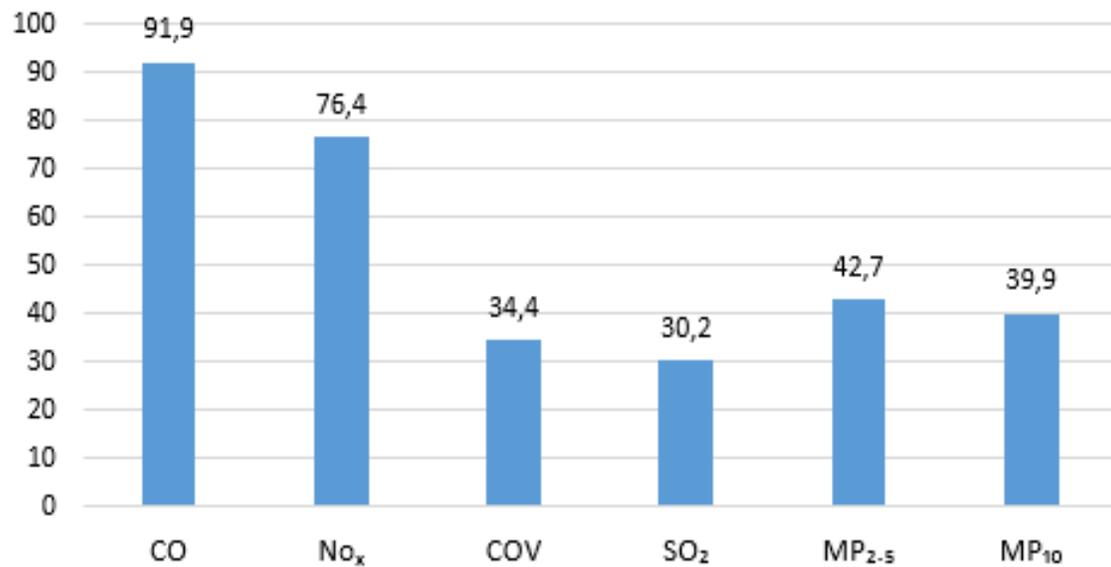


# CALIDAD DEL AIRE EN CUENCA

85.235 vehículos

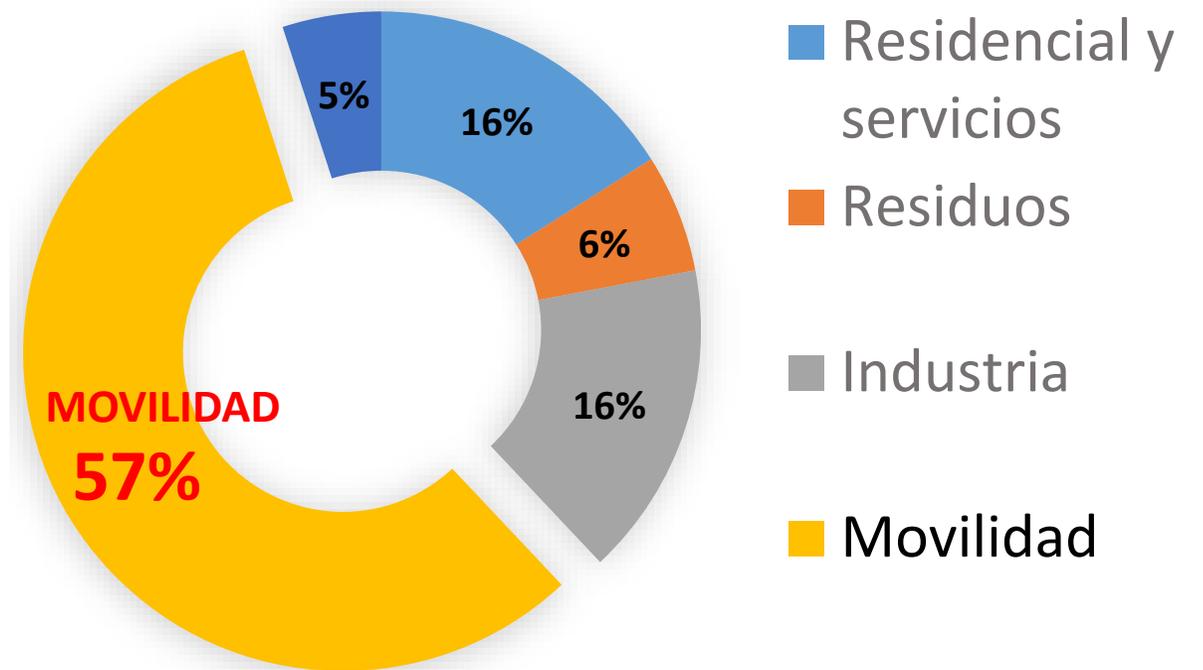
89.2% gasolina

10.8% diésel



## Contaminación por tráfico vehicular motorizado

2,42 Tn CO<sub>2</sub>/hab/año,



# AVANCES EN MOVILIDAD SUSTENTABLE



PLAN DE MOVILIDAD Y ESPACIOS PUBLICOS  
2015 - 2025



TRANVIA 4 RIOS



RENOVACION DE FLOTA BUSES  
EURO 5  
ELECTRICOS (estudio)

# AVANCES EN MOVILIDAD SUSTENTABLE



MICRORED PEATONAL  
CENTRO HISTORICO

BICICLETA PUBLICA

# EL PROBLEMA



Un automóvil que circula **10 km/hora** emite casi 40 gr/ km de CO, **30 Km/hora**, emite 20 gr/ km.

Un autobus que circula **10 km/hora** emite casi 23 gr/ km de CO, **30 Km/hora**, emite 15gr/ km.

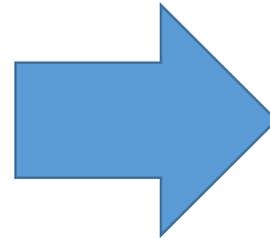
# EL PROBLEMA



**CUENCA NO CUENTA CON MODELO PROPIO DE EMISIONES DE CONTAMINANTES DEL AIRE**

# EL PROBLEMA

## Estudios de Impacto sobre la Red vial (EIRV) desde el 2015



- EIRV: ! solo considera !
- NIVELES DE SERVICIO
- CAPACIDAD VIAL
- FLUJOS
- VELOCIDADES
- DEMORAS
- ESTIMACIÓN DE CONTAMINANTES DEL AIRE

Metodología Normalizada para Estudios de Impacto en el Sistema de Transporte Urbano

1998

Ministerio de Planificación y Cooperación

Comisión de Planificación de Inversiones en Infraestructura de Transporte

Manual redactado y diseñado por CIS Asociados Consultores en Transporte Ltda. por mandato de MIDEPLAN. Este Manual es resultado del Estudio de Normalización de Estudios de Impacto Vial, desarrollado por los mismos consultores para MIDEPLAN-SECTRA durante los años 1996-97.

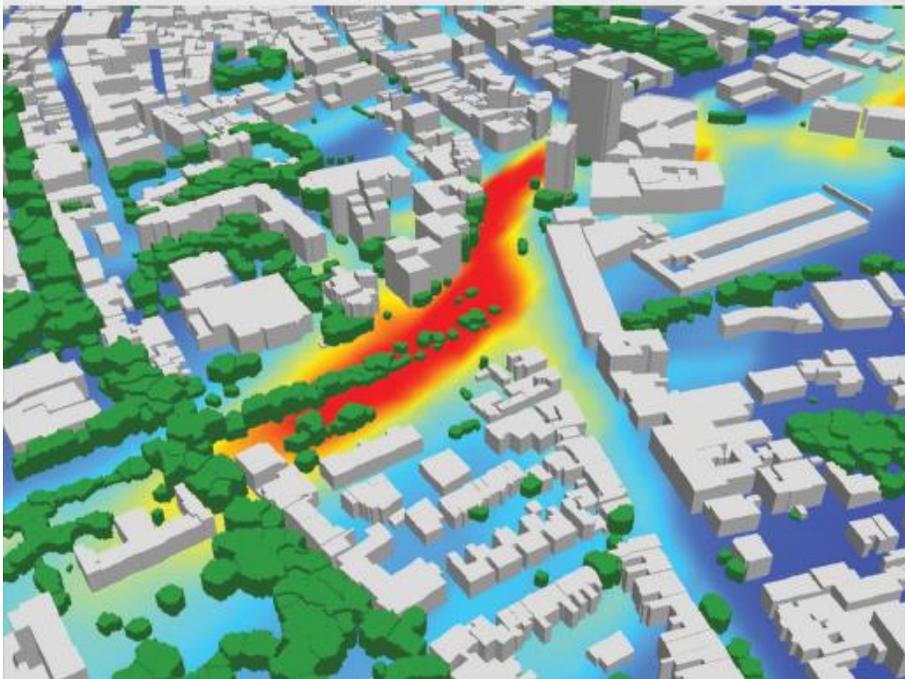


° CONGRESO CHILENO DE  
INGENIERÍA DE TRANSPORTE  
S A N T I A G O 2 0 1 9

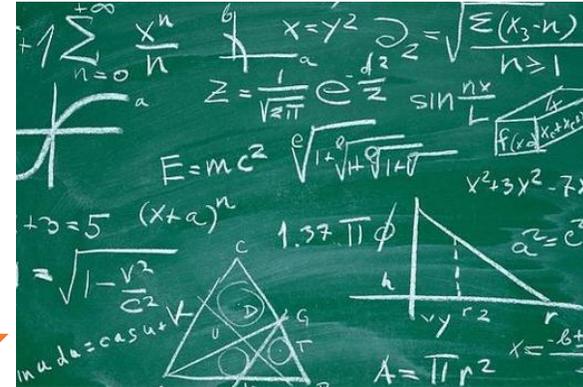
15/10/2019

# OBJETIVO

## Gestión de Tránsito considerando contaminación del aire

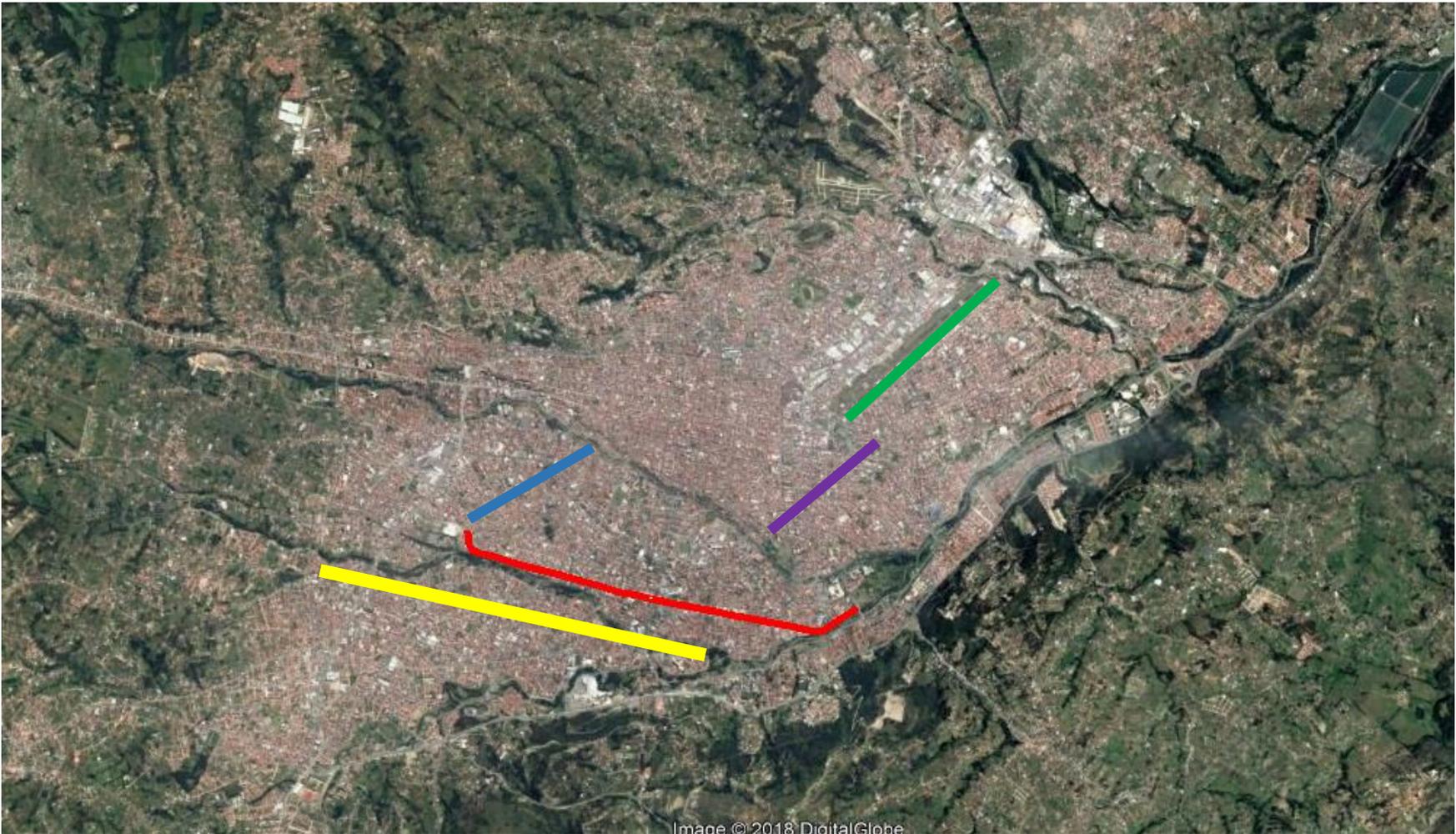


LEICESTER CITY



Establecer un modelo matemático para estimar la contaminación del aire ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , VOC y MP) por efecto de la circulación vehicular motorizada, relacionando las variables flujo, velocidad y demora en vías colectoras de Cuenca.

# EJES COLECTORES A ANALIZAR EN LA CIUDAD



- ✓ AV. 10 DE AGOSTO 
- ✓ AV. DON BOSCO 
- AV. PASEO CAÑARIS 
- AV. YANAHURCO 
- AV. UNIDAD NACIONAL 

# AREA DE ESTUDIO

Av. Don Bosco 3 Km



2.96 Km por sentido



8170 vehículos en hora máxima demanda



4 líneas de transporte público

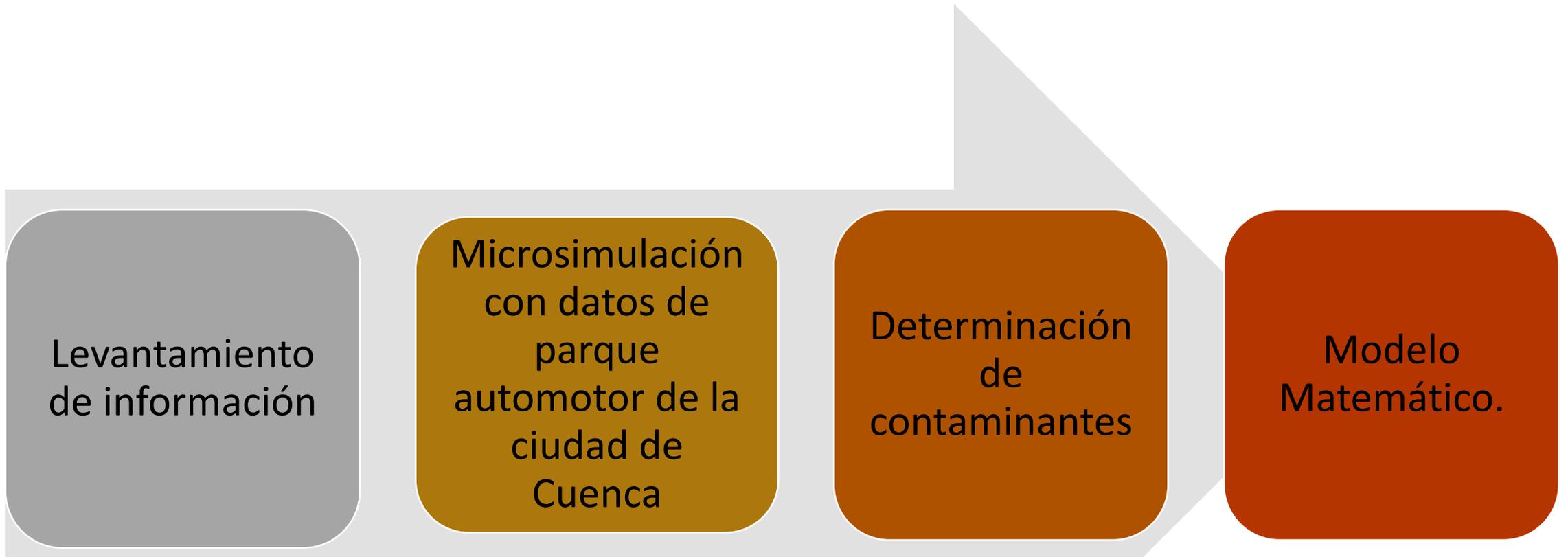


92% Livianos  
3% Buses  
2% Camiones  
3% 2 Ruedas



No	Intersección	No	Intersección
1	Av. Don Bosco y Av. De las Américas	11	Av. Don Bosco y Av. 12 de Octubre
2	Av. Don Bosco y Fray Gaspar de Carvajal	12	Av. Don Bosco y Fray Luis de León
3	Av. Don Bosco y El Salado	13	Av. Don Bosco y Fernando de Aragón
4	Av. Don Bosco y Av. Loja	14	Av. Don Bosco y Av. Felipe Segundo
5	Av. Don Bosco y Santa María	15	Av. Don Bosco y Carlos V
6	Av. Don Bosco y La Pinta	16	Av. Don Bosco y Pablo Picasso
7	Av. Don Bosco y Miguel de Cervantes	17	Av. Don Bosco y Fernando de Rojas
8	Av. Don Bosco y Francisco de Orellana	18	Av. Don Bosco y El Greco
9	Av. Don Bosco y Bartolomé Ruíz	19	Redondel Tres Puentes
10	Av. Don Bosco y Paseo 12 de Octubre		

# METODOLOGÍA



# HERRAMIENTA MICROSIMULACIÓN



Modelos Ambientales de Contaminantes del Aire:

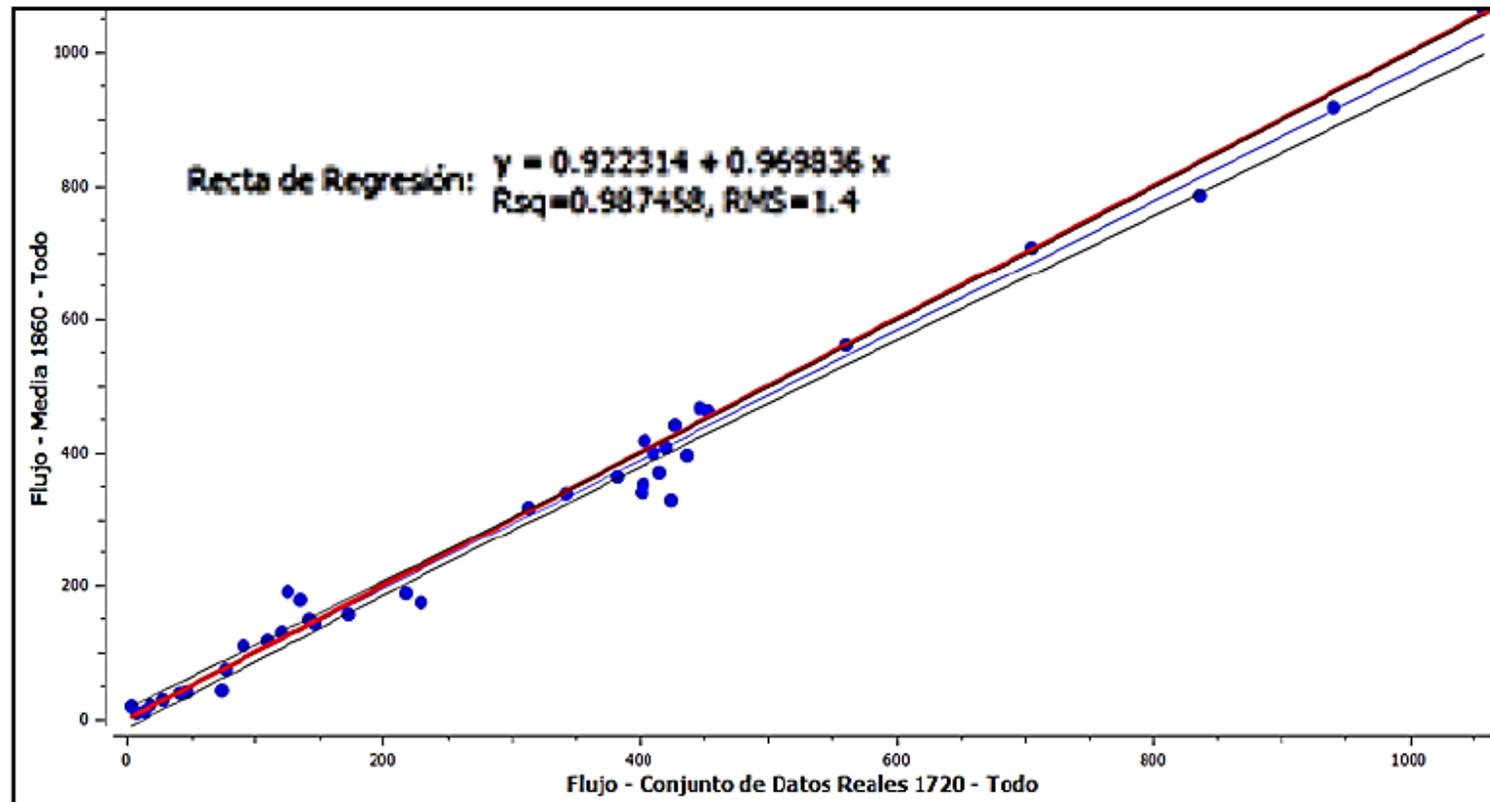
1. Modelo de Consumo de Combustible
2. Modelo de Emisión de Contaminación *QUARTET*
3. **Modelo de Emisión de Contaminación Panis et al.**

*“Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits”*

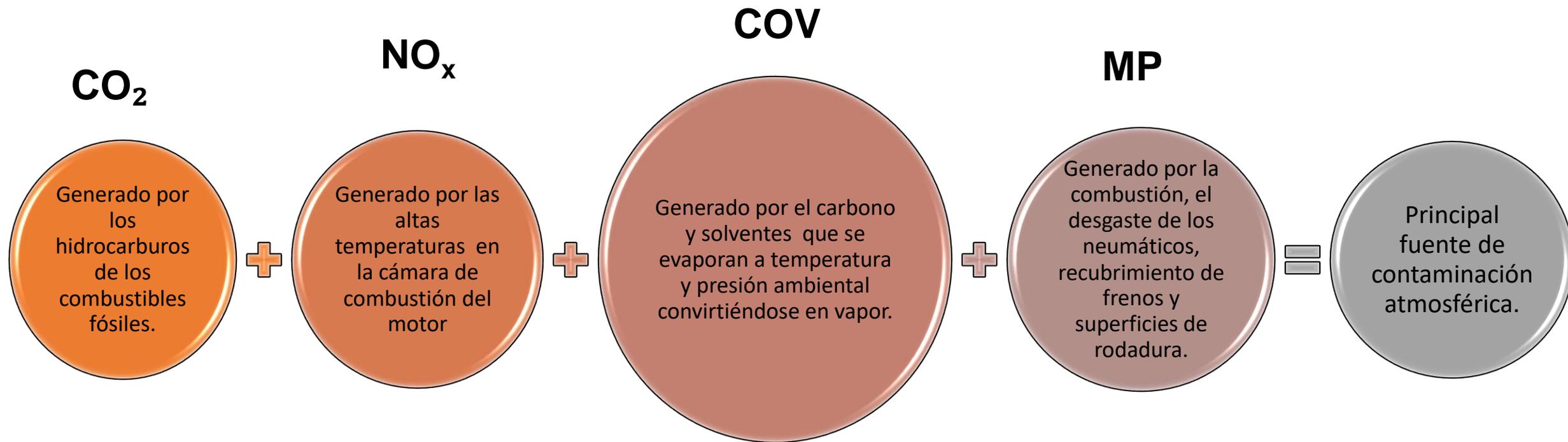


# CALIBRACIÓN DE LA MICROSIMULACIÓN

Se visualizan los datos reales (FLUJOS REALES) versus los datos simulados (FLUJOS SIMULADOS) en 38 puntos de control y mediante una regresión de tipo lineal se establece su correlación, el coeficiente determinístico de ajuste obtenido es superior a 0.987



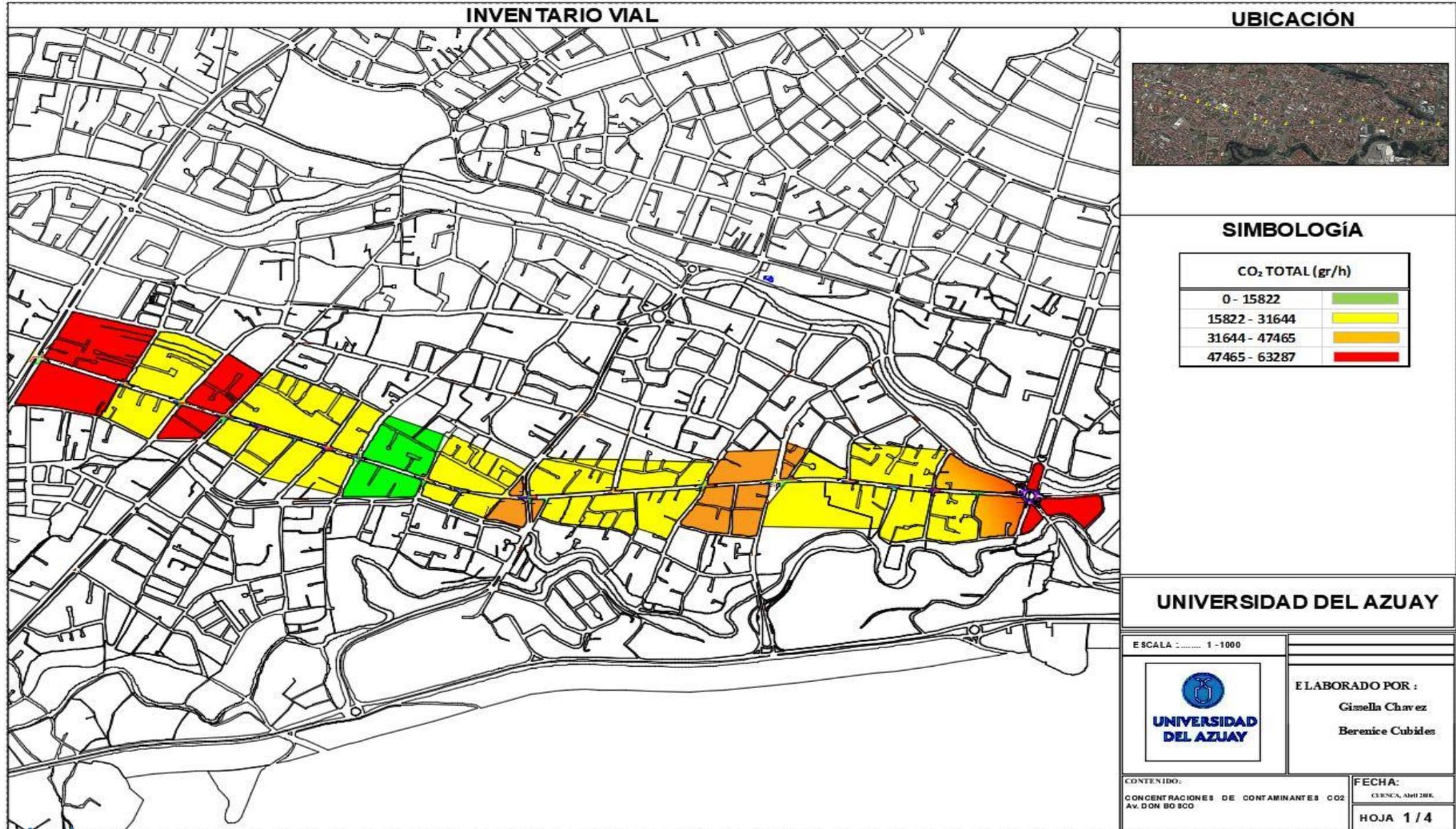
# CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS ANALIZADOS



## EMISIONES DE CONTAMINANTES EN LAS INTERSECCIONES EN ESTUDIO

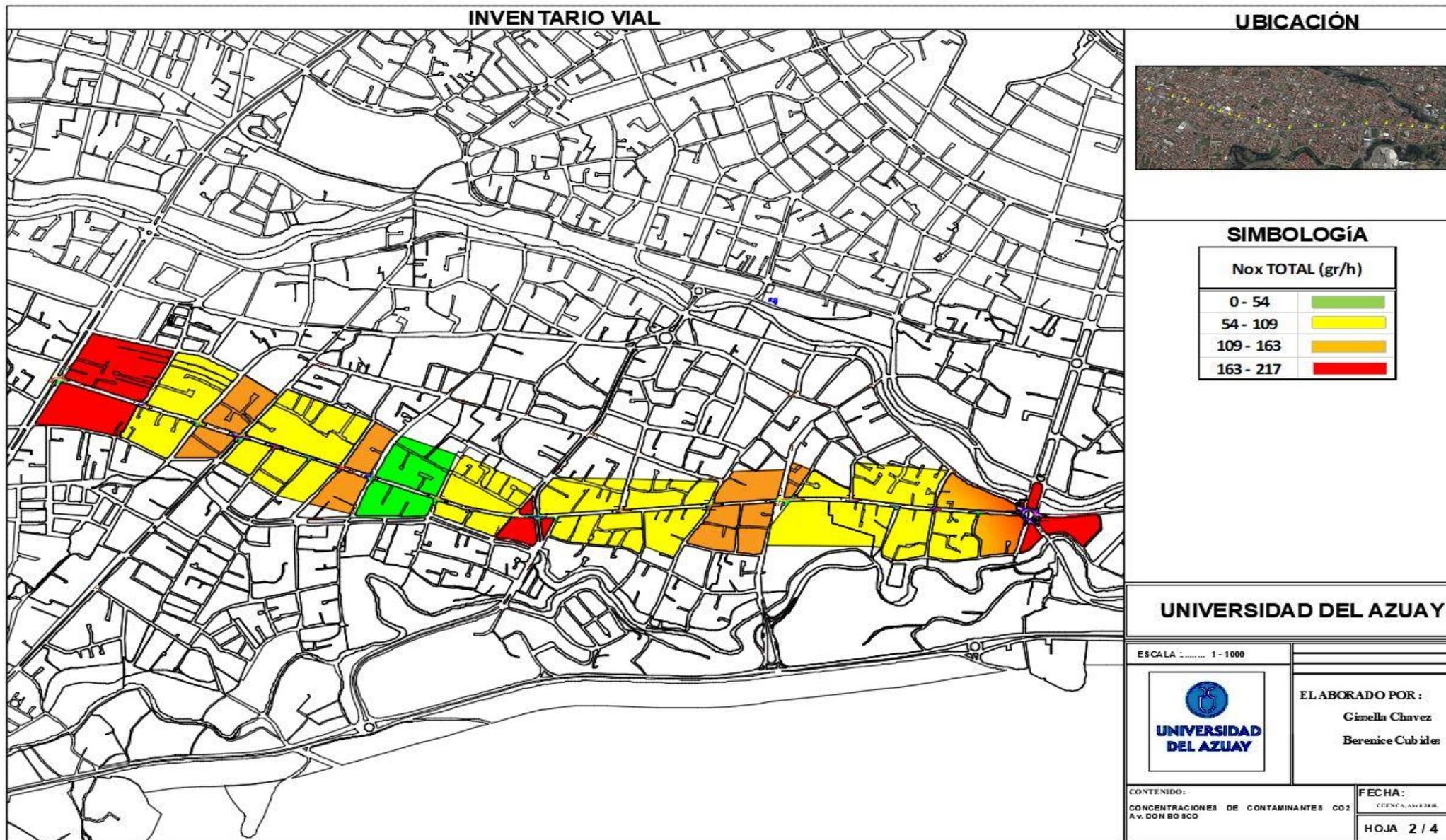
<b>INTERSECCIÓN: Av. Don Bosco y Av. 12 de Octubre</b>							
<b>ACCESO</b>	FLUJO (veh/h)	VELOCIDAD (km/h)	DEMORA (seg)	CO <sub>2</sub> (gr)	Nox (gr)	MP (gr)	VOC (gr)
<b>Av. Don Bosco O-E</b>	399.4	16.28	27.99	2004.17	7.34	0.2	24.05
<b>Av. Don Bosco E-O</b>	407.2	14.87	15.59	1605	5.13	0.17	15.38
<b>Av. 12 de Octubre N-S</b>	419.4	19.23	26.53	2068.82	10.22	0.21	23.66
<b>Av. 12 de Octubre S-N</b>	463.6	14.69	24.92	2240.74	6.06	0.17	26.23
<b>TOTAL</b>	1689.6	65.07	95.03	7918.73	28.75	0.75	89.32

# CONCENTRACIONES DE CO<sub>2</sub> EN LA AV. DON BOSCO

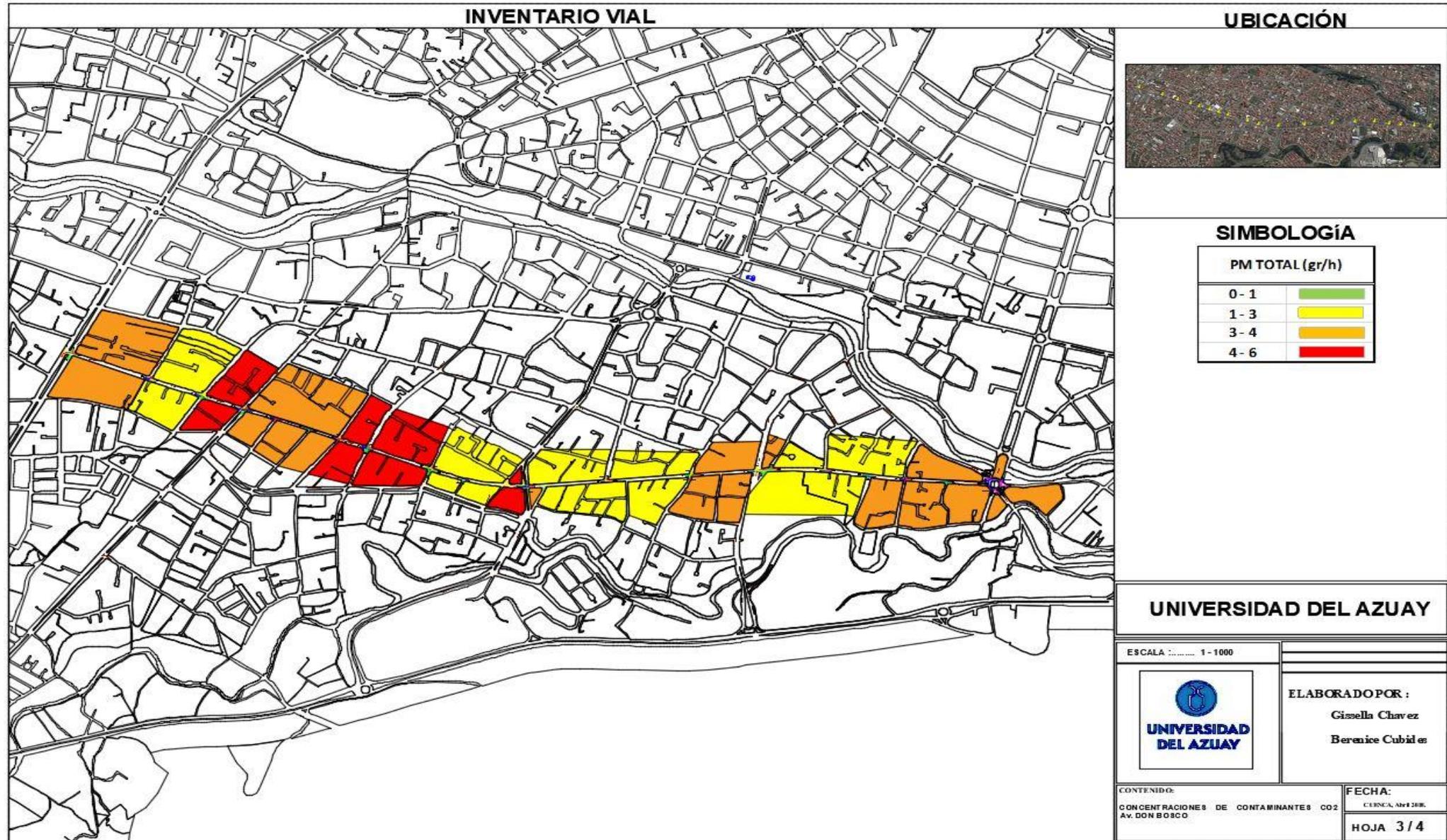


15/10/2019

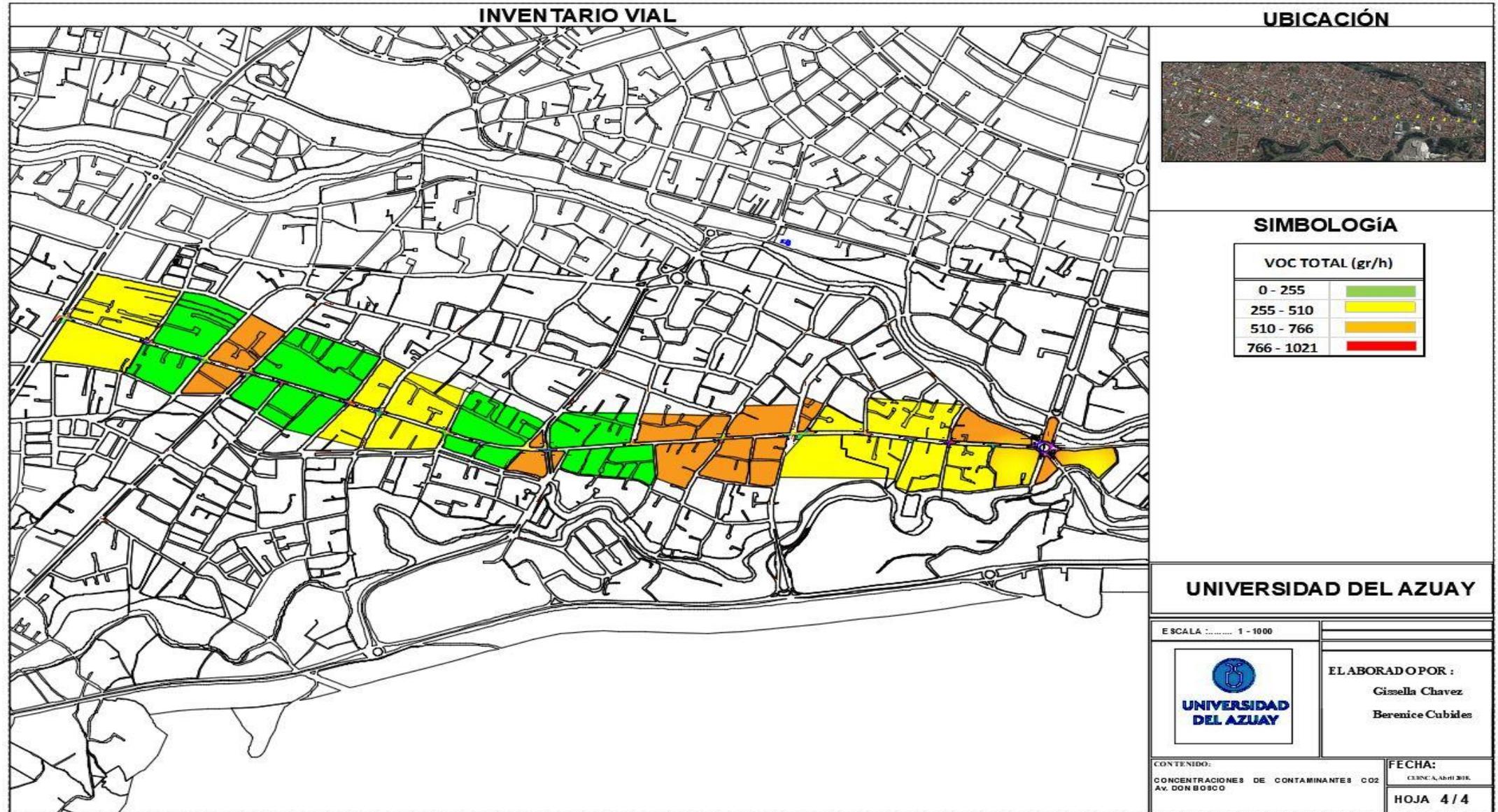
# CONCENTRACIONES DE NOX EN LA AV. DON BOSCO



# CONCENTRACIONES DE PM EN LA AV. DON BOSCO



# CONCENTRACIONES DE VOC EN LA AV. DON BOSCO



# MODELO MATEMÁTICO DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

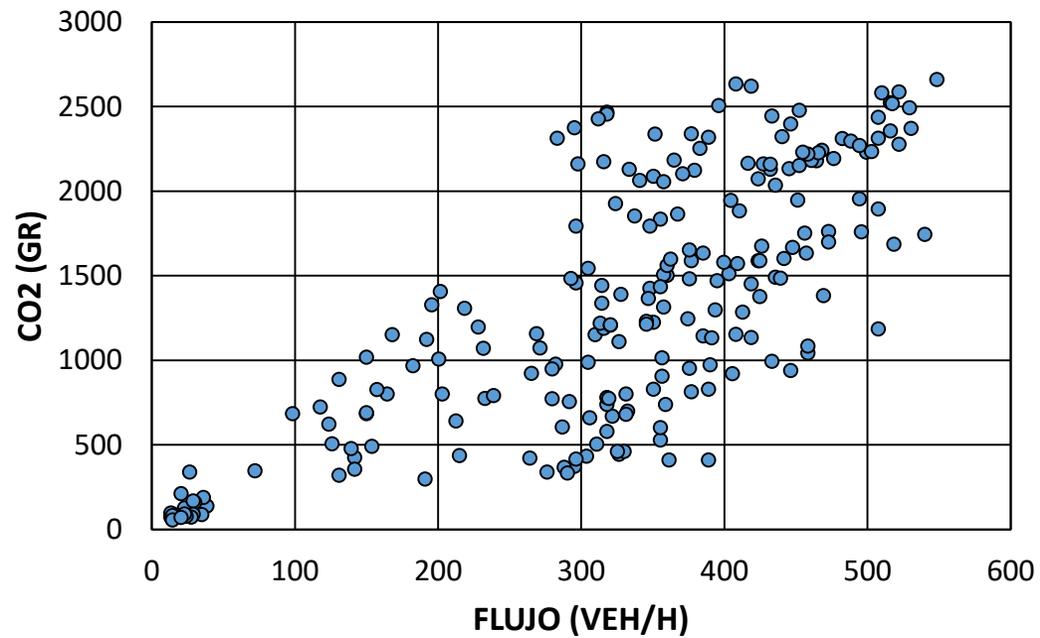
## INFORMACIÓN BASE

- Se trabajó con un total de 1656 datos válidos, 414 datos (CO<sub>2</sub> - Flujo – Velocidad – Demora), 414 datos (NO<sub>x</sub> – Flujo - Velocidad – Demora). 414 datos (MP – Flujo – Velocidad – Demora) y 414 (VOC – Flujo – Velocidad – Demora), con esta información se procede a determinar el modelo matemático de mejor ajuste.

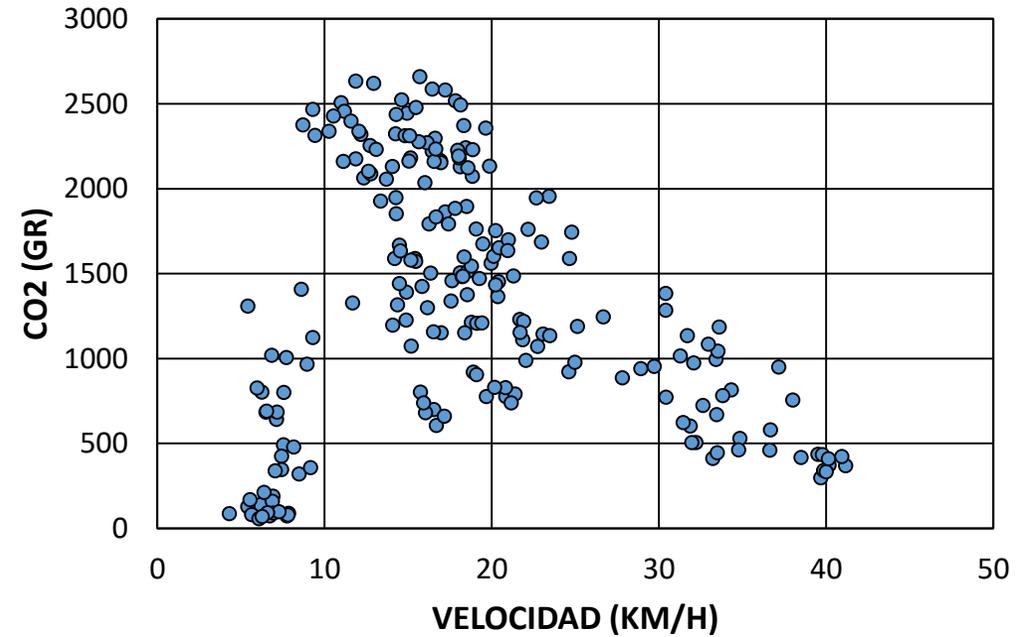
# RELACIONES ENTRE VARIABLES

## INFORMACIÓN BASE

### FLUJO-CO2

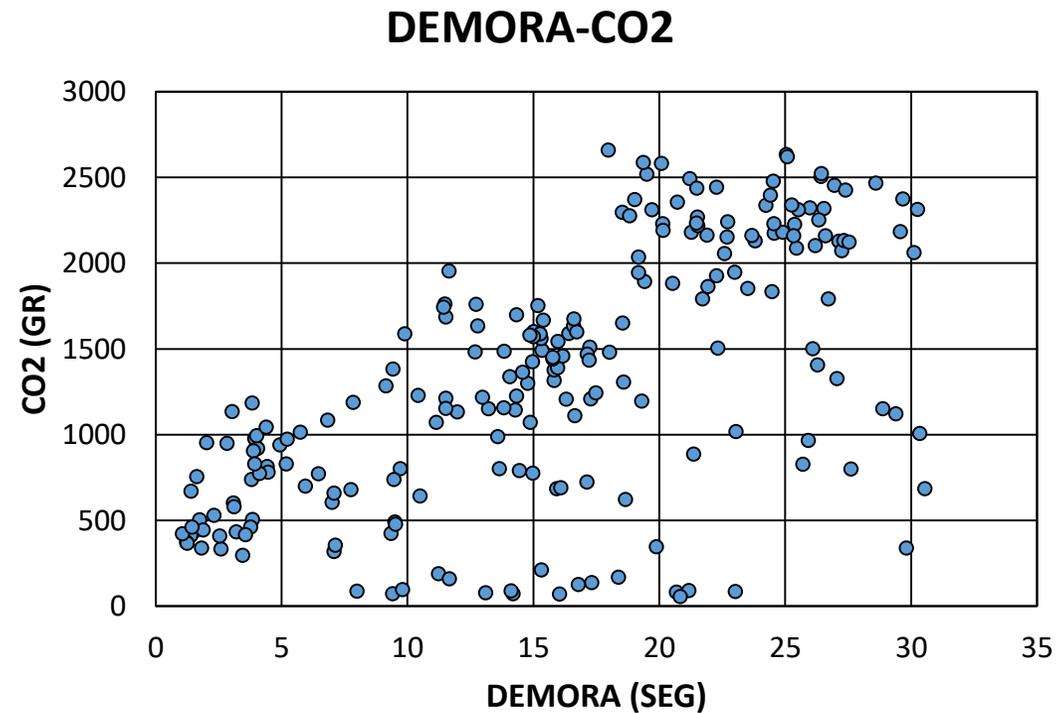


### VELOCIDAD-CO2



# RELACIONES ENTRE VARIABLES

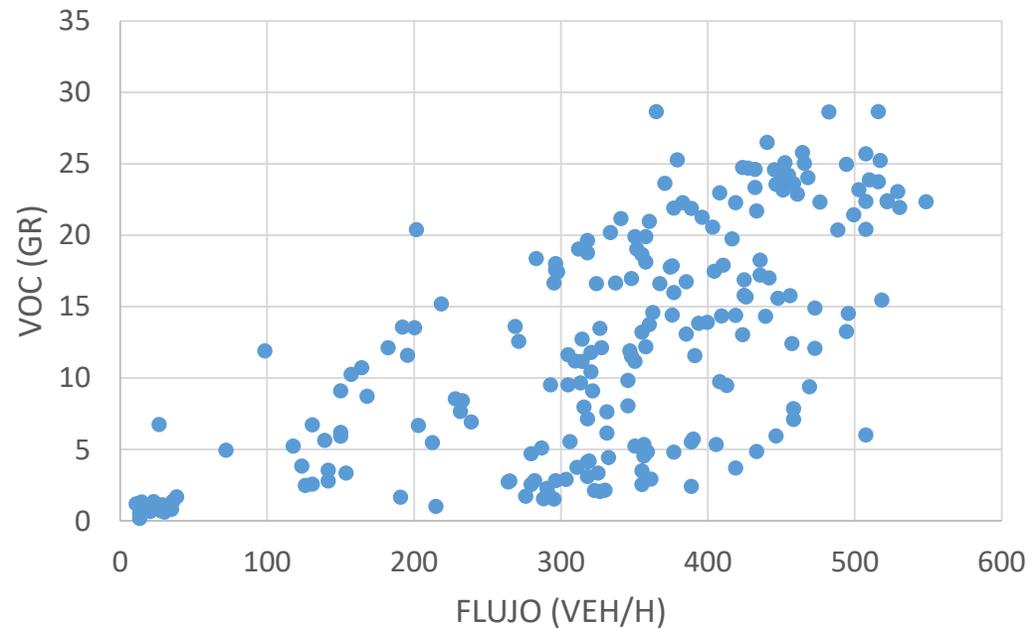
## INFORMACIÓN BASE



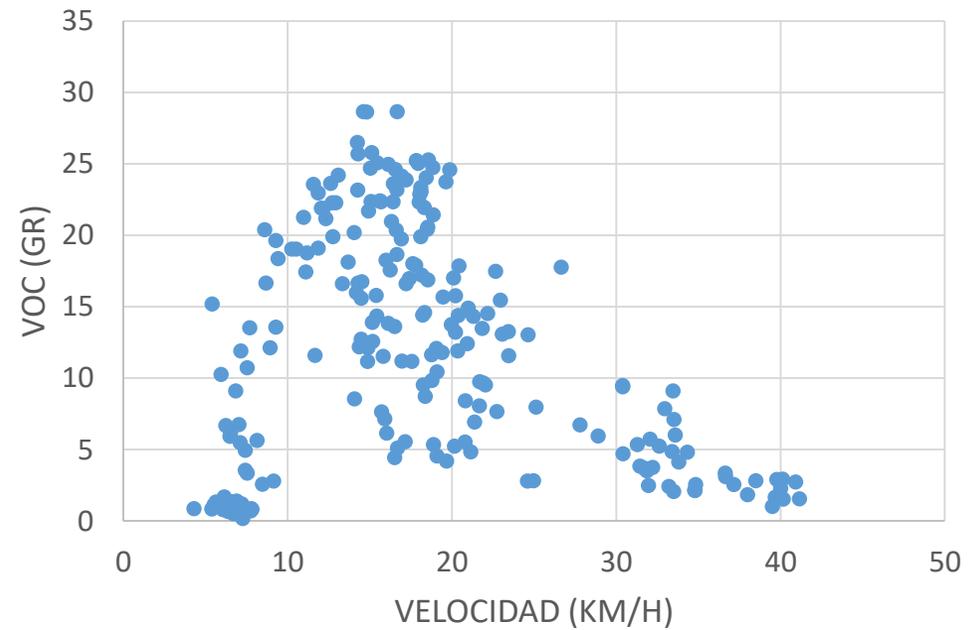
# RELACIONES ENTRE VARIABLES

## INFORMACIÓN BASE

FLUJO-VOC

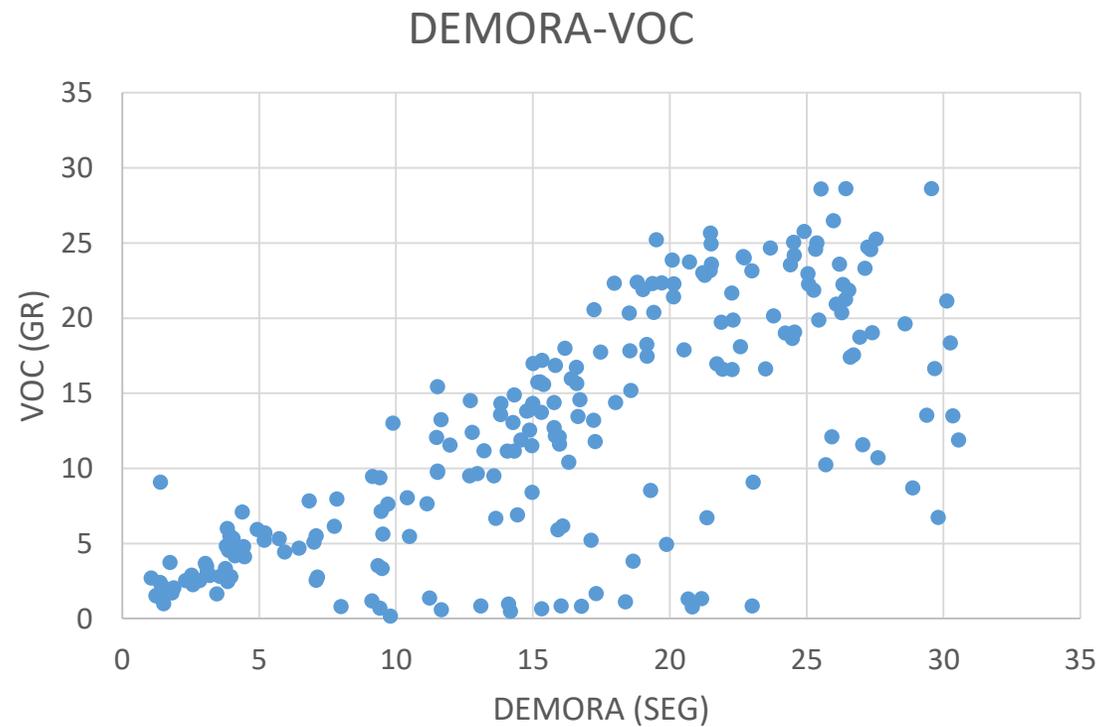


VELOCIDAD-VOC



# RELACIONES ENTRE VARIABLES

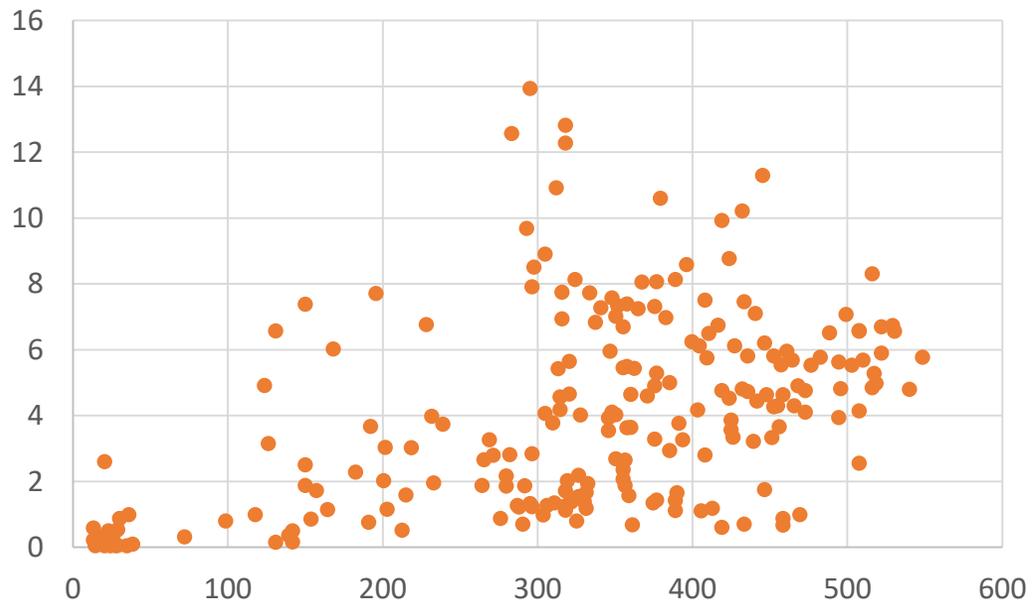
## INFORMACIÓN BASE



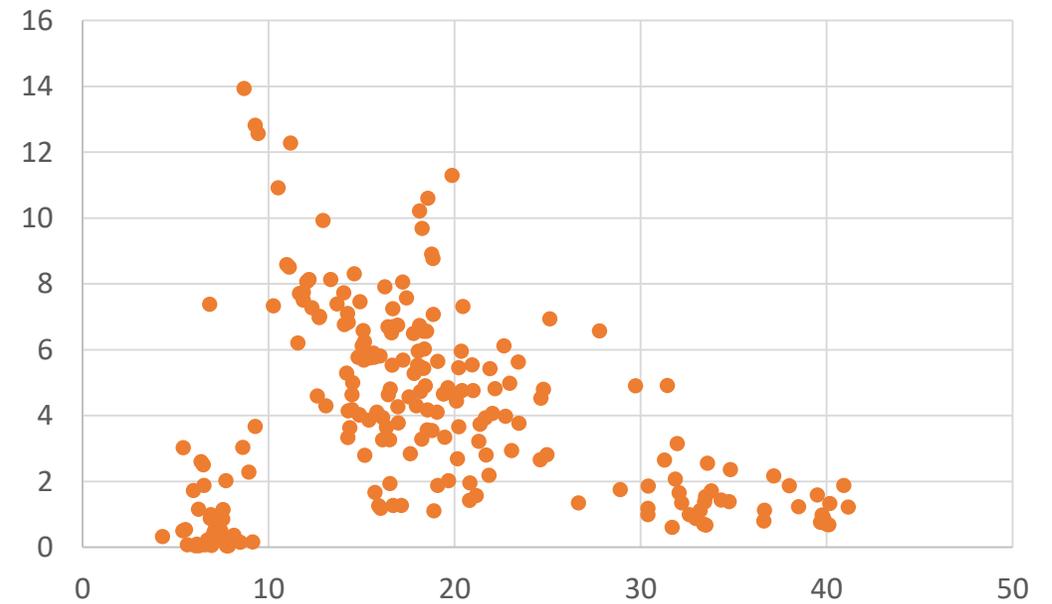
# RELACIONES ENTRE VARIABLES

## INFORMACIÓN BASE

FLUJO-NOX

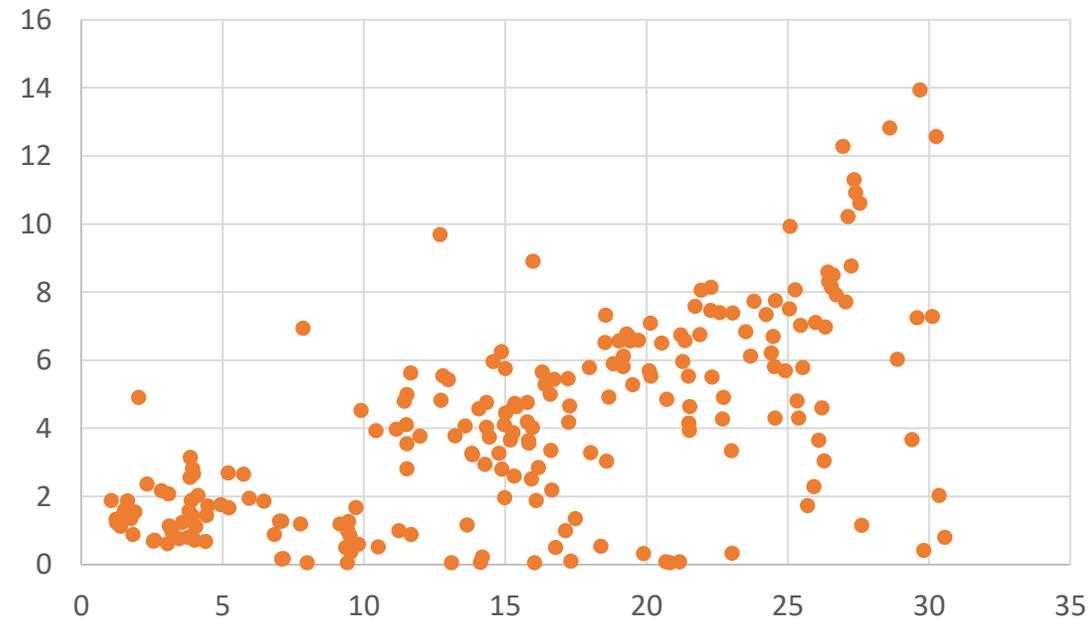


VELOCIDAD-NOX



# RELACIONES ENTRE VARIABLES INFORMACIÓN BASE

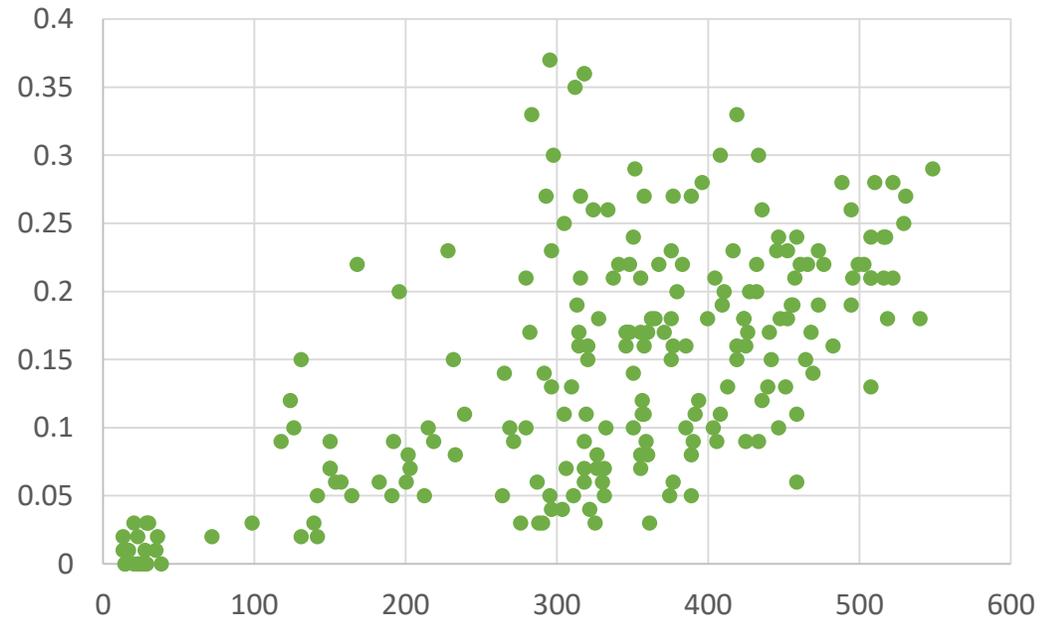
DEMORA-NOX



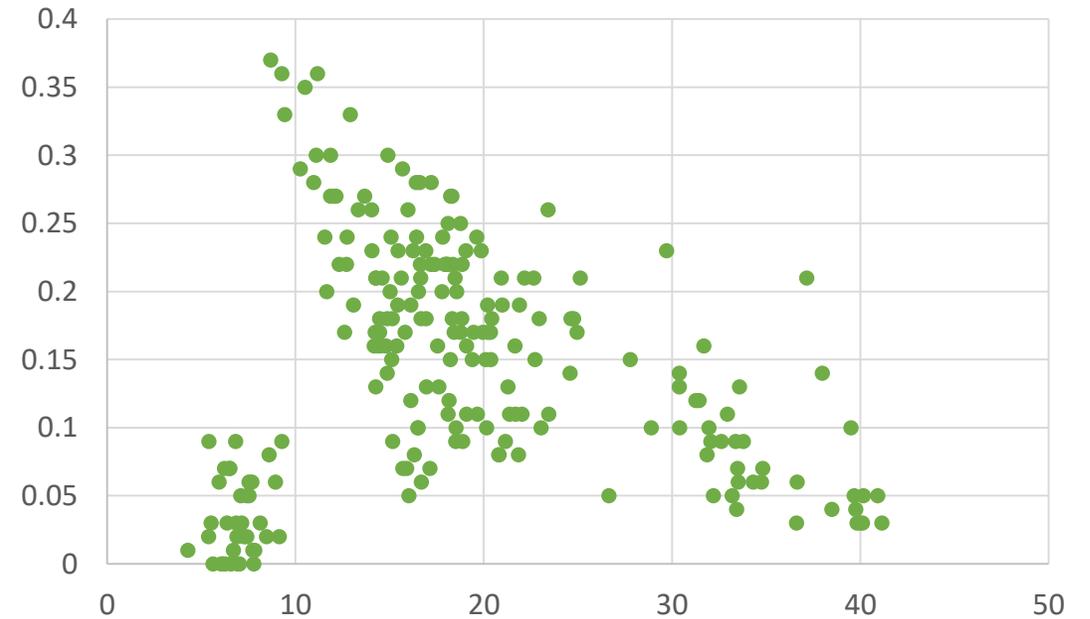
# RELACIONES ENTRE VARIABLES

## INFORMACIÓN BASE

FLUJO-MP

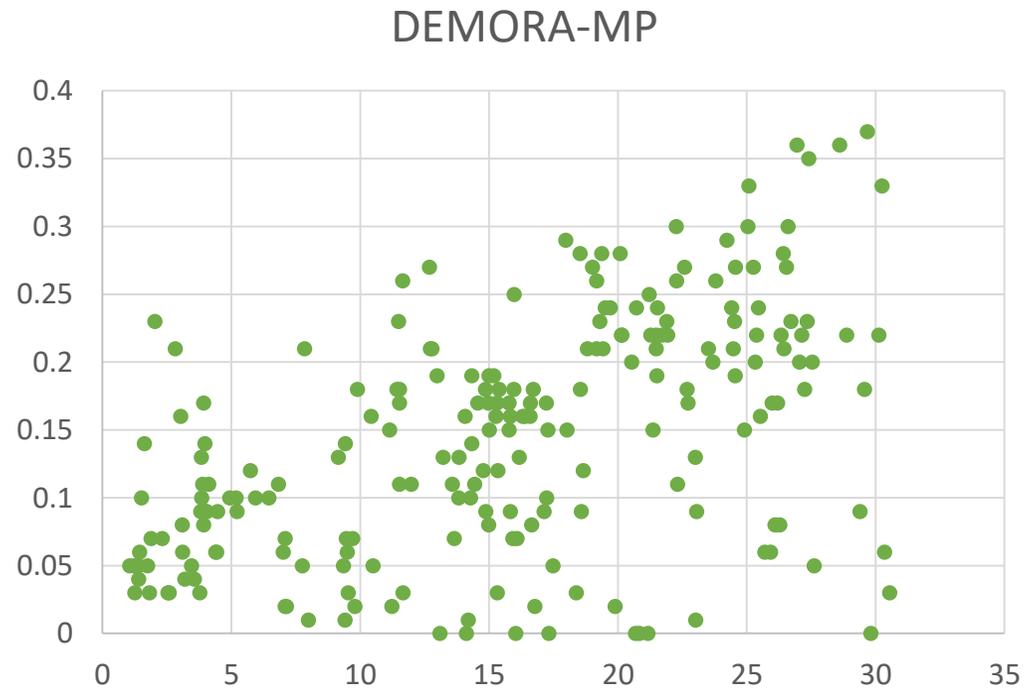


VELOCIDAD-MP



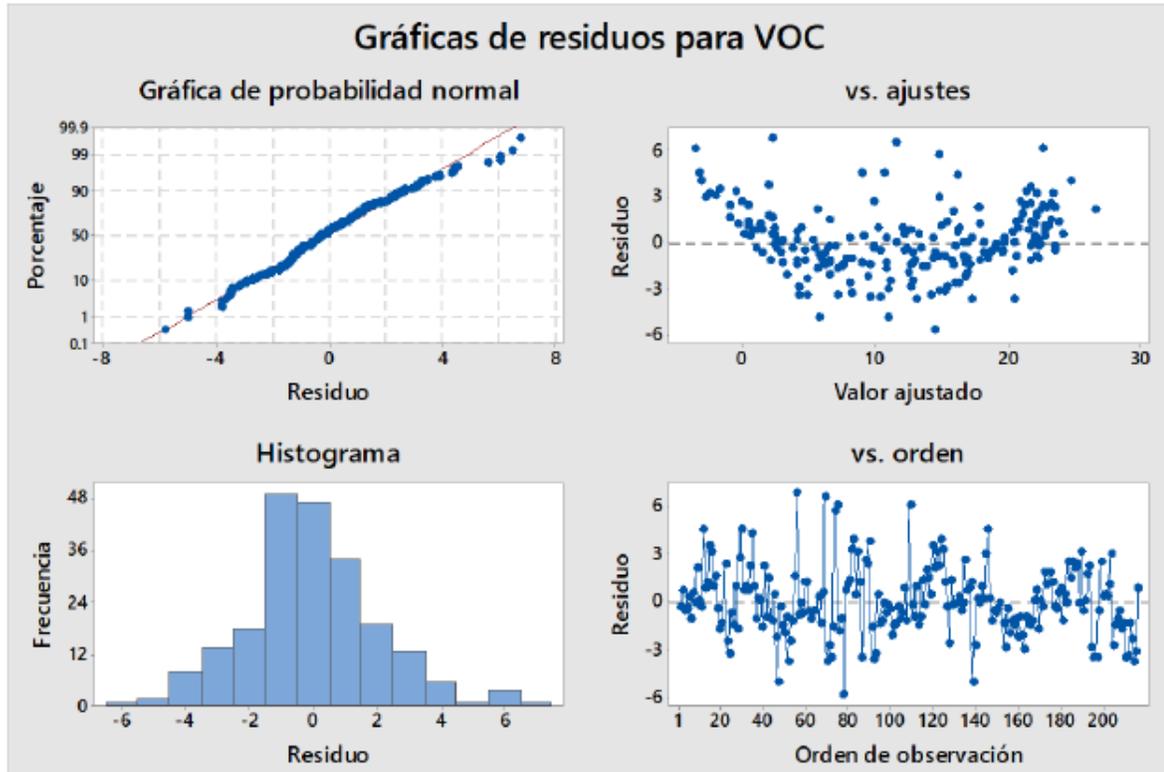
# RELACIONES ENTRE VARIABLES

## INFORMACIÓN BASE



# MODELO PRELIMINAR

## REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE



Resultados aceptables pero con inconvenientes al no cumplir todos los supuestos estadísticos (linealidad, homocedasticidad, simetría, ortogonalidad, aleatoriedad, normalidad de los residuos y autocorrelación).

# MODELO PRELIMINAR REGRESIÓN LINEAL MULTIVARIABLE

CONDICIONES DE BORDE PARA APLICACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO

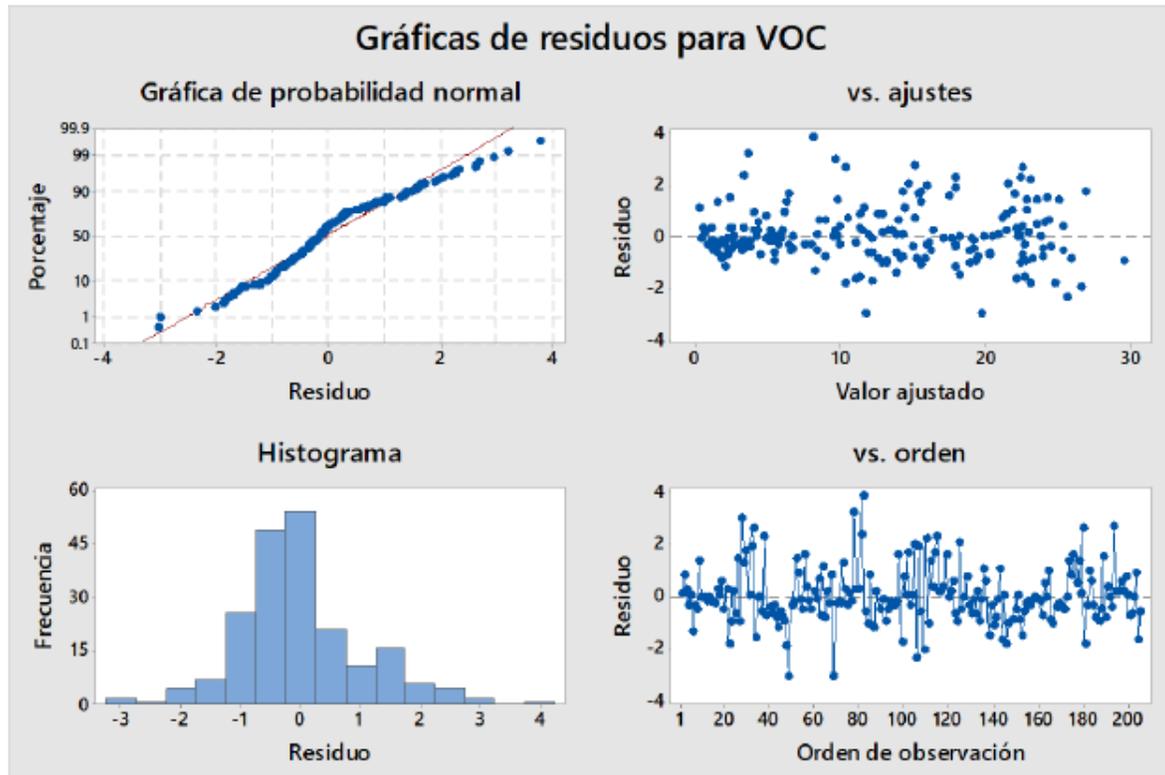
Flujo	Velocidad	Demora
0 – 600 veh/h	0 – 42 km/h	0 – 35 seg

UNIDADES DE VARIABLES

	Unidad
CO <sub>2</sub>	gr / hora
NOx	gr / hora
VOC	gr / hora
MP	gr / hora
Flujo	veh/h
Velocidad	km/h
Demora	seg

# MODELO DEFINITIVO

## REGRESIÓN POLINOMIAL MULTIVARIABLE



Se analizaron todas las posibilidades de variable (Flujo, Velocidad, Demora, Flujo\*Velocidad, Flujo\*Demora, Velocidad\*Demora, Flujo<sup>2</sup>, Velocidad<sup>2</sup> y Demora<sup>2</sup>), y se descartaron las combinaciones en las cuales el valor “p” (probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula) era menor a 0.05.

# MODELO DEFINITIVO

## REGRESIÓN POLINOMIAL MULTIVARIABLE

Análisis de regresión: CO<sub>2</sub> vs. FLUJO; FLUJO\*DEMORA; FLUJO\*VELOCIDAD

Fuente	GL	SC Ajust	Valor F	Valor p
Regresión	3	109922869	918.24	0.000
FLUJO	1	1675334	41.98	0.000
F*D	1	11815150	296.09	0.000
F*V	1	398439	9.99	0.002
R-cuad.		R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)	
		92.69%	92.54%	

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	93	36.1	2.58	0.011	
FLUJO	2.103	0.325	6.48	0.000	10.52
F*D	0.13987	0.00813	17.21	0.000	4.94
F*V	-0.02772	0.00877	-3.16	0.002	5.87

$$CO_2 = 93 + 2.103*FLUJO + 0.13987*(F*D) - 0.02772*(F*V)$$

# MODELO DEFINITIVO

## REGRESIÓN POLINOMIAL MULTIVARIABLE

Análisis de regresión: NOx vs. VELOCIDAD; FLUJO\*DEMORA; FLUJO<sup>2</sup>; VELOCIDAD<sup>2</sup>

Fuente	GL	SC Ajust	Valor F	Valor p
Regresión	3	1030.32	143.74	0.000
VELOCIDAD	1	68.29	38.11	0.000
F*D	1	434.76	246.61	0.000
F <sup>2</sup>	1	62.88	35.09	0.000
V <sup>2</sup>	1	50.03	27.92	0.000

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
74.19%	73.68%	72.99%

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-2.025	0.487	-4.16	0.000	
VELOCIDAD	0.3678	0.0596	6.17	0.000	32.01
F*D	0.000703	0.000045	15.58	0.000	3.24
F <sup>2</sup>	0.000013	0.000002	-5.92	0.000	3.43
V <sup>2</sup>	-0.00696	0.00132	-5.28	0.000	31.50

$$NOx = -2.025 + 0.3678*VELOCIDAD - 0.000703*F*D + 0.000013*F^2 - 0.00696*V^2$$

# MODELO DEFINITIVO

## REGRESIÓN POLINOMIAL MULTIVARIABLE

Análisis de regresión: VOC vs. FLUJO; DEMORA; FLUJO\*DEMORA

Fuente	GL	SC Ajust	Valor F	Valor p
Regresión	3	13164.5	3758.36	0.000
FLUJO	1	22.8	19.54	0.000
DEMORA	1	13.9	11.87	0.001
F*D	1	521.6	446.76	0.000

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
98.24%	98.21%	98.13%

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.98	0.509	-1.92	0.0056	
FLUJO	0.00682	0.00154	4.42	0.000	7.80
DEMORA	0.0986	0.0286	3.45	0.001	9.88
F*D	0.001797	0.000085	21.14	0.000	17.97

$$VOC = -0.98 + 0.00682*FLUJO + 0.0986*DEMORA + 0.001797*F*D$$

# MODELO DEFINITIVO

## REGRESIÓN POLINOMIAL MULTIVARIABLE

Análisis de regresión: MP vs. FLUJO; VELOCIDAD; DEMORA; F\*V

Fuente	GL	SC Ajust	Valor F	Valor p
Regresión	3	1.00647	127.59	0.000
FLUJO	1	0.28732	145.69	0.000
VELOCIDAD	1	0.04484	22.74	0.000
DEMORA	1	0.06351	32.21	0.000
F*V		0.06855	34.76	0.000

R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
71.64%	71.08%	70.48%

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-0.0979	0.0168	-5.84	0.001	
FLUJO	0.000707	0.000059	12.07	0.000	6.78
VELOCIDAD	0.00486	0.00102	4.77	0.000	8.68
DEMORA	0.003290	0.000580	5.68	0.000	2.28
F*V	-0.000021	0.000004	-5.90	0.000	18.2

$$MP = -0.0979 + 0.000707*FLUJO + 0.00486*VELOCIDAD + 0.00329*DEMORA - 0.000021*F*V$$

# ESTIMACIÓN DE CONTAMINANTES POR ACCESO EN UNA HORA

$$ETi = N \frac{\sum_{i=1}^i (Ea * Fa)}{\sum_{i=1}^i (Fa)}$$

Donde:

N = número de intervalos en los que fue dividida la hora de máxima demanda para la toma de datos (6 en este caso).

ETi = Estimación total del contaminante en el acceso (gr/h).

Ea = Estimación del contaminante en cada intervalo de tiempo (gr/min)

Fa = Flujo vehicular en cada intervalo de tiempo (veh/min)

# ESTIMACIÓN DE CONTAMINANTES POR INTERSECCIÓN EN UNA HORA

$$ETI_i = N \frac{\sum_{i=1}^i (Ela * Fla)}{\sum_{i=1}^i (Fla)}$$

Donde:

N = número de accesos en la intersección I.

ETI<sub>i</sub> = Estimación total del contaminante en toda la intersección (gr/h).

EI<sub>a</sub> = Estimación del contaminante en cada acceso (gr/h)

F<sub>a</sub> = Flujo vehicular en cada acceso (veh/h)

# CONCLUSIONES

- El correcto levantamiento de información garantiza en gran medida el éxito de la evaluación operativa, se recomienda que se realice utilizando equipos de ultima generación.
- Se debe garantizar que la calibración y validación del modelo de microsimulación sea el adecuado para que represente el comportamiento real del trafico vehicular a lo largo de la red analizada.
- Se debe considerar que el modelo al realizar la micro simulación considera ciertas regulaciones y condiciones de circulación estrictamente, caso que en nuestro medio no siempre se cumple. Pese a estas limitaciones, el modelo calibrado sirve como base para el análisis e implementación de futuros estudios de tránsito.

# CONCLUSIONES

- Una regresión lineal no fue suficiente para representar con exactitud el comportamiento de los distintos contaminantes. Fue necesario realizar una regresión polinomial.
- En el 1er experimento la variable que mayor peso tuvo fue la demora, quiere decir que incluirla dentro de las consideraciones fue exitoso.
- En el 2do experimento no fue tan evidente el peso de la demora por sí sola, al interactuar con las otras dos variables (flujo y velocidad) se logró tener una mejor representación.
- El CO<sub>2</sub> y los VOC tienen un comportamiento análogo y sus modelos se ajustan satisfactoriamente.

# CONCLUSIONES

- Para los NOx y el MP si bien se obtuvieron modelos ajustados y representativos, el ajuste es menor comparado con los primeros dos contaminantes nombrados.
- La investigación presenta resultados satisfactorios y fáciles de aplicar para que una vez que se realicen los estudios en los otros ejes viales definidos, se generalicen los resultados y se los pueda incluir en los EIRV de la ciudad de Cuenca.

