

*Ciudades Inteligentes: Modelado y Simulación de Sociedades
Sustentables (CIMS³)*

MODELADO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA URBANA

Andrea Pineda Rojas

Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA/CONICET-UBA)
Departamento de Ciencias de la Atmósfera y los Océanos
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Universidad de Buenos Aires

1. Introducción al problema de la contaminación atmosférica

2. Modelos de calidad de aire para áreas urbanas

3. Ejemplos: estudios en el AMBA

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Existencia en la atmósfera exterior de uno o más contaminantes **en proporciones tales y con una duración tal** que afectan o pueden afectar negativamente la salud humana, el medio ambiente y el patrimonio cultural (edificios, monumentos y materiales)

1. Introducción



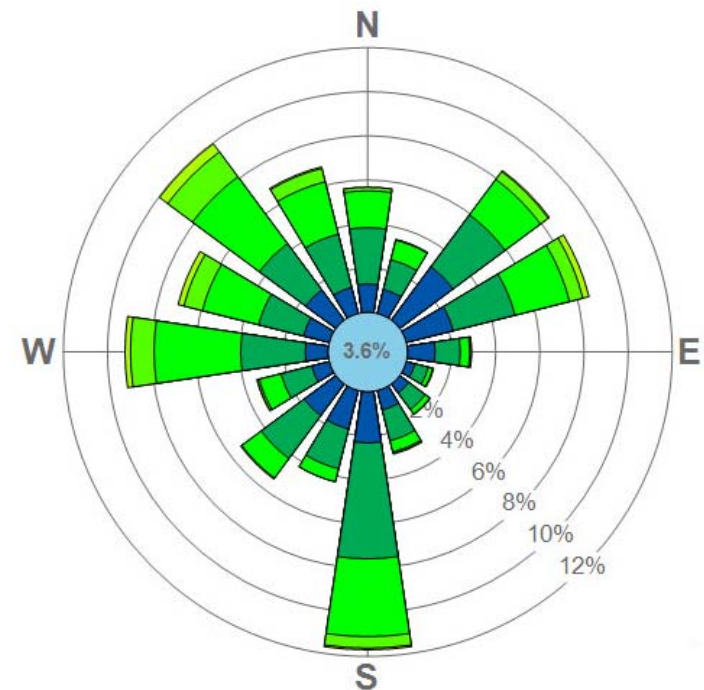
1. Introducción

FUENTES DE EMISIÓN	CONTAMINANTE
<u>Antropogénicas</u>	
Transporte vehicular	NO _x (NO+NO ₂) COV MP CO SO _x
Calefacción	
Consumo de gas en comercios e industrias	
Movimiento de aviones en aeropuertos	
Generación de energía	
Uso de solventes y productos de limpieza	COV
Actividades agropecuarias	NH ₃
<u>Naturales</u>	
Vegetación	COV
Erupciones volcánicas	MP
Incendios forestales	

TRANSPORTE POR EL VIENTO Y DISPERSIÓN ATMOSFÉRICA



✓ Dirección de viento

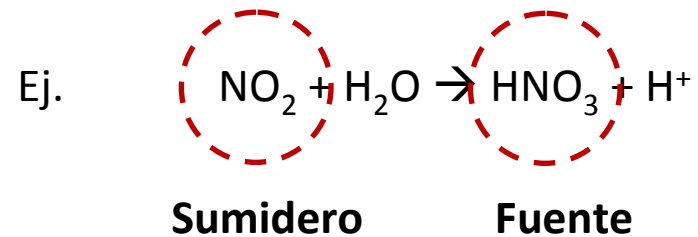


✓ Intensidad de viento

✓ Turbulencia atmosférica

- Condiciones Inestables (ej., días soleados, viento intenso)
- Condiciones Estables (ej., días nublados, calma)

TRANSFORMACIONES QUÍMICAS



Contaminantes

Primarios: son emitidos directamente desde la fuente (ej., CO)

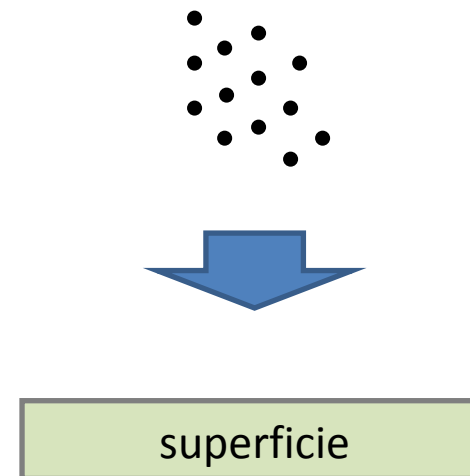
Secundarios: los que se forman en la atmósfera (ej., O₃)

PROCESOS DE DEPÓSITO

DEPOSITO HUMEDO



DEPOSITO SECO

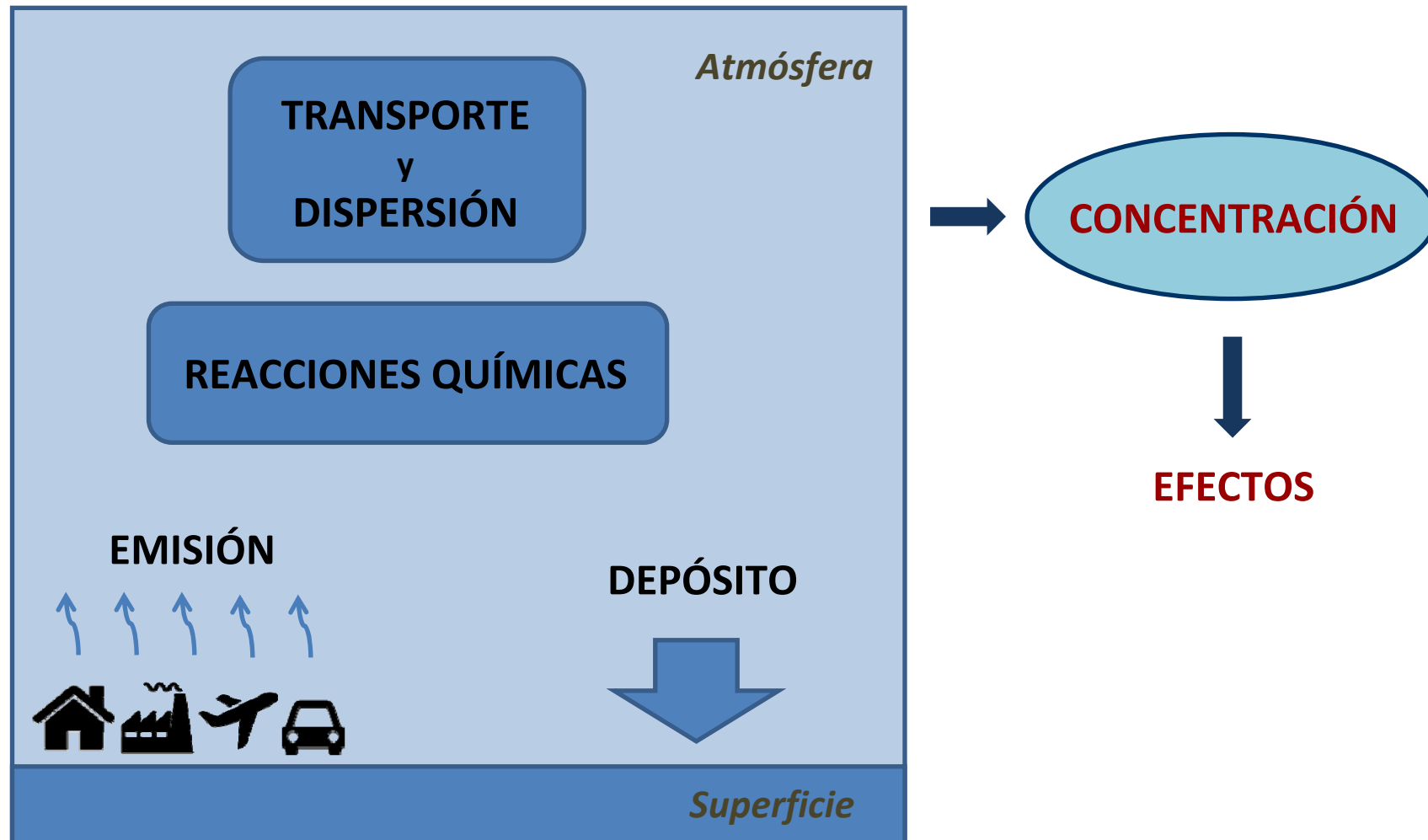


Representan:

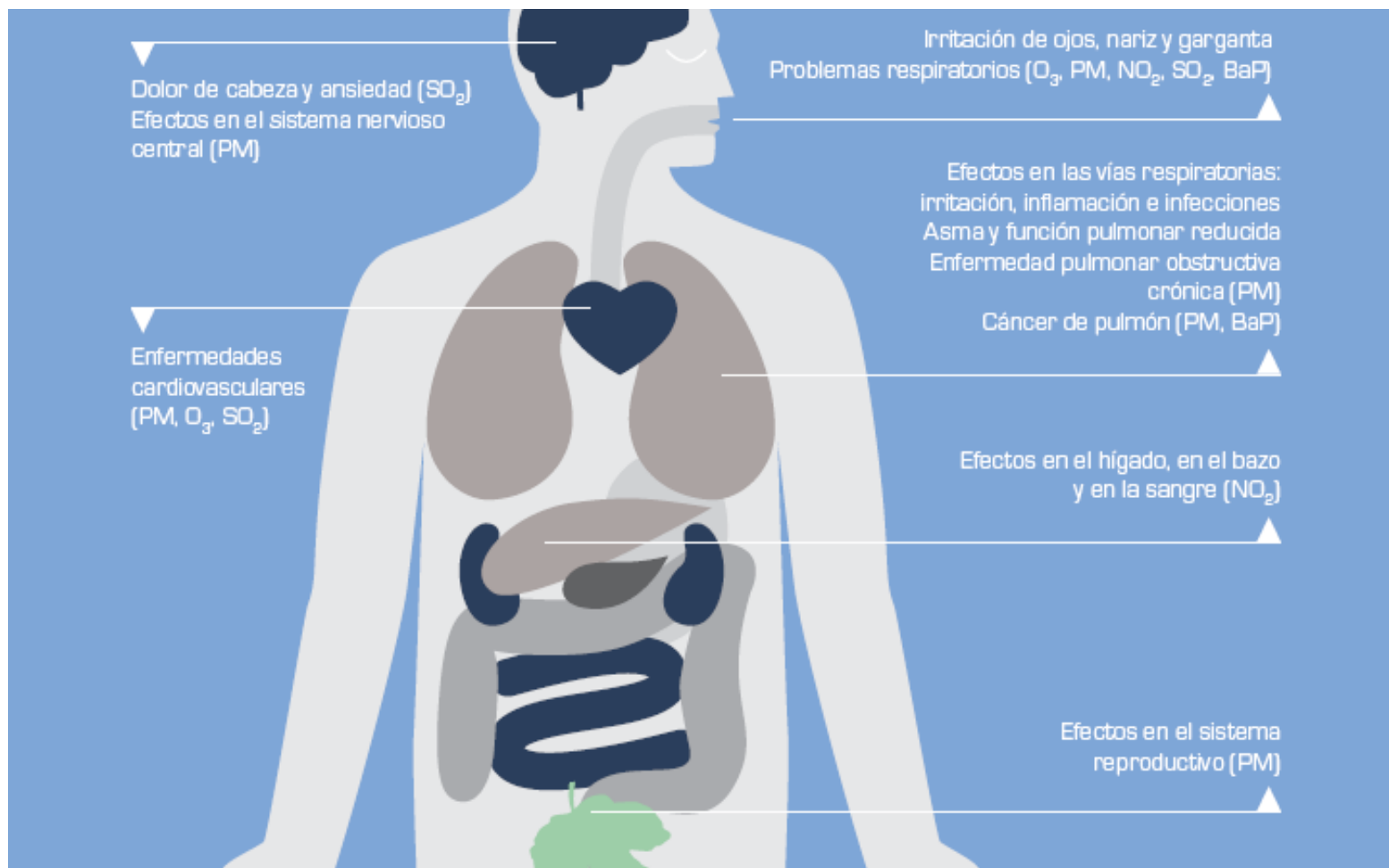
✓ Un sumidero para la atmosfera

✗ Una fuente para la superficie

1. Introducción



EFFECTOS EN LA SALUD HUMANA



ESTÁNDAR DE CALIDAD DE AIRE

Valor de la concentración de un **contaminante** que no debe superarse para proteger la salud de la población o mejorar el bienestar público

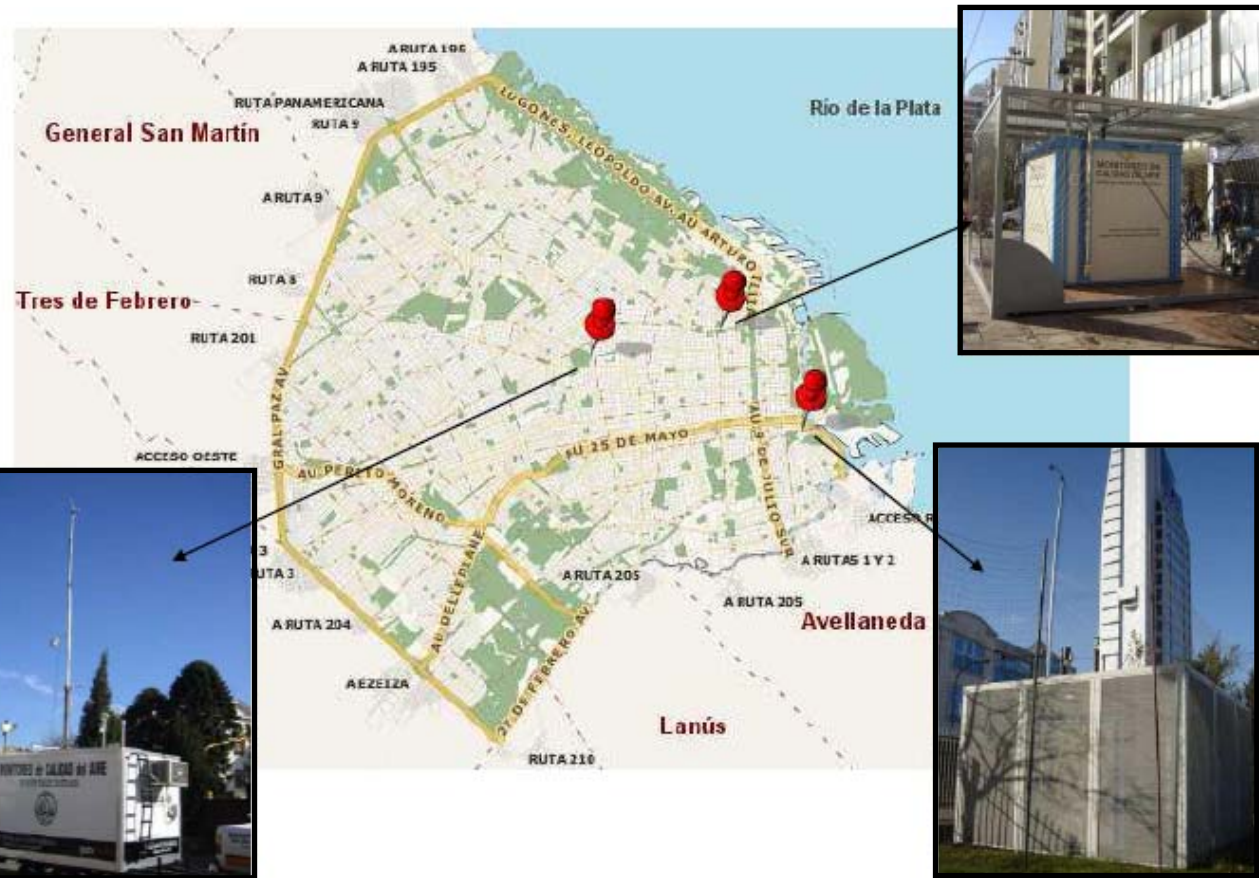
1. Introducción

Estándares de CA para la CBA

Contaminante	Símbolo	Período de promedio	mg/m ³	ppm	Tipo de norma
Dióxido de nitrógeno	NO ₂	1 hora	0.376	0.2	Primaria - secundaria
		1 año	0.1	0.053	Primaria – secundaria
Ozono	O ₃	1 hora	0.236	0.12	Primaria – secundaria
		8 horas	0.157	0.08	
Material particulado con diámetro ≤ 10 μm	MP ₁₀	24 horas	0.150		Primaria
		1 año	0.050		Primaria - secundaria
Dióxido de azufre	SO ₂	3 horas	1.309	0.50	Secundaria
		24 horas	0.367	0.14	Primaria
		1 año	0.079	0.03	Primaria
Monóxido de carbono	CO	1 hora	40	35	Primaria
		8 horas	10	9	Primaria

1. Introducción

Red de Monitoreo de Calidad de Aire (RMCA)



Estación Córdoba



Estación Parque Centenario



Estación La Boca

GESTION DE LA CALIDAD DEL AIRE

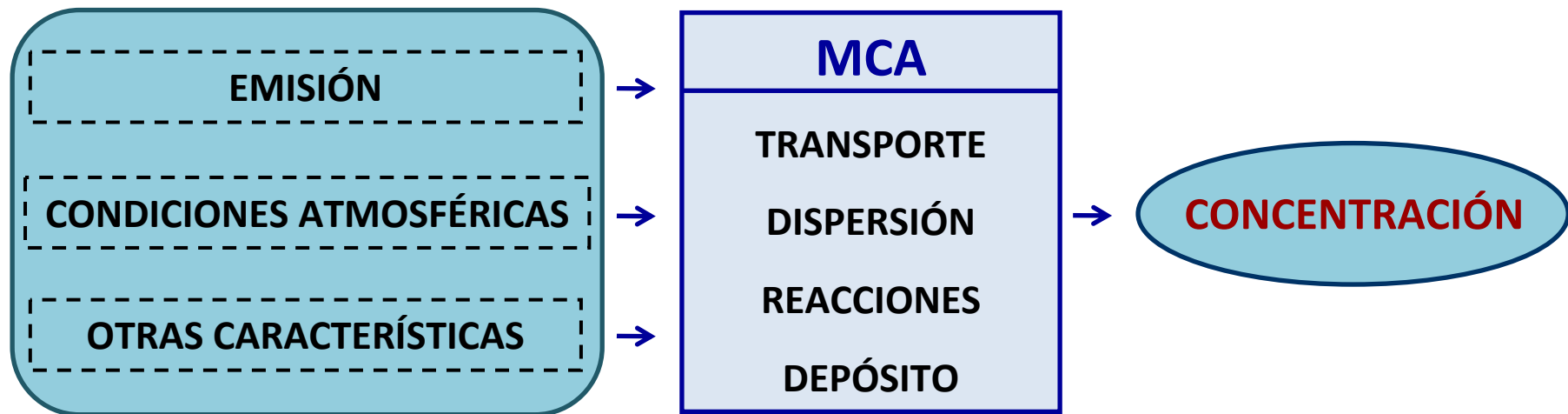
- **Contaminantes de referencia** y sus estándares de CA
- Diseño de RMCA
- Medición / Control
- Toma de medidas cuando no se cumpla la reglamentación
- Control del impacto de grandes industrias (EIA)

1. Introducción al problema de la contaminación atmosférica

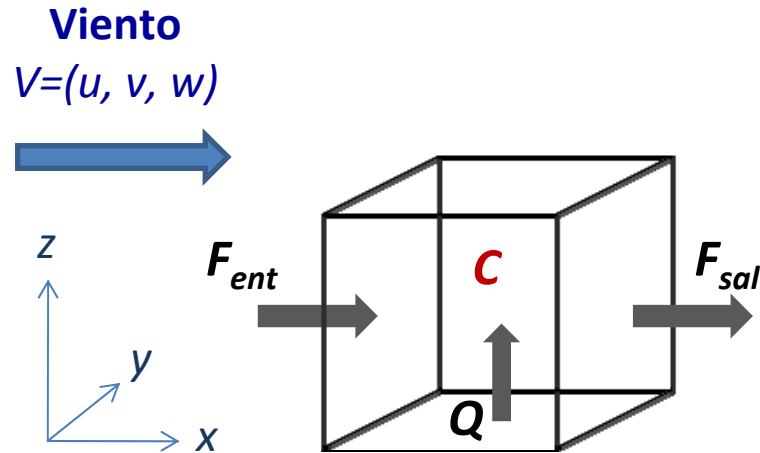
2. Modelos de calidad de aire para áreas urbanas

3. Ejemplos: estudios en el AMBA

MODELOS DE CALIDAD DE AIRE (MCA)



ECUACIÓN DE CONTINUIDAD



$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum \text{fuentes} - \sum \text{sumideros}$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = (Q + F_{ent} + FR) - (D + F_{sal} + PR)$$

$$F_{ent} - F_{sal} = -\nabla \cdot (V \cdot C) \quad \Rightarrow$$

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (V \cdot C) = Q + FR - D - PR$$



$$C = C(x, y, z, t)$$

APROXIMACIONES POSIBLES

- ✓ Estado estacionario ($\partial C / \partial t = 0$)
- ✓ El contaminante no se deposita ($\cancel{\nabla} D$)
- ✓ El contaminante es inerte ($\cancel{\nabla} FR, PR$)

$$\frac{\cancel{\partial C}}{\cancel{\partial t}} + \nabla \cdot (V.C) = Q + \cancel{FR} - \cancel{D} - \cancel{PR}$$

≠ Aproximaciones → ≠ Soluciones para C

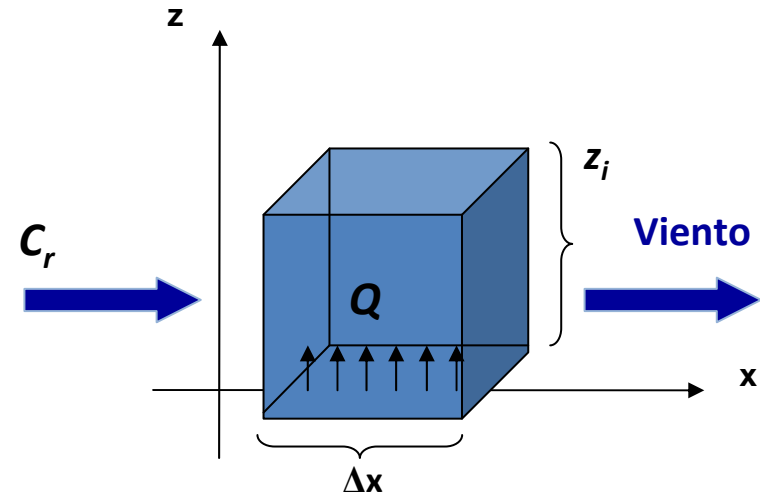
TIPOS DE MODELOS

- Modelo de la caja
- Modelos para fuentes puntuales
- Modelos para fuentes urbanas
- Modelos de cañón urbano
- Modelos de transporte químico
- Otros ...

MODELO DE LA CAJA

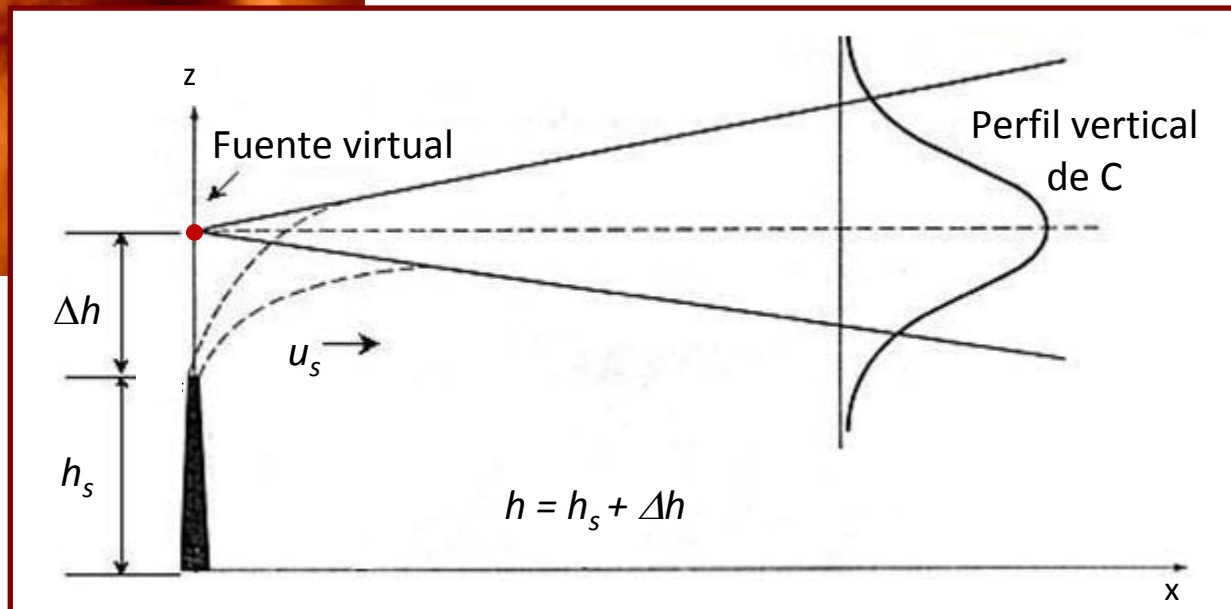
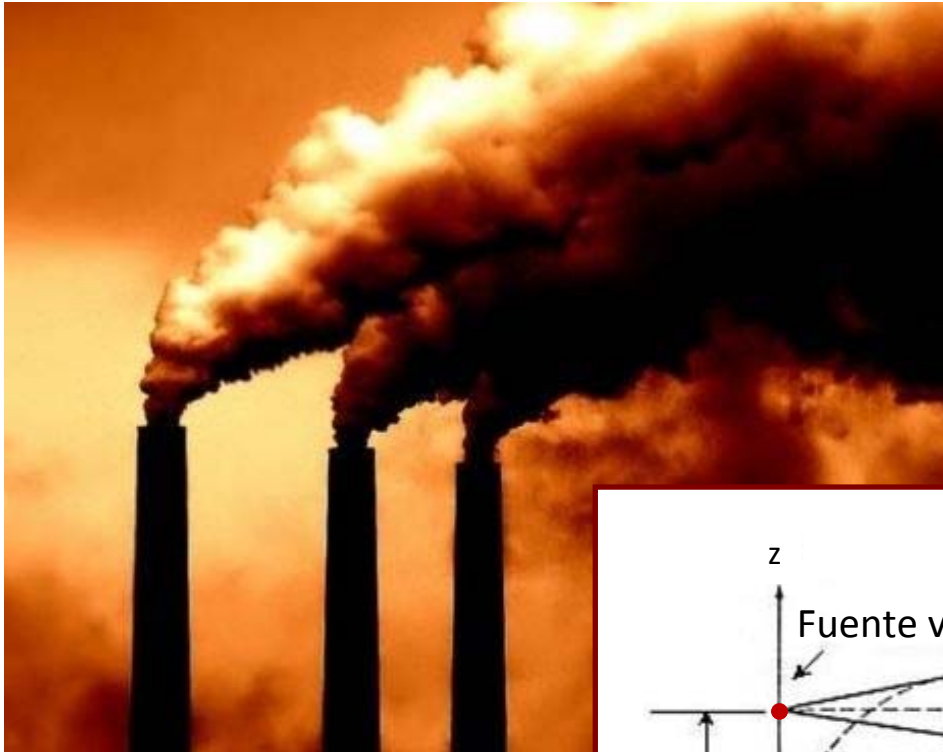
Aproximaciones:

- Estado estacionario
- Emisión $Q = \text{cte.}$
- Contaminante se distribuye uniformemente
- Viento en x con velocidad $u = \text{cte.}$
- Aire ingresa a la caja con una concentración C_r



$$C = C_r + \frac{Q \Delta x}{u z_i}$$

MODELOS PARA FUENTES PUNTUALES



MODELOS PARA FUENTES PUNTUALES

Aproximaciones:

- Estado estacionario
- Emisión continua desde una **fente puntual (Q)**, ubicada en $z = h$
- Distribuciones lateral y vertical de **C** tienen forma gaussiana
- Viento en **x** con velocidad $u_s = \text{cte.}$
- Contaminantes permanecen en aire

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} \exp \left[- \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{z-h}{\sigma_z} \right)^2 \right\} \right]$$

Ejemplos:

ISCST3 (USEPA, 1995)
AERMOD (Cimorelli et al., 2005)
CALPUFF (Scire et al., 2000)

Coeficientes de dispersión
lateral y vertical

$f(x, u, RS, Nubo)$

MODELOS PARA FUENTES URBANAS

Fuente areal: es la suma de todas las fuentes que se encuentran en un área dada



Simulan la **C** debida a una distribución de **fuentes areales** Q_{ij}

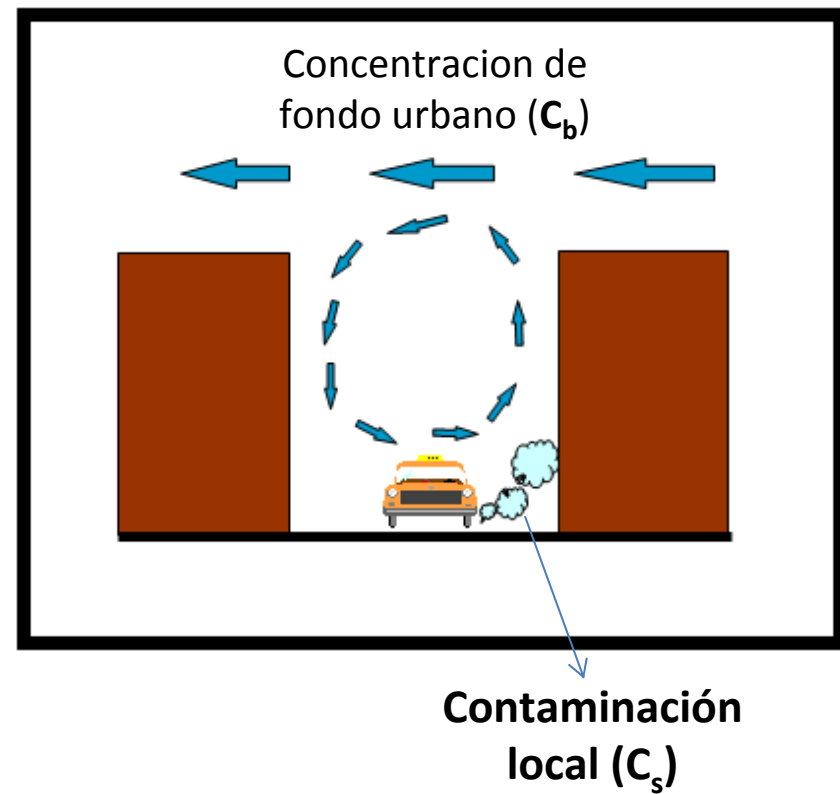


Concentración de fondo urbano (C_b)

Ejemplos:

- ATDL (Gifford y Hanna, 1973)
- DAUMOD (Mazzeo y Venegas, 1991)
- ADMS (Carruthers et al., 1994)

MODELOS DE CAÑÓN URBANO



$$C = C_b + C_s$$

MODELOS DE CAÑÓN URBANO

OPERATIVOS

Ecuación para C_s (un valor) en función de:

- Variables meteorológicas
- Características de la calle
- Emisión vehicular local

Ejemplos:

CALINE (Benson, 1984)
OSPM (Berkowicz, 2000)
SEUS (Venegas et al., 2014)

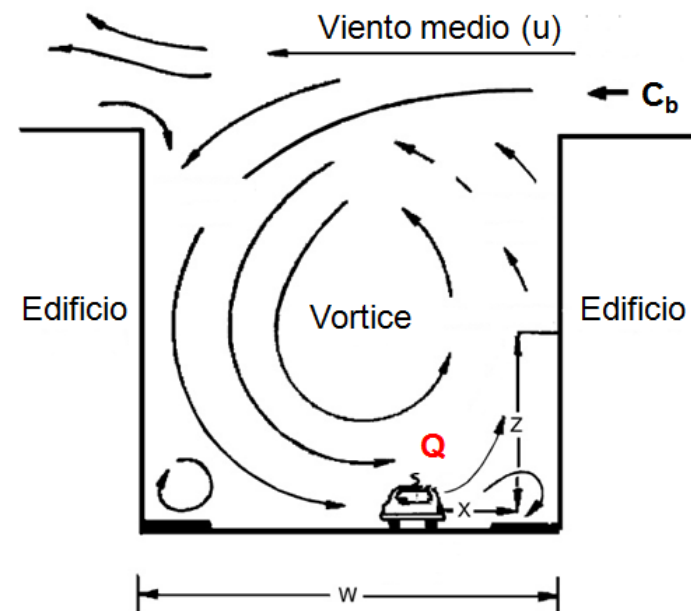
CFD

Integran numéricamente las ecuaciones de:

- Continuidad
- Cantidad de movimiento

usando las características de la calle como CC

Viento 3D \Rightarrow **Campo de C**

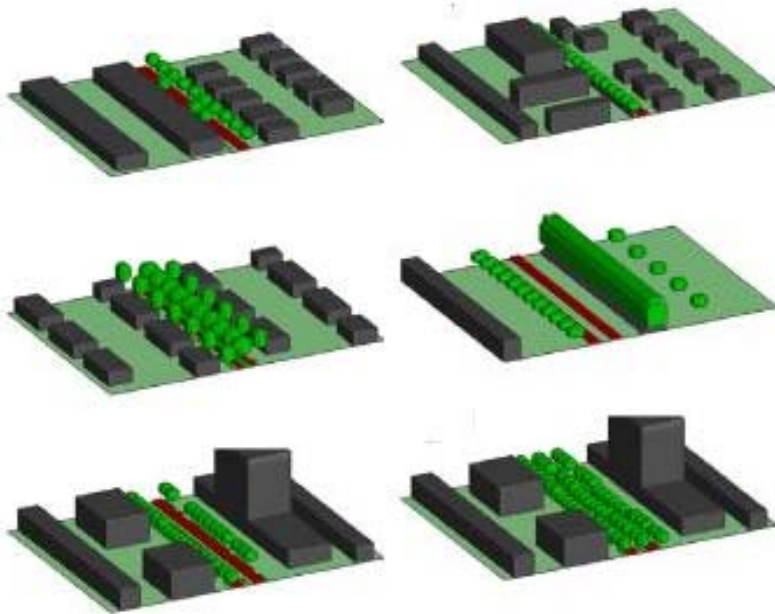


MODELOS DE CAÑÓN URBANO

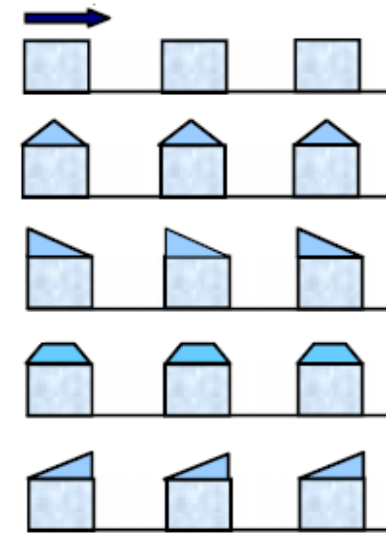
CFD

Aplicaciones: INVESTIGACION

- ✓ Interacción entre el flujo de aire y obstáculos



(Vos et al., 2013)



(Yassin, 2011)



(Murena y Mele, 2016)

MODELOS DE TRANSPORTE QUIMICO (CTM)

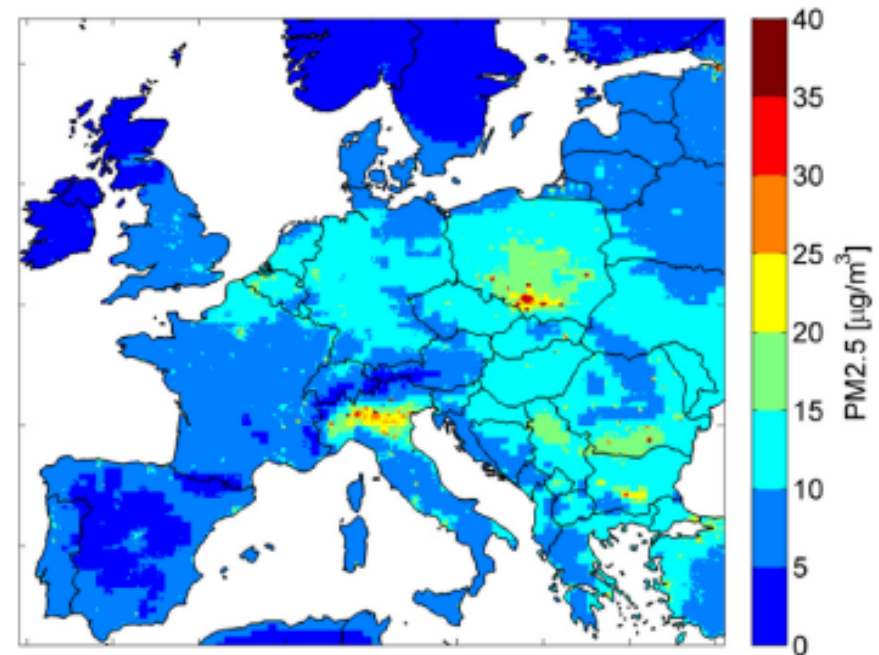
- Ecuaciones completas
- Esquemas para el tratamiento de la turbulencia
- Procesos de deposito sobre \neq tipos de superficies
- Mecanismos químicos muy completos

Ejemplos:

CMAQ (Bonkowsky y Roselle, 2003)

WRF-Chem (Grell et al., 2005)

CHIMERE (Menut et al., 2013)



(Kieseewetter et al., 2015)

Limitaciones en la escala urbana:

- × Tiempo de cómputo
- × Datos de entrada

2. Modelos de calidad de aire

MCA

	SIMPLES	COMPLEJOS
PROCESOS	simplificados	mayor detalle
DATOS DE ENTRADA	pocos	muchos
TIEMPO DE COMPUTO	bajo	alto



GESTION



INVESTIGACION

APLICACIONES

FUENTES PUNTUALES

EIA:

- ✓ Impacto de un complejo industrial
- ✓ Diseño de una RMCA
- ✓ Eventos de contaminación

Otras:

- ✓ h_s que sea ambientalmente sustentable

FUENTES URBANAS

- ✓ Distribuciones espacio-temporales
- ✓ Aportes relativos de \neq fuentes
- ✓ Exposición de la población
- ✓ Impacto de estrategias de reducción de emisiones
- ✓ Diseño de una RMCA
- ✓ Área afectada en una situación de excedencia

CTM

- ✓ Contribuciones de fuentes remotas
- ✓ Estudios de impacto / proyecciones
- ✓ Análisis de procesos

1. Introducción al problema de la contaminación atmosférica

2. Modelos de calidad de aire para áreas urbanas

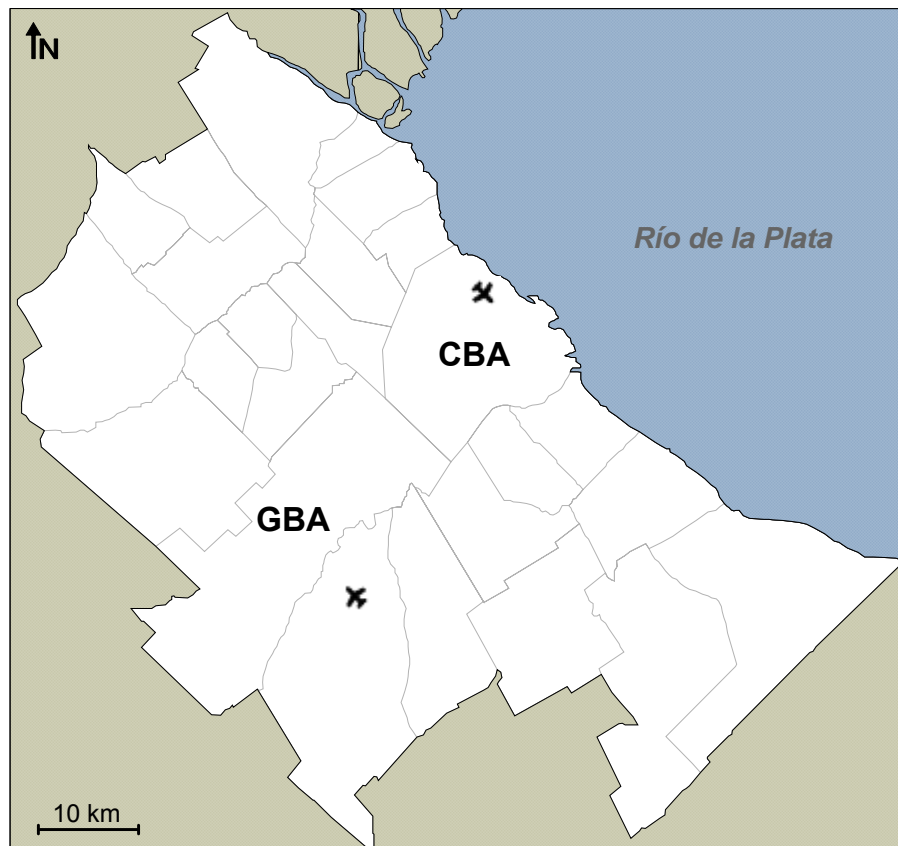
3. Ejemplos: estudios en el AMBA

Algunos de nuestros trabajos:

- Inventario de emisiones de CO, NO_x y COV desde fuentes areales en el AMBA
- Modelo para fuentes urbanas (DAUMOD)
- Estudio de diferentes aspectos de la CA (ej., distribuciones espaciales de CO, NO₂, O₃)

INVENTARIO DE EMISIONES

Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA)



Superficie: 3.830 km², Población: 12.801.364 hab.

Fuentes areales

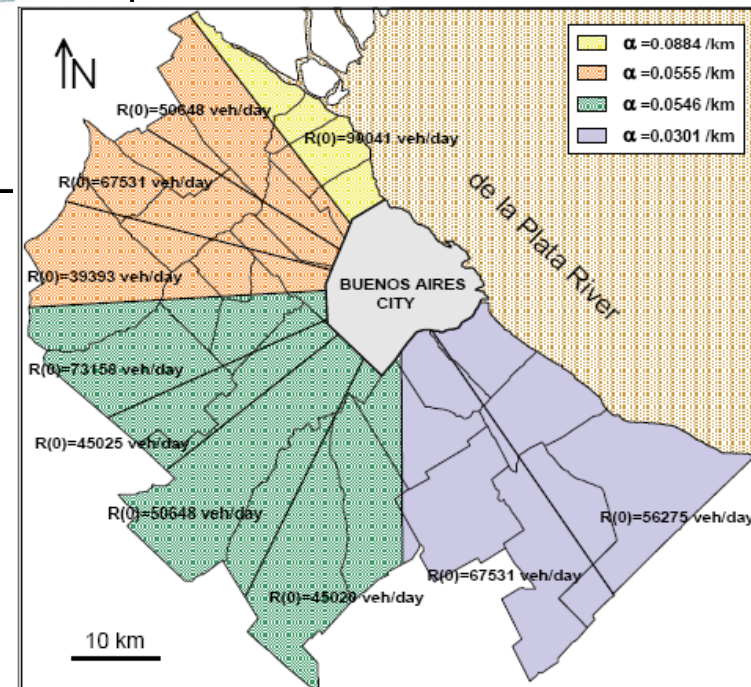
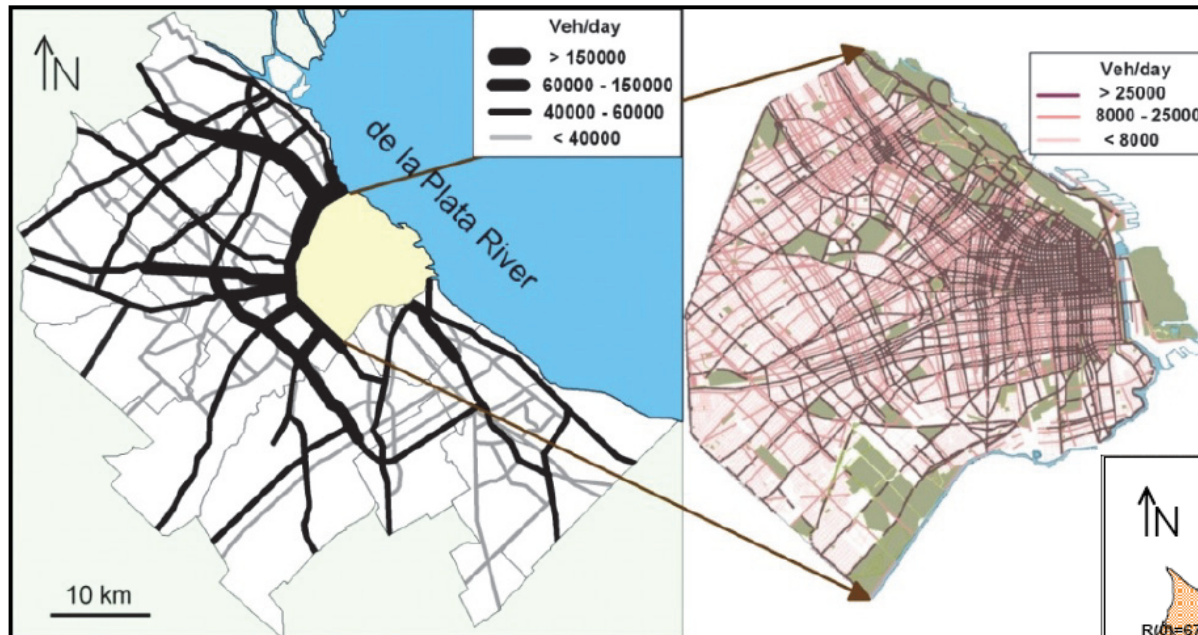
- ✓ Transporte vehicular
- ✓ Consumo de gas en:
 - Residencias
 - Comercios
 - Industrias pequeñas
- ✓ Movimiento de aviones

Emisión de cada fuente:

$$Q = A \times FE$$

Fuente	A	FE	Escala
Actividades residenciales	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Consumo de gas en residencias (ENARGAS) ➤ Distribución de población (INDEC) ➤ Mapa de uso de suelo (FADU) 	(USEPA, 1995)	Municipio
Movimiento de aviones	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Frecuencias de aviones que despegan y aterrizan (ciclo LTO) ➤ Composición flota 	(Romano et al., 1999, EMEP/CORINAIR, 2001)	Local
Transporte vehicular	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Flujo vehicular (Secretaría de Transporte de la Nación) ➤ KM recorridos ➤ Composición flota ➤ Combustible ➤ Antigüedad ➤ Velocidad 	(EEA, 2001, Rideout et al., 2005)	1 km x 1 km

FLUJO VEHICULAR EN EL AMBA

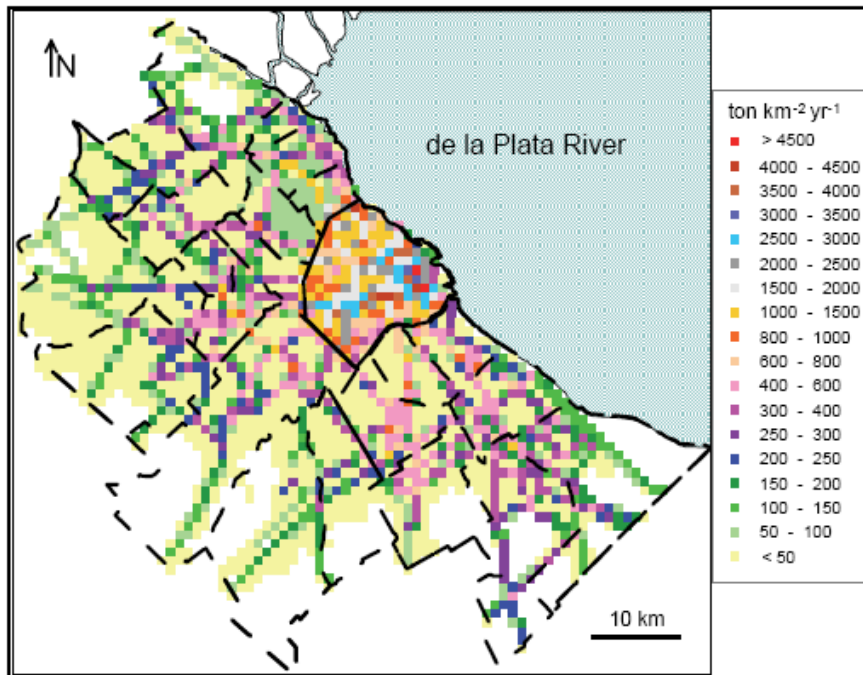


Etapas en el desarrollo:

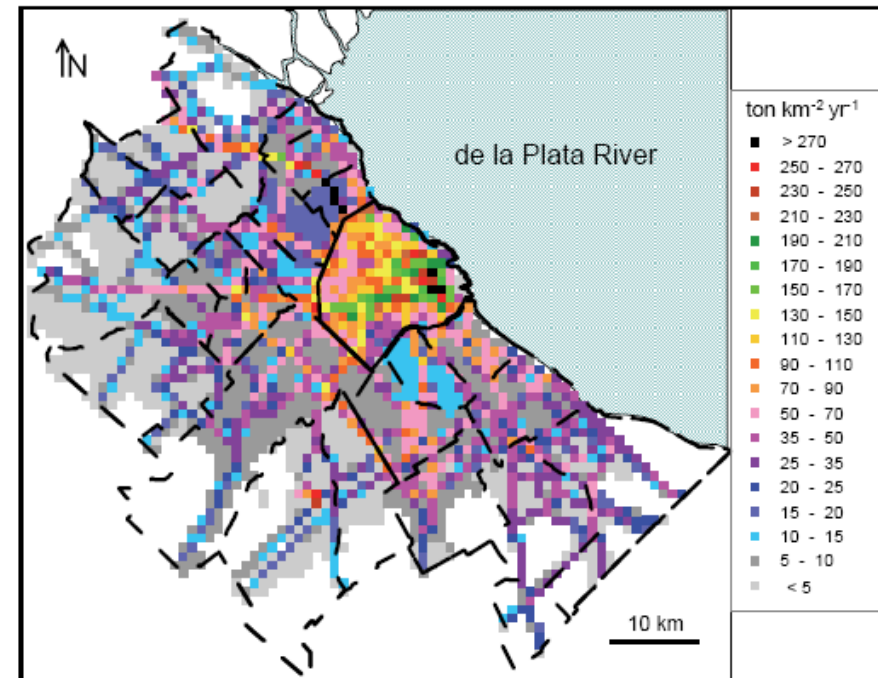
- Mazzeo y Venegas (2003): CBA
- Pineda Rojas et al. (2007): GBA
- Venegas et al. (2011): AMBA

EMISIONES DE LAS FUENTES AREALES EN EL AMBA

CO

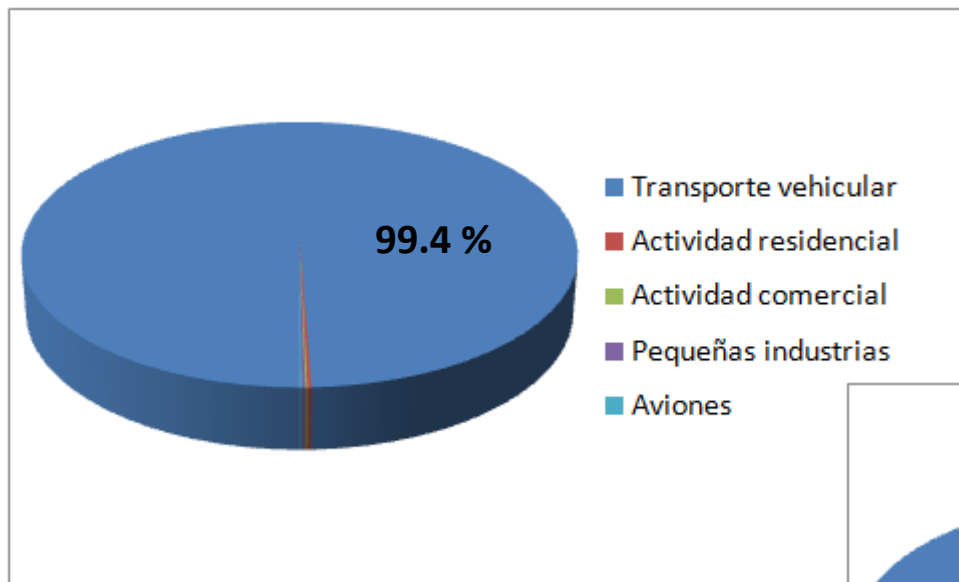


NO_x

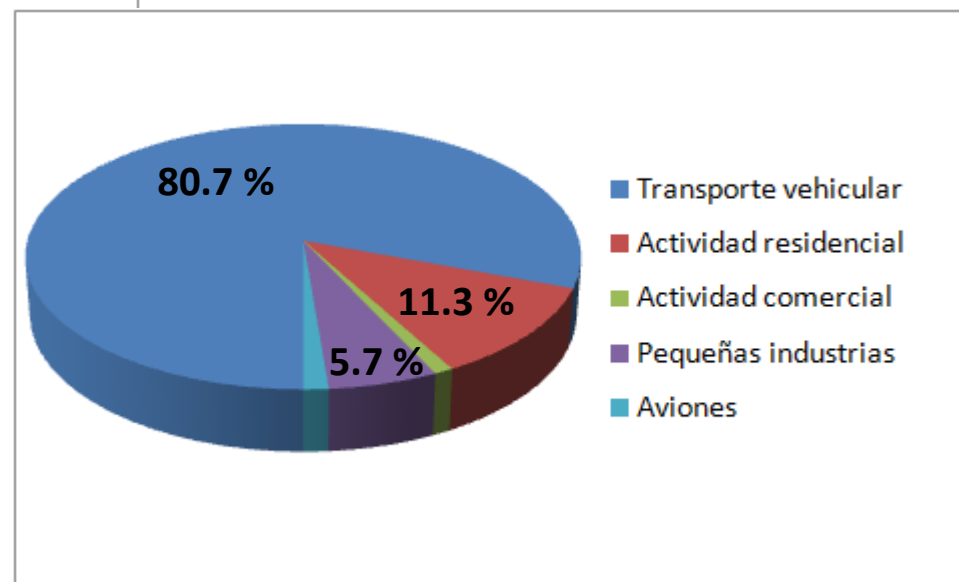


Resolución espacial: 1 km x 1 km
Variación horaria típica

EMISIONES DE LAS FUENTES AREALES EN EL AMBA DISTRIBUIDAS POR CATEGORÍA



619.300 ton-CO/año



66.800 ton-NO_x/año

MODELO DAUMOD

- Desarrollado para emisiones desde **fuentes areales (Q_i)**

- Estado estacionario
- Eje x en la dirección del **viento medio (u)**
- No hay transporte de masa a través del límite superior de la pluma
- Contaminante no reacciona



$$C(x, z=0) = a \left[Q_0 x^b + \sum_{i=1}^N (Q_i - Q_{i-1}) (x - x_i)^b \right] / (|A_1| k z_0^b u_*)$$

N : número de fuentes viento arriba del receptor

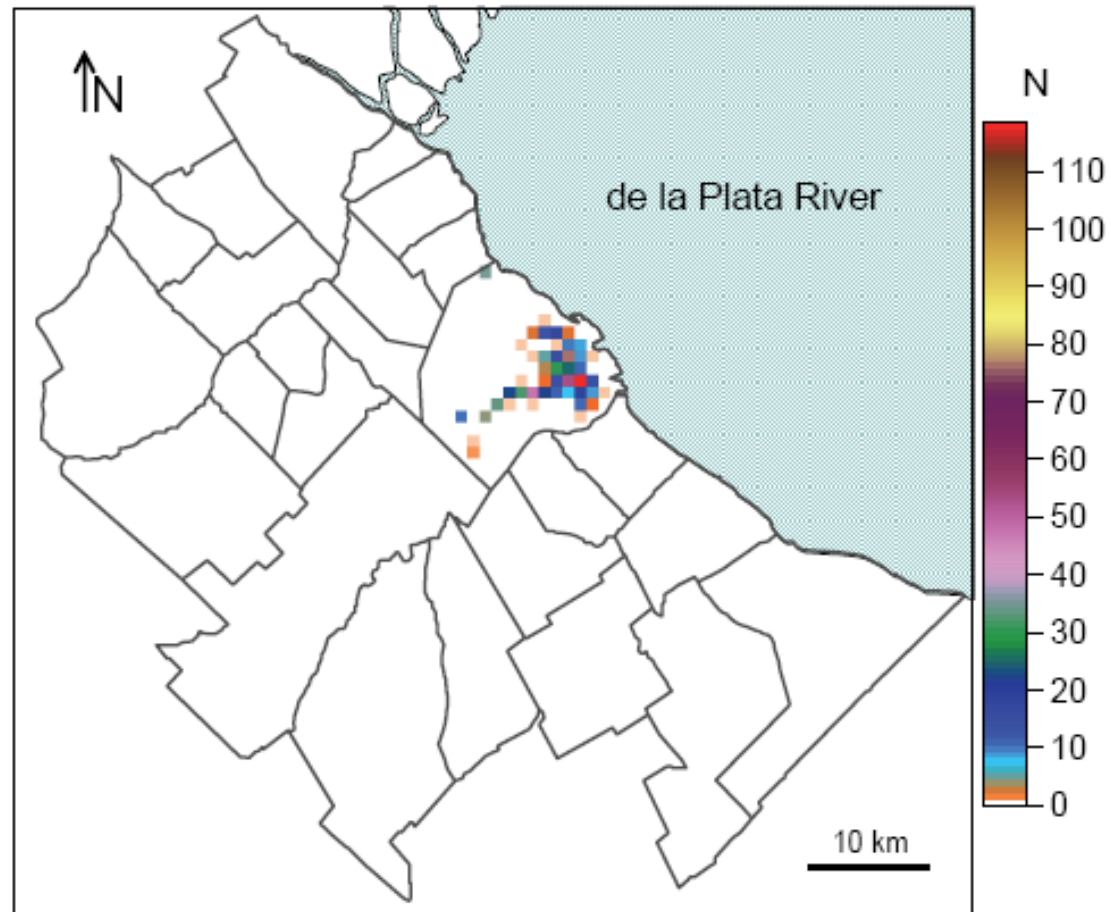
a, b, A_1 : coeficientes empíricos

z_0 : longitud de rugosidad de la superficie

u^* : velocidad de fricción

(Mazzeo y Venegas, 1991)

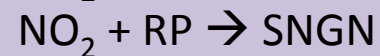
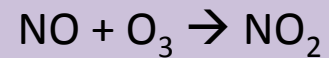
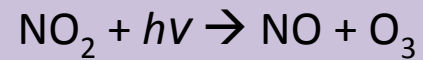
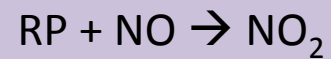
Número medio anual de valores de $C_{8h}(\text{CO}) > 9 \text{ ppm}$



(Venegas et al., 2011)

MODELO DAUMOD-GRS**GRS: Generic Reaction Set**

(Azzi et al., 1992)

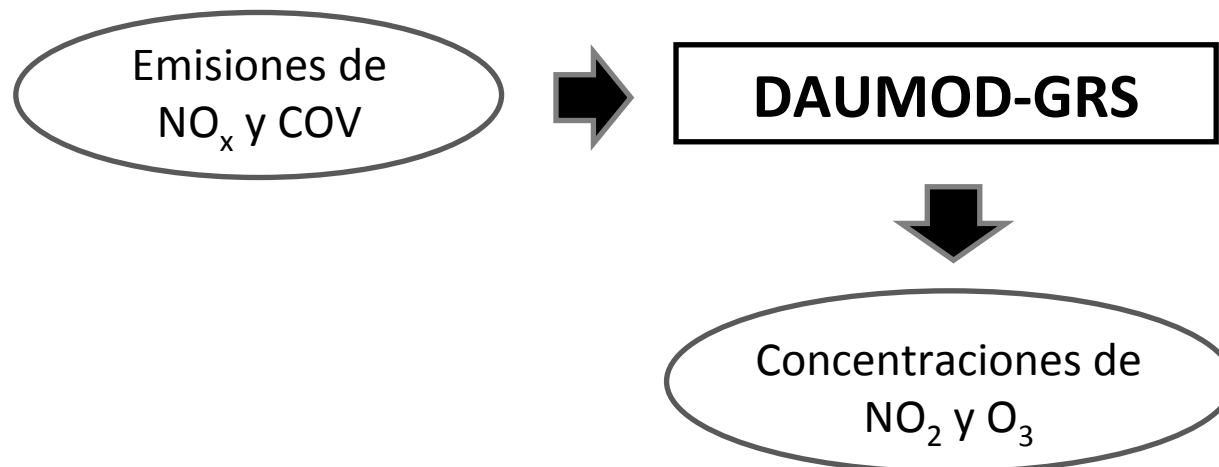
Interacciones entre NO_x -COV- O_3 

ROC: todas las especies de COV

RP: radicales

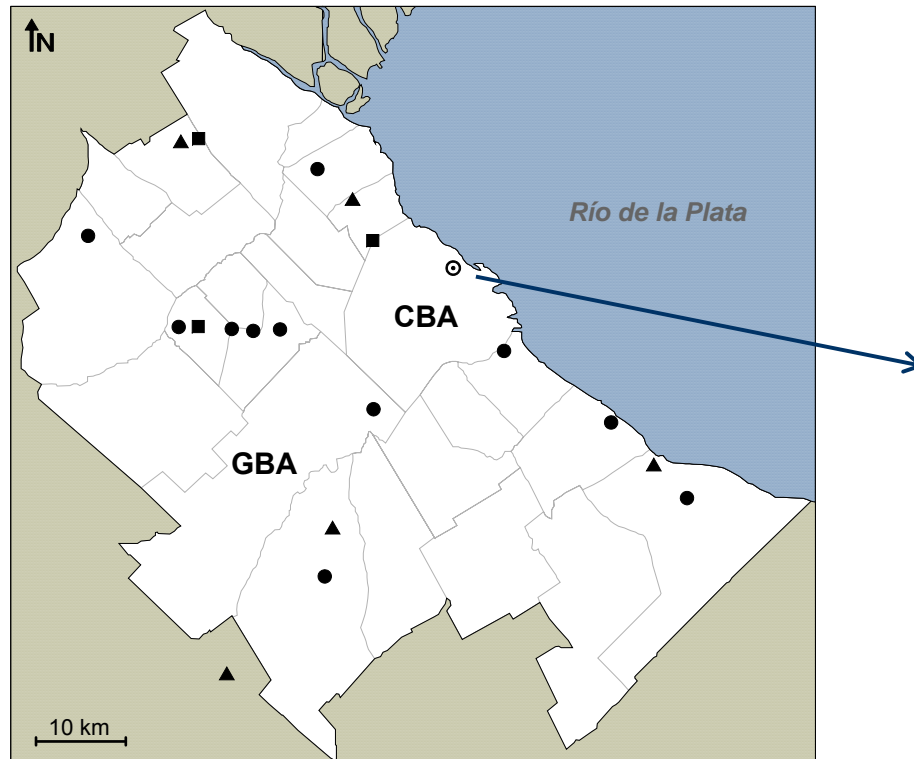
SGN: nitrógeno gaseoso estable

SNGN: nitrógeno no-gaseoso estable

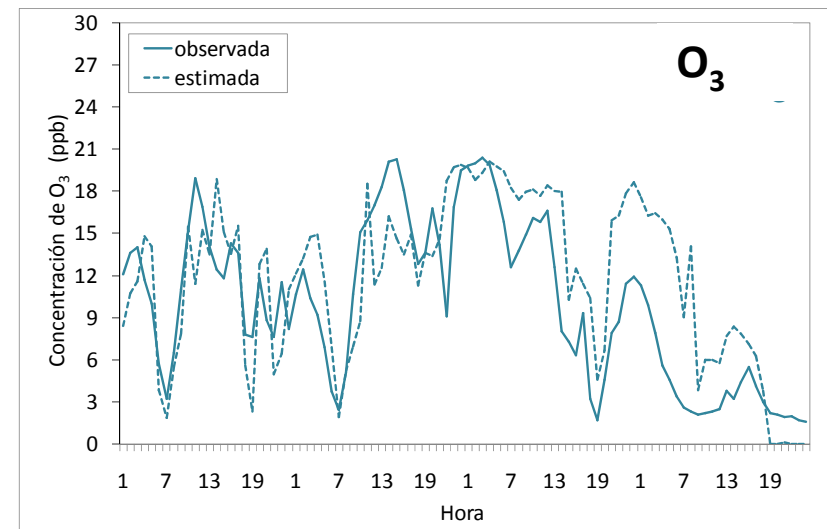
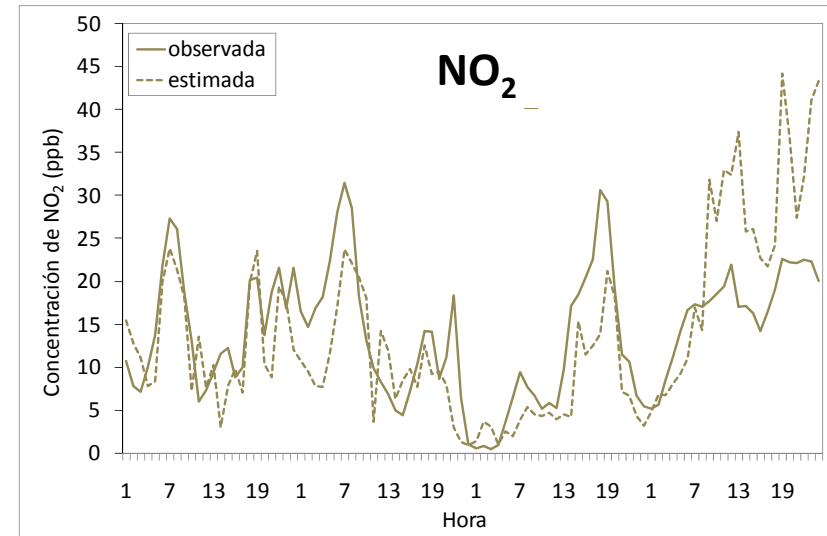


(Pineda Rojas y Venegas, 2013)

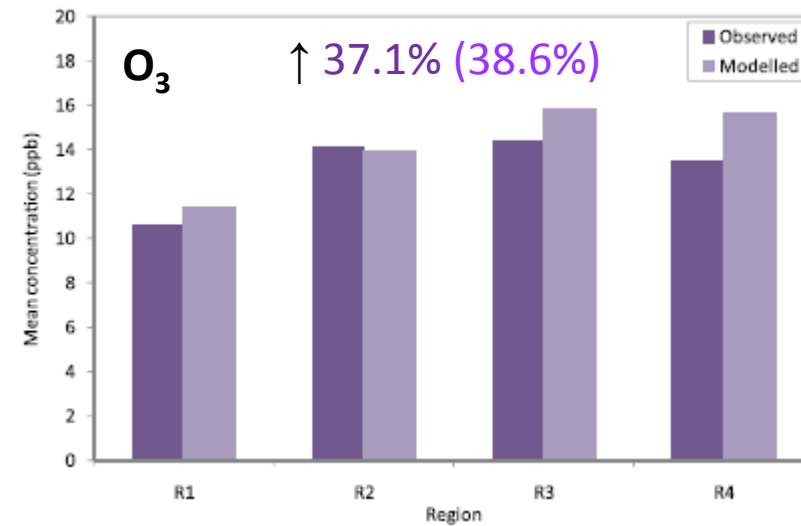
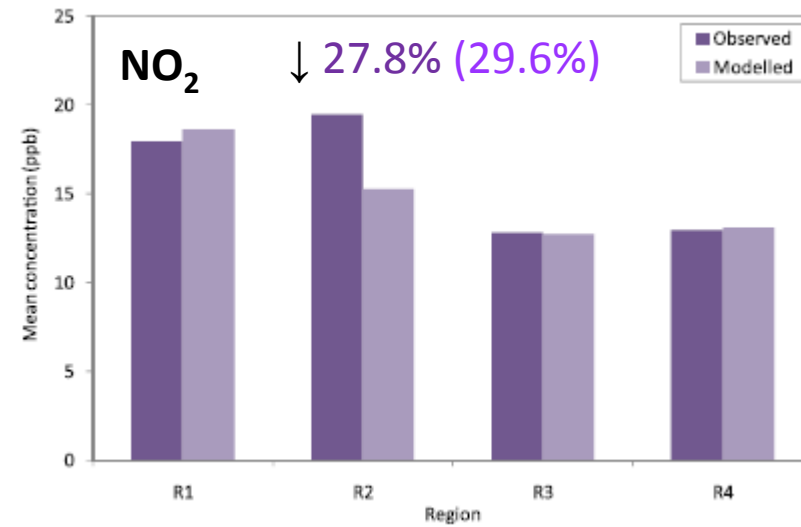
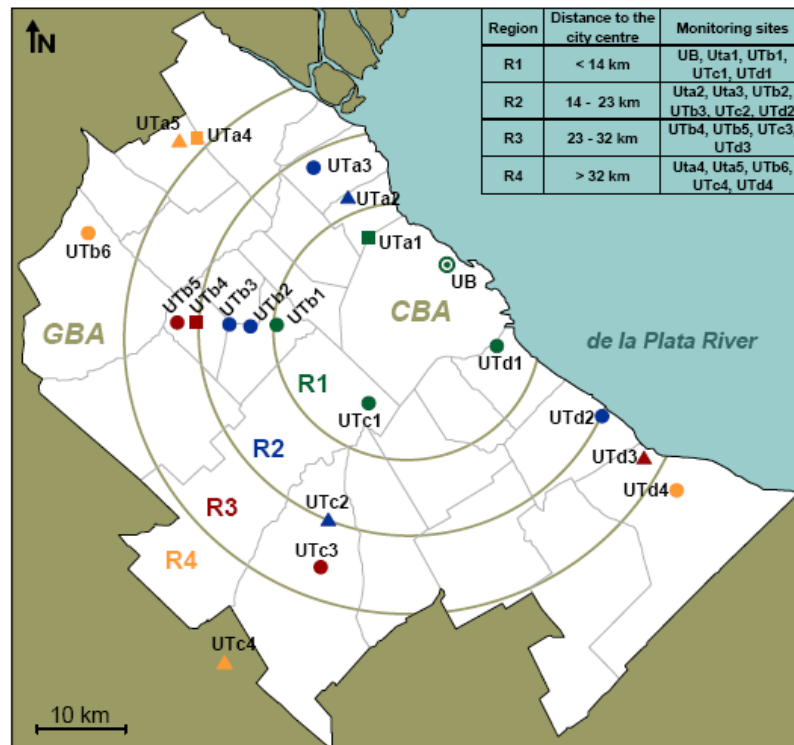
Desempeño del DAUMOD-GRS en el AMBA



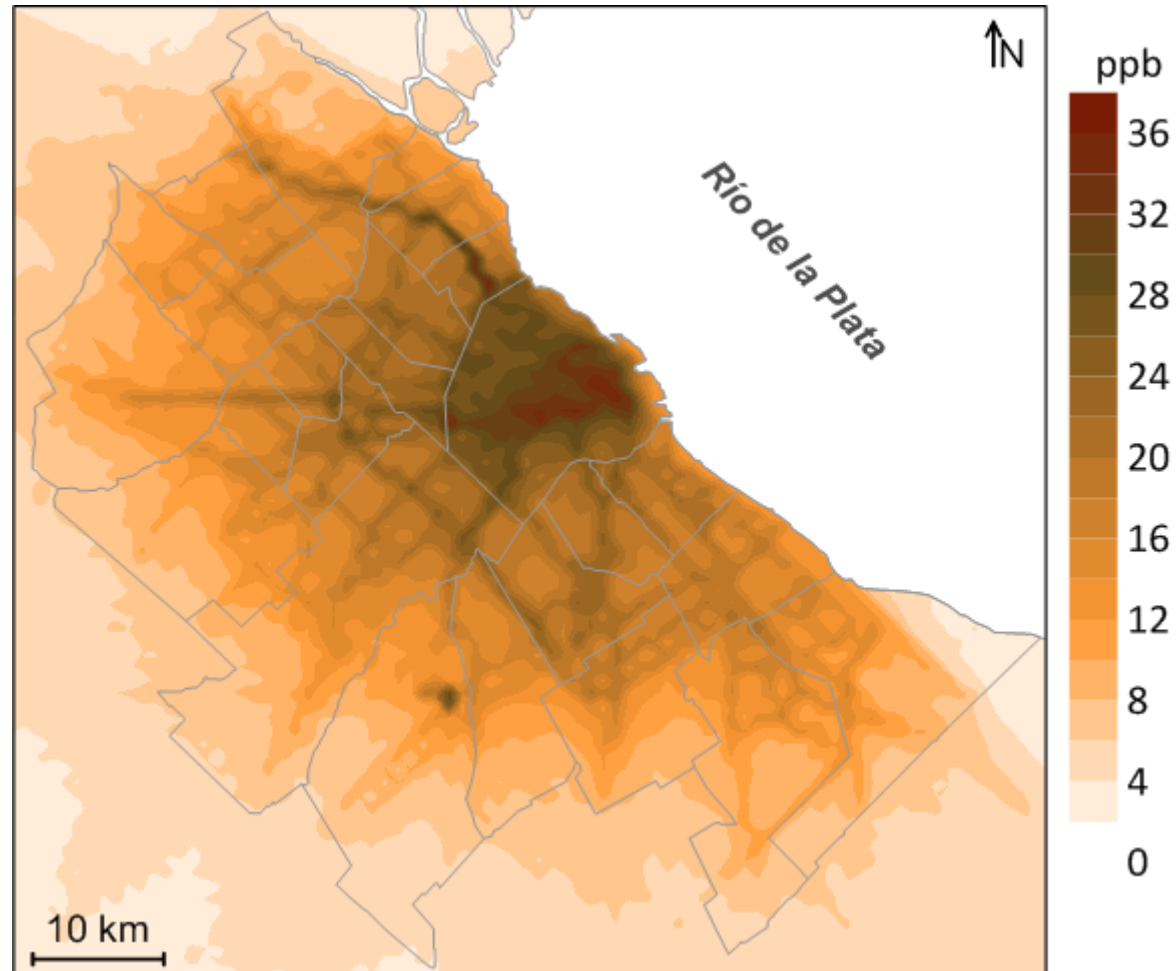
Sitios de medición de:
 NO₂ (■), O₃ (▲) y ambas especies (●)



Gradientes urbano-suburbano de concentraciones

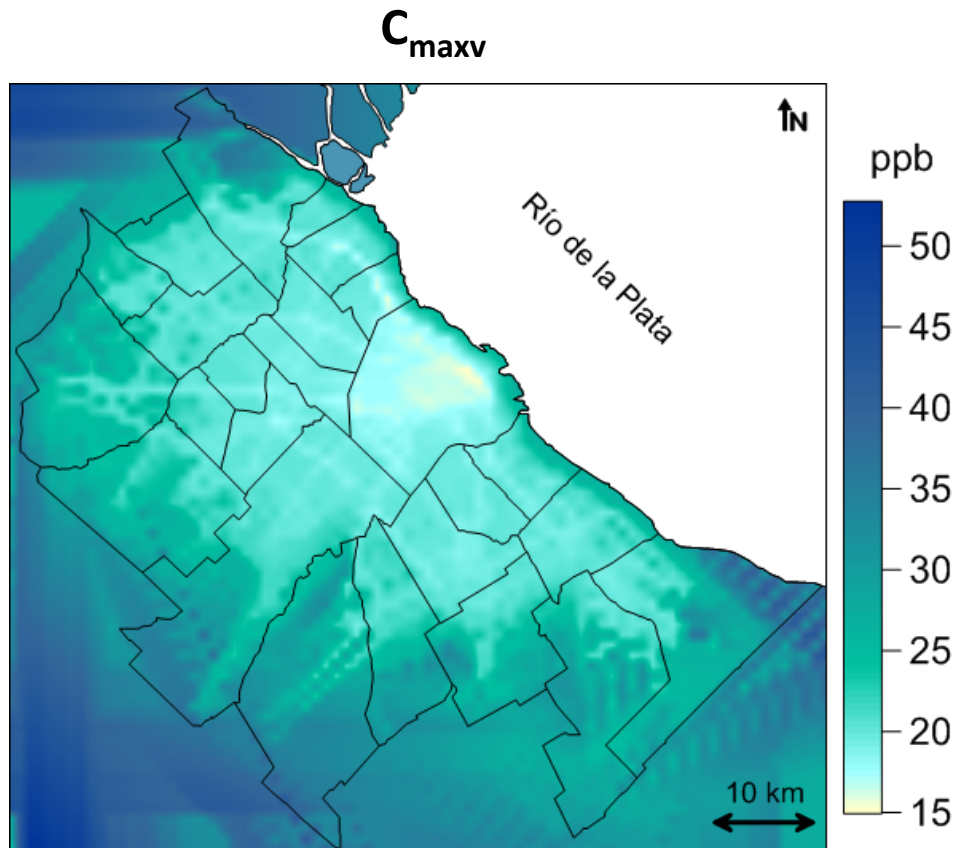


Concentración media anual de NO₂ en el AMBA



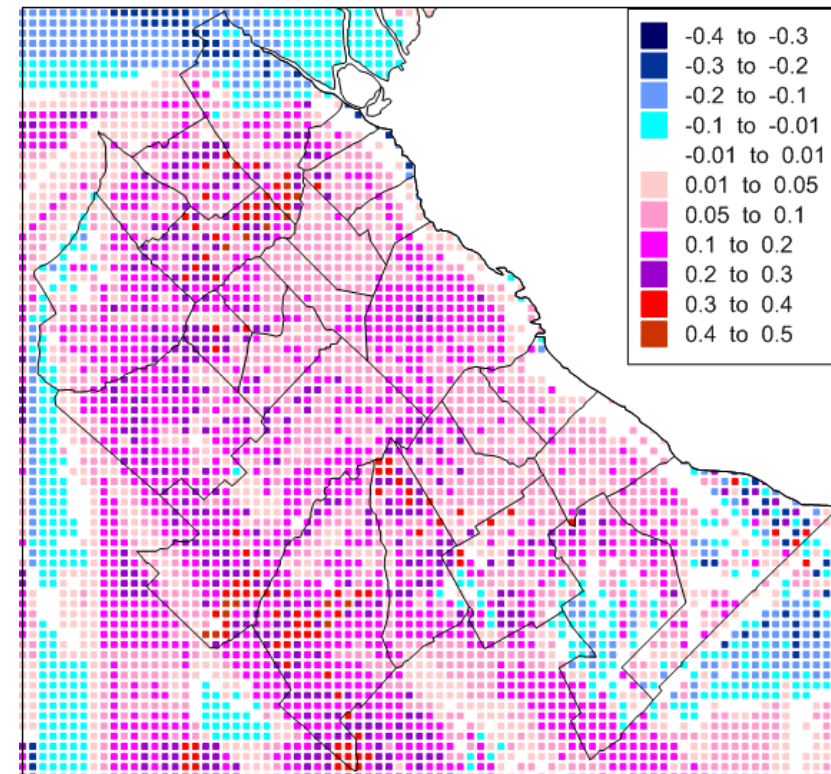
Estándar de calidad de aire = 53 ppb

Máxima concentración horaria de O₃ de verano (C_{maxv})

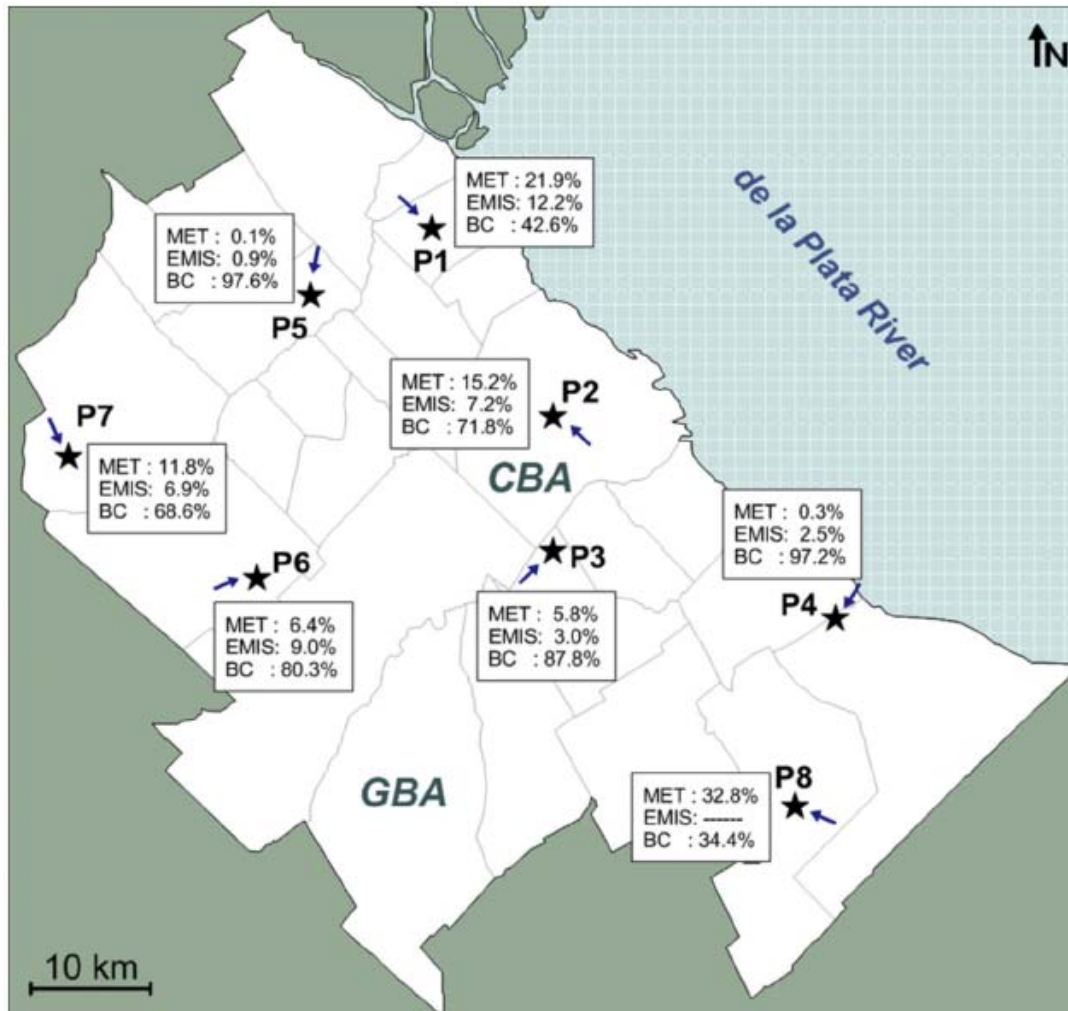


Estándar de calidad de aire = 120 ppb

Impacto de un escenario de reducción de emisiones: 40% de NO_x y 30% de COV



Sensibilidad de $C_{\max v}$ a errores en las variables de entrada



MET: variables meteorológicas

EMIS: emisiones de NO_x y COV

BC: conc. de O_3 de fondo regional

PERSPECTIVAS ...

- Mejorar las estimaciones de las concentraciones de O₃ de fondo regional
- Implementar un CTM en el AMBA
- Evaluar la posibilidad de incluir las emisiones de COV desde las áreas verdes del AMBA
- Actualizar el inventario de emisiones !!

Muchas gracias!!!

Referencias

- Benson, P.E., 1984. CALINE4—a dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways. Office of Transportation Laboratory, California Department of Transportation, Sacramento, USA.
- Berkowicz, R. 2000. A simple model for urban background pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 65, pp.259-267.
- Binkowski, F.S., Roselle, S.J. 2003. Models-3 Community multiscale air quality (CMAQ) model aerosol component, 1 Model description. *Journal of Geophysical Research* 108 (D6) 4183.
- Carruthers, D.J., Holroyd, R.J., Hunt, J.C.R., Weng, W.S., Robins, A.G., Ashley, D.D., Thompson, D.J. & Smith, F.B. 1994. UK-ADMS: a new approach to modeling dispersion in the earth's boundary layer. *Journal of Wind Engineering*, Vol. 52, 139-153.
- Cimorelli, A.J., Perry, S.G., Venkatram, A., Weil, J.C., Paine, R.J., Wilson, R.B., Lee, R.F., Peters, W.D., Brode, R.W. 2005. AERMOD: A Dispersion Model for Industrial Source Applications. Part I: General Model Formulation and Boundary Layer Characterization. *Journal of Applied Meteorology* 44, 682-693.
- EEA. 2001. Joint EMEP/CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook, Third Edition, Copenhagen.
- EEA. 2013. Cada vez que respiramos. Mejorar la calidad del aire en Europa. Agencia Europea de Medio Ambiente, pp 39.
- Gifford, F.A., Hanna, S.R. 1973. Modelling urban air pollution. *Atmospheric Environment*, Vol. 7, pp. 131-136.
- Grell, G.A., Peckham, S.E., Schmitz, R., McKeen, S.A., Frost, G., Skamarock, W.C., Eder, B. 2005. Fully coupled “online” chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment* 39, 6957–6975.
- Kiesewetter, G., Schoepp, W., Heyes, C., Amann, M. 2015. Modelling PM2.5 impact indicators in Europe: Health effects and legal compliance. *Environmental Modelling & Software* 74, 201-211.
- Romano, D., Gaudioso, D., De Lauretis, R. 1999. Aircraft emissions: a comparison of methodologies based on different data availability. *Environmental Monitoring & Assessment*, Vol. 56, pp. 51-74.
- Rideout, G., Gourley, D., Walker, J. 2005. Measurement of in-service vehicle emissions in Sao Paulo, Santiago and Buenos Aires. ARPEL Environmental Report #25. Ottawa. ESAA. Canada.
- Mazzeo, N.A., Venegas, L.E. 2003. Carbon monoxide and nitrogen oxides emission inventory for Buenos Aires City (Argentina). Proceedings of the 4th International Conference on Urban Air Quality – Measurement, Modelling and Management, Prague, Czech Republic, March 2003., 159-162.
- Mazzeo, N.A., Venegas, L.E. 1991. Air pollution model for an urban area. *Atmospheric Research* 26, 165-179.

Menuet, L., Bessagnet, B., Khvorostyanov, D., Beekmann, M., Blond, N., Colette, A., Coll, I., Curci, G., Foret, G., Hodzic, A., Mailler, S., Meleux, F., Monge, J.L., Pison, I., Siour, G., Turquety, S., Valari, M., Vautard, R., Vivanco, M.G. 2013, CHIMERE 2013: a model for regional atmospheric composition modelling, *Geoscientific Model Development*, 6, 981-1028.

Murena, F., Mele, B. 2016. Effect of balconies on air quality in deep street canyons. *Atmospheric Pollution Research*, in press.

Pineda Rojas, A.L. 2014. Simple atmospheric dispersion model to estimate hourly ground-level nitrogen dioxide and ozone concentrations at urban scale. *Environmental Modelling and Software*, 59, 127-134.

Pineda Rojas, A.L., Venegas, L.E. 2013. Spatial distribution of ground-level urban background O₃ concentrations in the Metropolitan Area of Buenos Aires, Argentina. *Environmental Pollution*, 159-165.

Pineda Rojas, A.L., Venegas, L.E. 2013. Upgrade of the DAUMOD atmospheric dispersion model to estimate urban background NO₂ concentrations. *Atmospheric Research*, 147-154.

Pineda Rojas, A.L., Venegas, L.E., Mazzeo, N.A. 2007. Emission inventory of carbon monoxide and nitrogen oxides for area sources at Buenos Aires Metropolitan Area (Argentina). 6th International Conference on Urban Air Quality, Emission measurements and modelling sessions, Cyprus, CDRUM, 35-38.

Pineda Rojas, A.L., Venegas, L.E., Mazzeo, N.A. 2016. Uncertainty of modelled urban peak O₃ concentrations and its sensitivity to input data perturbations based on the Monte Carlo analysis. *Atmospheric Environment*, 141,422-429.

Scire, J. S., Strimaitis, D. G. & Yamartino, R. J. 2000. A user's guide for the CALPUFF dispersion model. Earth Tech Inc., Concord, MA, pp. 521.

USEPA. 1995. User's guide for the Industrial Source Complex (ISC3) dispersion models, Volume I - User instructions. EPA-454/B-95-003a, pp. 390.

Venegas, L.E., Mazzeo, N.A., Dezzutti, M.C., 2014. A simple model for calculating air pollution within street canyons. *Atmos. Environ.* 87, 77-86.

Venegas, L.E., Mazzeo, N.A., Pineda Rojas, A.L. 2011. Chapter 14: Evaluation of an emission inventory and air pollution in the Metropolitan Area of Buenos Aires. En: D. Popovic (ed.) *Air Quality-Models and applications*, Editorial In-Tech, 261-288.

Vos, P.E.J., Maiheu, B., Vankerkom, J., Janssen, S. 2013. Improving local air quality in cities: To tree or not to tree? *Environmental Pollution* 183, 113-122.

Yassin, M.F. 2011. Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons. *Atmospheric Environment* 45, 5220-5229.