

MÓDULO CALIDAD DE AIRE

GESTIÓN DE LA CALIDAD AMBIENTAL



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

CLASES N°3 Y N°4

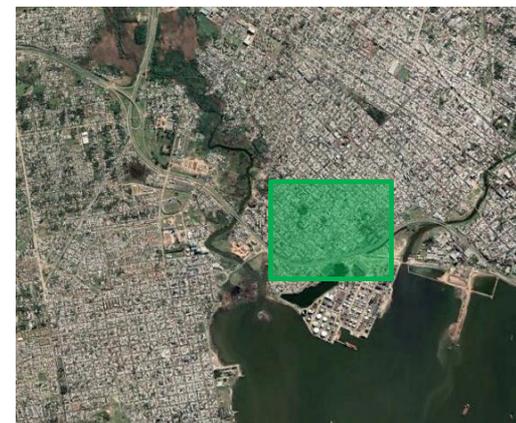
- Fuentes de emisión.
- Estimación de emisiones: factores de emisión y balance de masa.
- Inventarios de emisiones.
- Visita.
- Inventarios de emisiones.
- Conceptos básicos sobre control de emisiones: sistemas de control para remoción de partículas y gases.
- Ejercicio.

FUENTES DE EMISIÓN

- **Emisión:** descarga de contaminantes a la atmósfera que se realiza desde una fuente determinada. Es el inicio de los episodios de contaminación atmosférica.
- **Emisor:** toda fuente capaz de emitir contaminantes a la atmósfera, pudiendo tener un origen natural o antropogénico.
- Clasificación de fuentes de emisión (variación temporal de su posición):
 - ❖ Fijas.
 - ❖ Móviles.
- Clasificación de fuentes de emisión (naturaleza):
 - ❖ Naturales.
 - ❖ Antropogénicas.

FUENTES DE EMISIÓN

- Clasificación de fuentes de emisión (representación a la escala de trabajo):
 - ❖ Puntuales (único punto de emisión).
 - ❖ Lineales (trazado continuo en una dimensión).
 - ❖ Superficiales (bidimensionales).

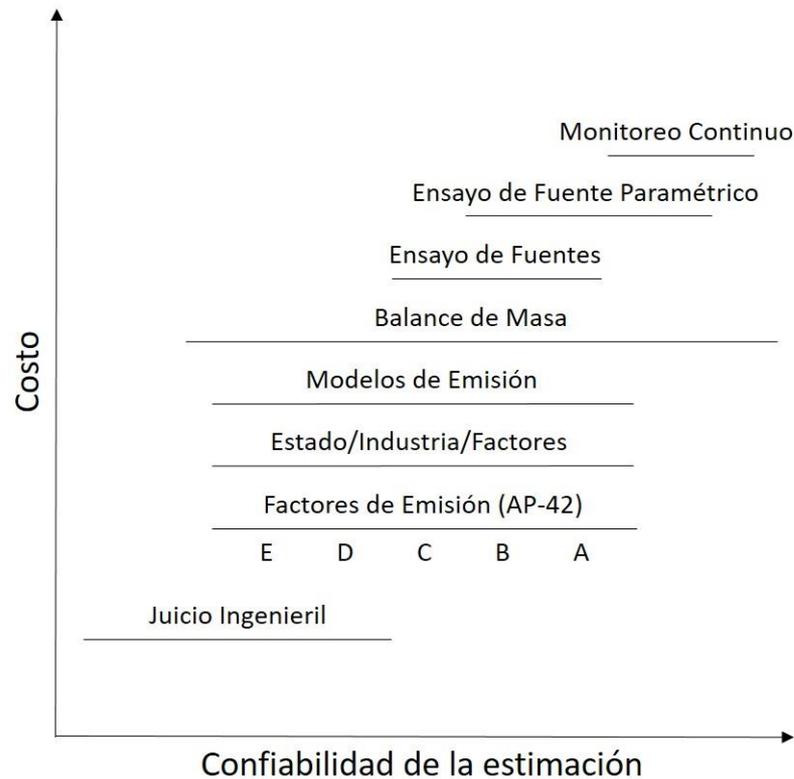


FUENTES DE EMISIÓN

- Fuentes de emisión naturales:
 - ❖ Se producen como consecuencia de erupciones volcánicas, incendios forestales, entre otros eventos.
 - ❖ En general se producen en zonas poco habitadas (menor interés en establecer regulaciones).

ESTIMACIÓN DE EMISIONES: FACTORES DE EMISIÓN Y BALANCE DE MASA

- Métodos de estimación de emisiones:



ESTIMACIÓN DE EMISIONES: FACTORES DE EMISIÓN Y BALANCE DE MASA

- Métodos de estimación de emisiones:
 - ❖ *Monitoreo continuo*: consiste en realizar una medición continua de las concentraciones de contaminantes emitidas.
 - ❖ *Ensayo de fuentes*: consiste en la medición de la concentración de contaminantes, en períodos de tiempo cortos, en muestras extraídas de la chimenea (las condiciones de muestreo deben representar a las condiciones de operación).
 - ❖ *Balance de masa*: consiste en estimar la masa de contaminante emitido a través del análisis de un volumen de control (utilizado en general para emisiones de evaporación).
 - ❖ *Factores de emisión*: se basa en aplicar un cierto factor que vincula las emisiones atmosféricas de forma proporcional con algún dato de actividad.

ESTIMACIÓN DE EMISIONES: FACTORES DE EMISIÓN Y BALANCE DE MASA

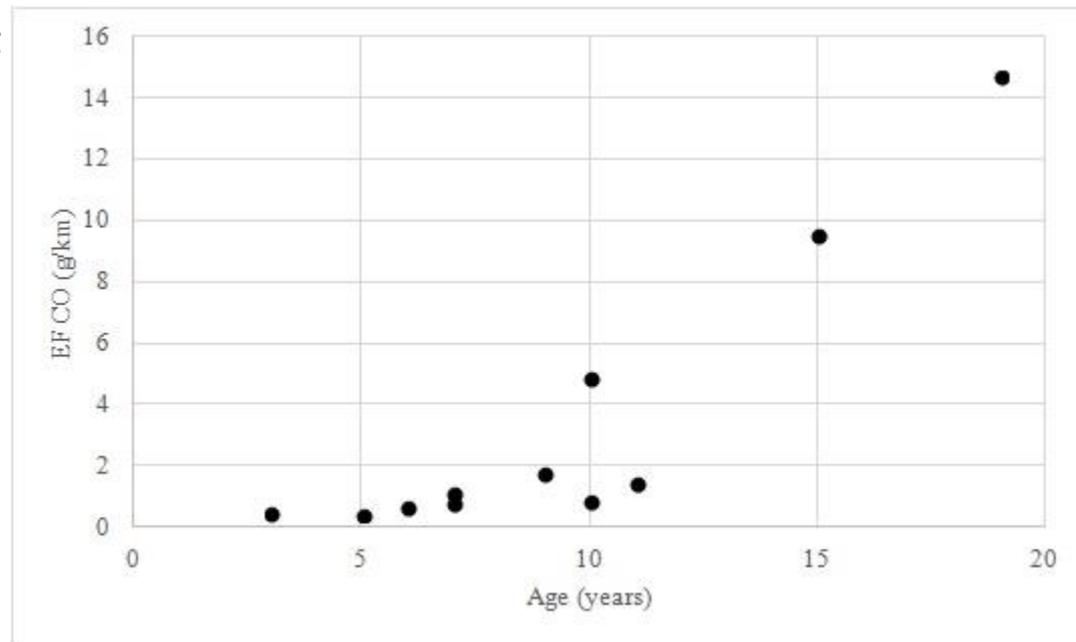
- Método de Factores de Emisión:
 - ❖ Se aplica para obtener promedios de emisiones en largos períodos.
 - ❖ Se aplica preferentemente sobre un conjunto de fuentes.
 - ❖ Ecuación básica:

$$E = A * FE * \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

- Donde:
 - E: emisión de un cierto contaminante (por ejemplo en kg/año).
 - A: actividad (por ejemplo consumo de combustible en m³/año).
 - **FE: factor de emisión (por ejemplo en kg emitidos de cierto contaminante por m³ de combustible consumido).**
 - ER: eficiencia de remoción de cierto contaminante antes de la emisión (%).

ESTIMACIÓN DE EMISIONES: FACTORES DE EMISIÓN Y BALANCE DE MASA

- Método de Factores de Emisión:
- ❖ Fuentes de factores de emisión:
 - Unión Europea.
 - Estados Unidos.
 - Desarrollos propios.



Muestreo de emisiones vehiculares en movimiento en Montevideo y factores de emisión desarrollados para cada vehículo, analizados en función de su antigüedad.

M. D'Angelo, E. González, N. Rezzano, *First approach to exhaust emissions characterization of light vehicles in Montevideo, Uruguay. Science of the Total Environment, 618: 1071-1078., 2018.*

ESTIMACIÓN DE EMISIONES: FACTORES DE EMISIÓN Y BALANCE DE MASA

- Método de Balance de Masa:
- ❖ El balance de masa de un proceso u operación unitaria considera el volumen y la composición química de las materias primas de entrada (MP) y de los materiales de consumo indirecto (CI), así como de los productos de salida (P) y las emisiones vertidas al aire (E_a), agua (E_{aq}) y suelo (E_s).

$$MP + CI = P + E_a + E_{aq} + E_s$$

INVENTARIOS DE EMISIONES

- Definición: estimación de las emisiones de todos los contaminantes de interés emitidos a la atmósfera por las diversas actividades humanas y por fuentes de origen natural, para un período y área geográfica determinada (adaptado de PNUMA, 2000).

- Objetivos:
 - ❖ Establecer una línea de base cuantitativa de emisiones atmosféricas con cierta escala espacial y temporal:
 - Identificación de áreas geográficas críticas.
 - Identificación de sectores y actividades con mayor generación de emisiones.
 - ❖ Diseño y evaluación de políticas públicas de gestión de la calidad de aire.
 - ❖ Informar a la población sobre los niveles de emisiones atmosféricas.
 - ❖ Evaluar tendencias de emisiones atmosféricas.
 - ❖ Simular escenarios futuros de emisiones atmosféricas (por ejemplo con respecto a la instalación de nuevos emprendimientos).
 - ❖ Suministrar datos de emisiones a ser utilizados en modelos de dispersión atmosférica.
 - ❖ Diseñar sistemas de control de emisiones.

- Metodología de cálculo: método de factores de emisión.

INVENTARIOS DE EMISIONES

- Fuentes de error:
 - ❖ Incertidumbre en los datos de actividad.
 - ❖ Omisión de fuentes emisoras relevantes.
 - ❖ Incertidumbre en la información demográfica y socio-económica utilizada para la distribución de los consumos y de las emisiones (por ejemplo distribución de consumos por población o por flota vehicular).
 - ❖ Incertidumbre en los factores de emisión considerados (aplicación de factores de emisión desarrollados en otros países).
 - ❖ Incertidumbre en el uso de dispositivos de control de emisiones.

INVENTARIOS DE EMISIONES

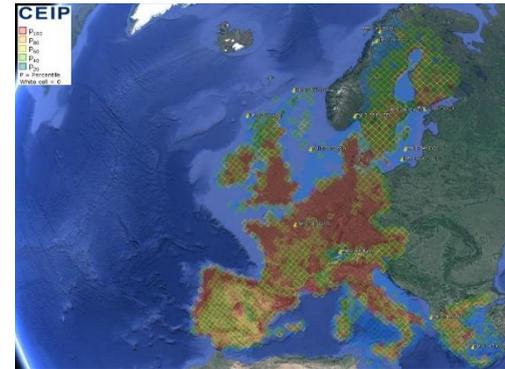
■ Antecedentes internacionales:

❖ Unión Europea:

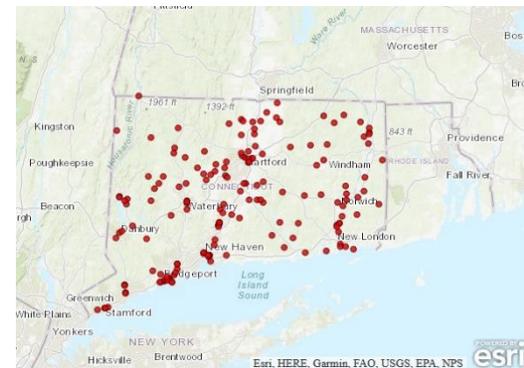
- Frecuencia anual.
- Resultados disponibles en línea.

❖ Estados Unidos:

- Frecuencia trienal (una vez cada tres años).
- Visualizador gráfico en línea para fuentes puntuales.



Emisiones de PM_{10} para el año 2015 correspondientes a los países europeos del Grupo EU-15. Fuente: EMEP/CEIP.



Fuentes emisoras puntuales de PM_{10} en el estado de Connecticut para 2014. Fuente: USEPA.

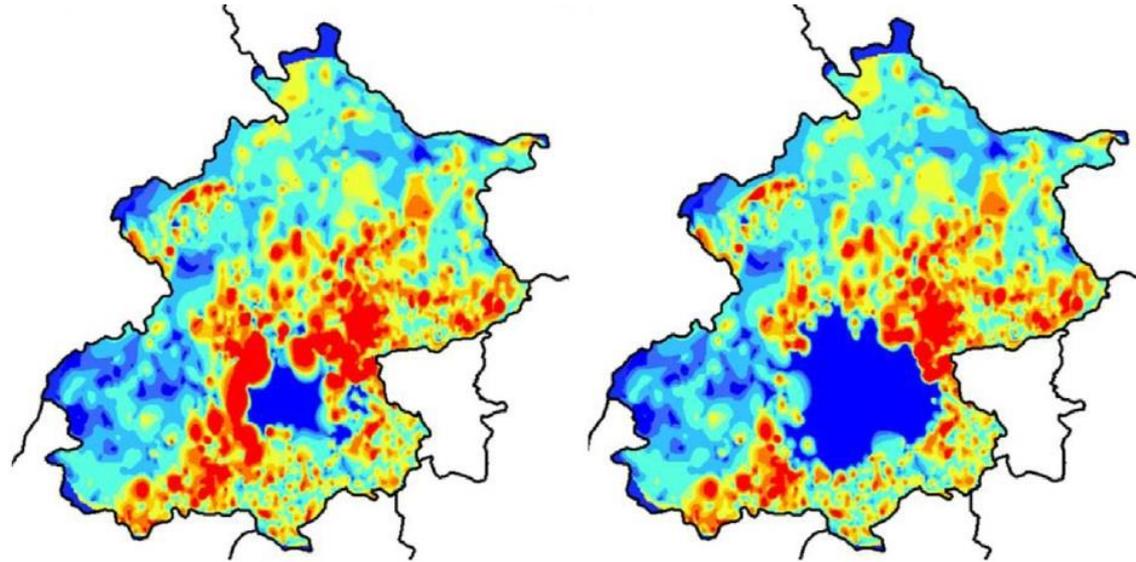
INVENTARIOS DE EMISIONES

■ Antecedentes internacionales:

❖ China:

■ Escenarios de reducción de emisiones:

- Ampliación del área de restricción de uso del carbón para combustión residencial en Beijing.
- Contaminante objetivo: $PM_{2.5}$.

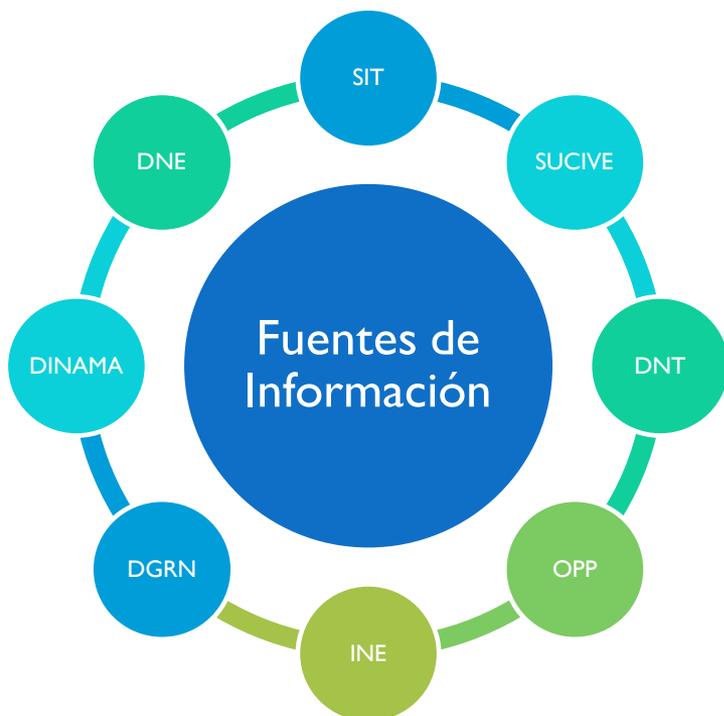


Emisiones residenciales de $PM_{2.5}$ en enero para distintos escenarios de uso de carbón. El escenario de la derecha es el más restrictivo.

S. Cai, Q. Li, S. Wang, J. Chen, D. Ding, B. Zhao, D. Yang, J. Hao, Pollutant emissions from residential combustion and reduction strategies estimated via a village-based emission inventory in Beijing. Environmental Pollution, 238: 230-237., 2018.

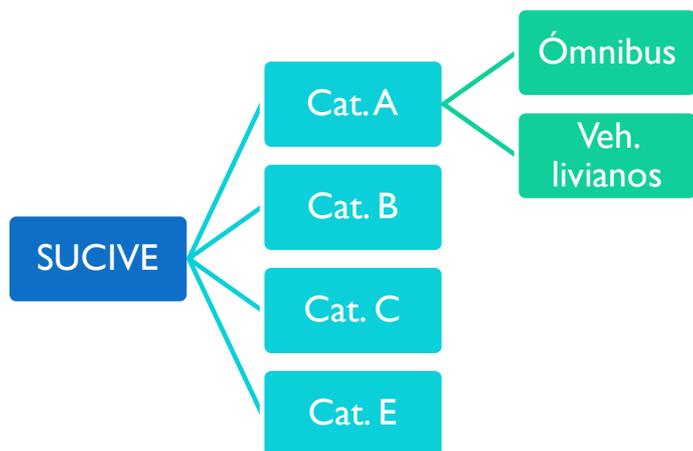
INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Fuentes de información:

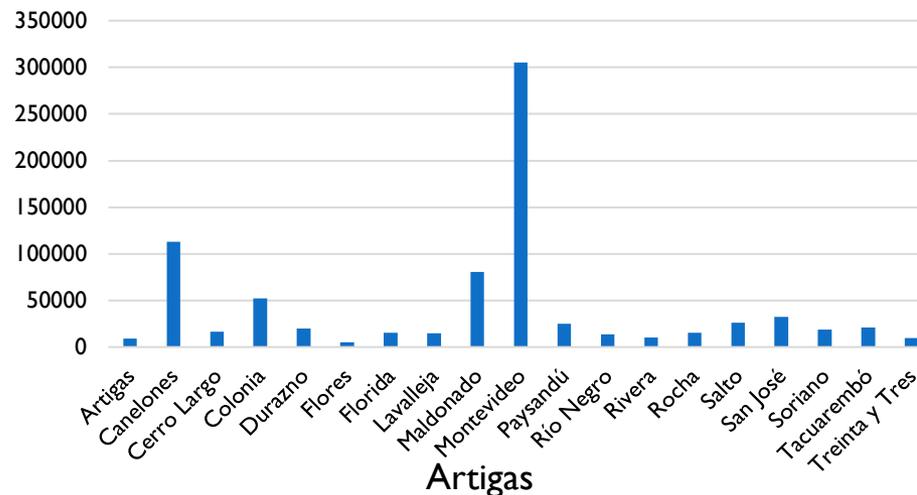


INVENTARIOS DE EMISIONES

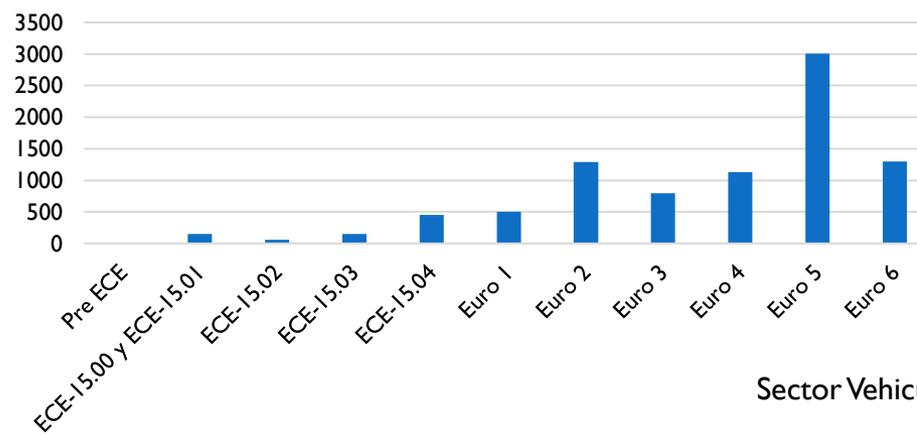
- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Fuentes de información:



Autos, camionetas, taxis y remises a gasolina



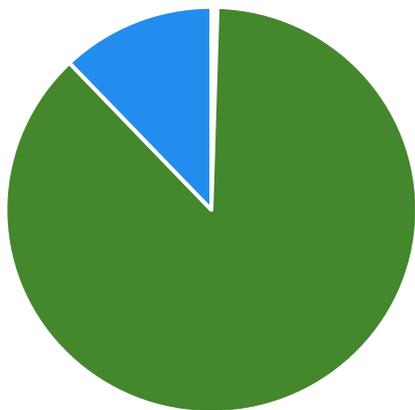
Autos, camionetas, taxis y remises a gasolina



INVENTARIOS DE EMISIONES

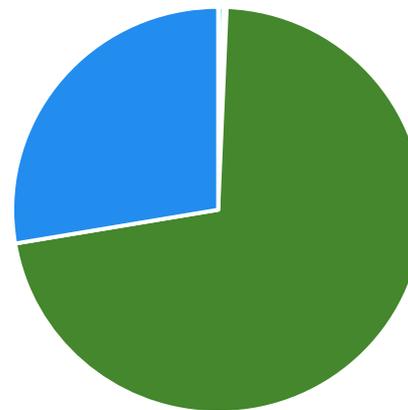
- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados:

PM₁₀ (%)



- Agropecuario
- Residencial
- Vehicular
- Rodadura
- Industrial
- Servicios y Comercios
- Erosión Eólica

PST Calculado (%)



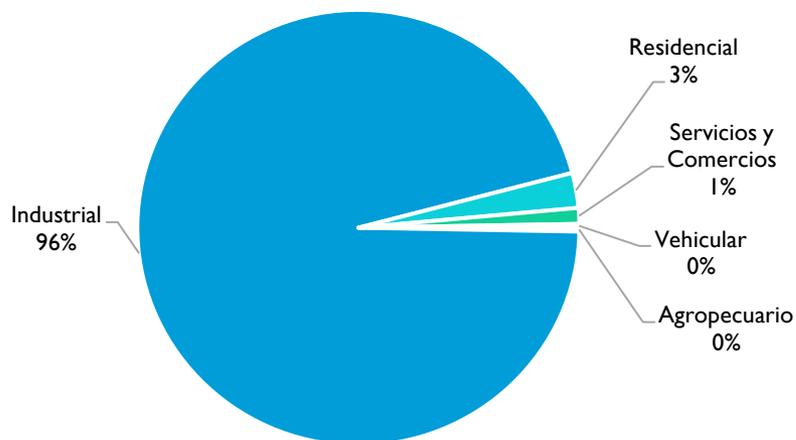
- Agropecuario
- Residencial
- Vehicular
- Rodadura
- Industrial
- Servicios y Comercios
- Erosión Eólica

Importancia de los sectores Erosión Eólica y Rodadura en las emisiones nacionales de partículas.

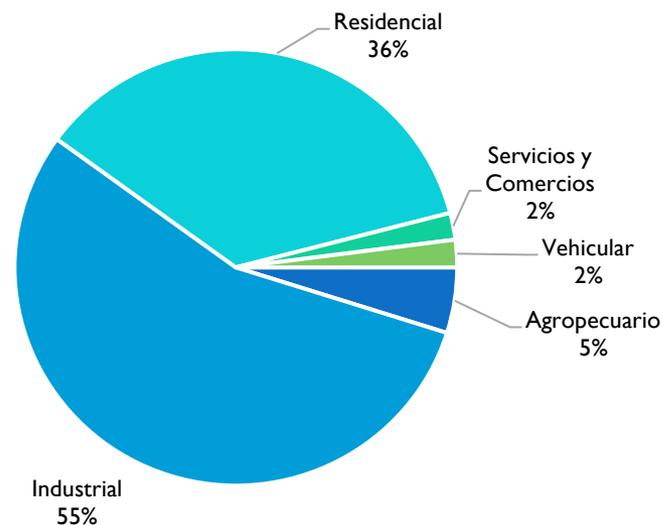
INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados sin Erosión Eólica y Rodadura:

Emisiones por sector
SO_x Calculado



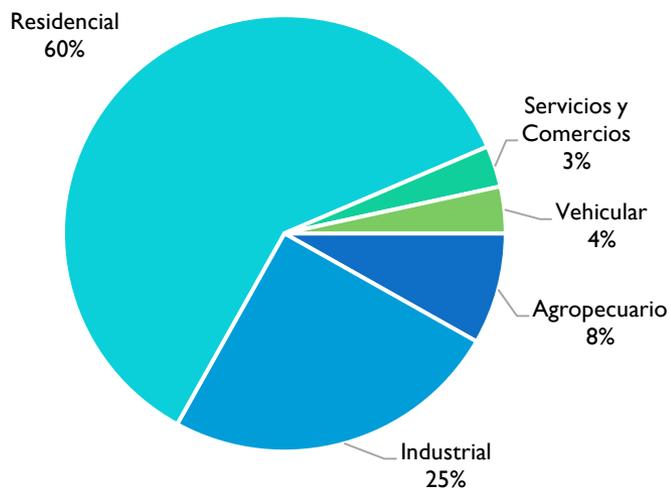
Emisiones por sector
PST Calculado



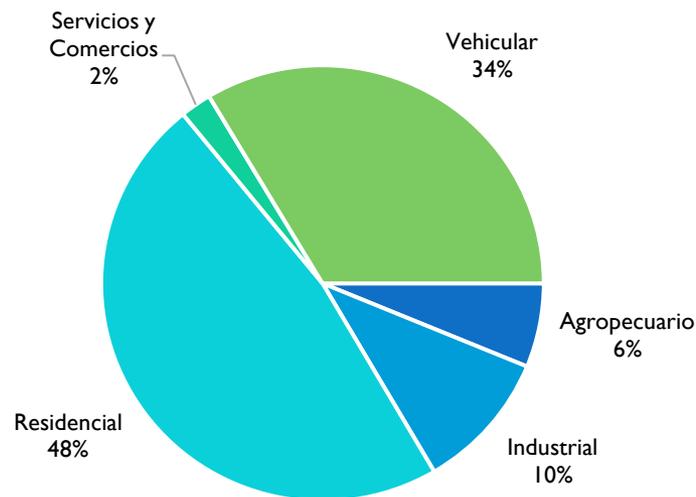
INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados sin Erosión Eólica y Rodadura:

Emisiones por sector
 PM_{10}



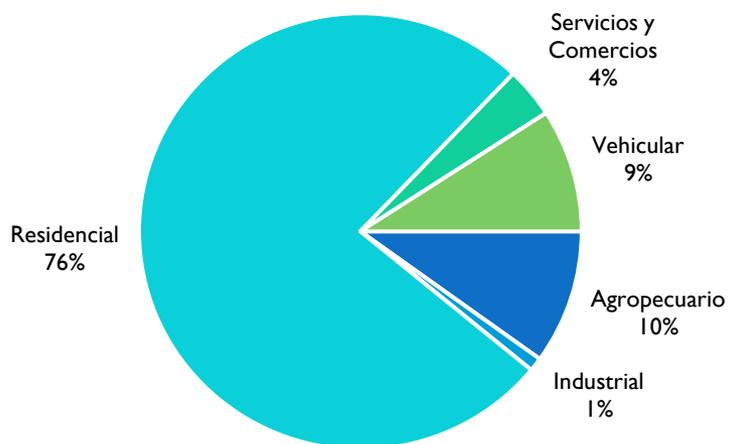
Emisiones por sector
CO



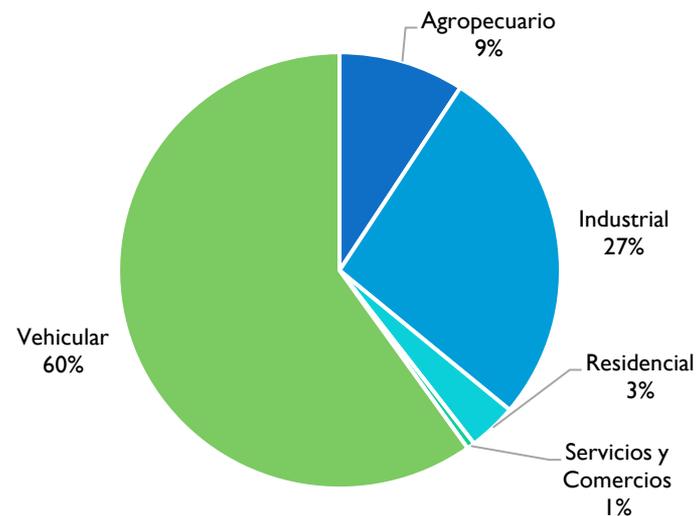
INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados sin Erosión Eólica y Rodadura:

Emisiones por sector
 COV_s



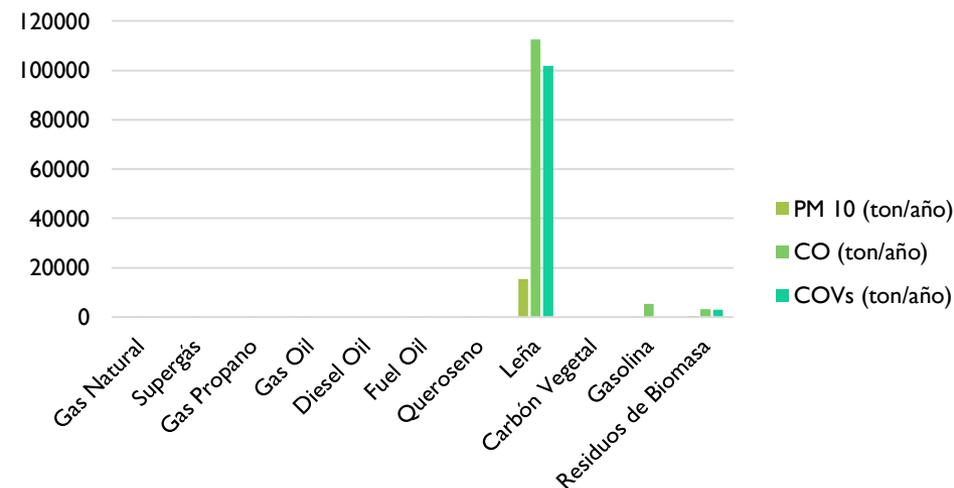
Emisiones por sector
 NO_x



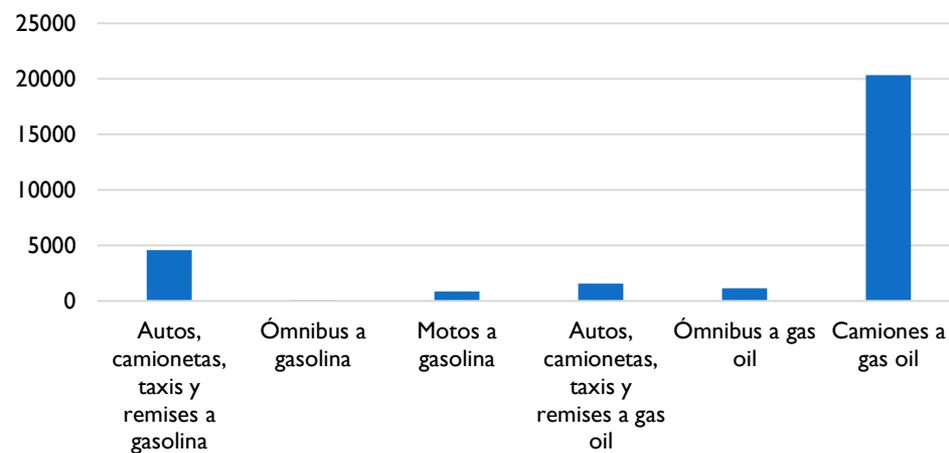
INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados sin Erosión Eólica y Rodadura:

Sector Residencial

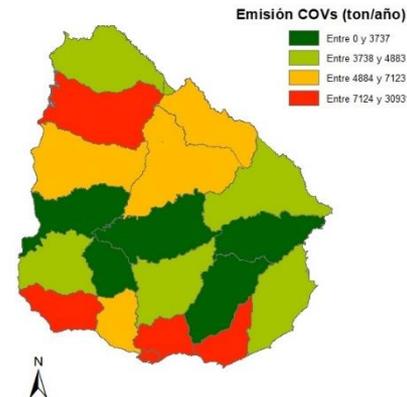
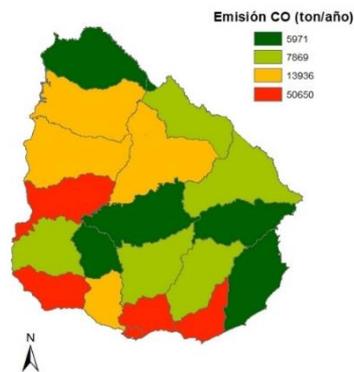
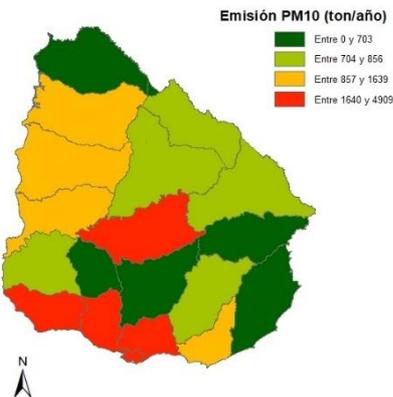
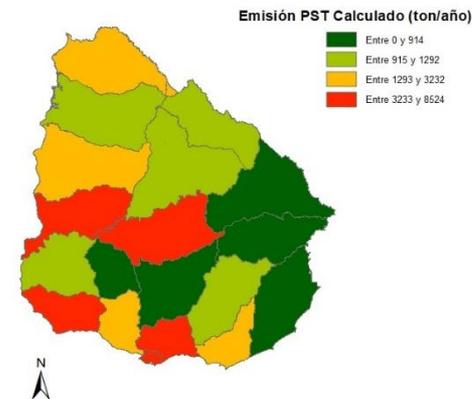
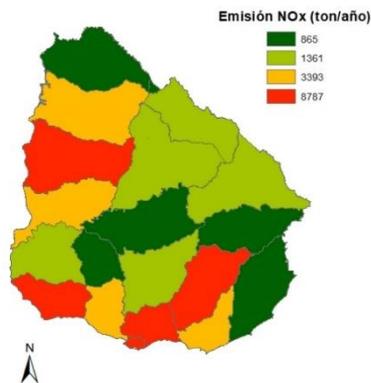
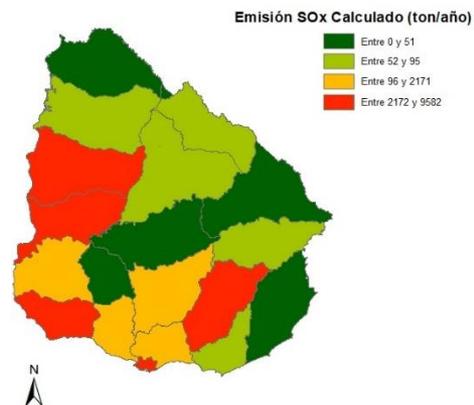


Emisiones de NO_x (ton/año) sector Vehicular



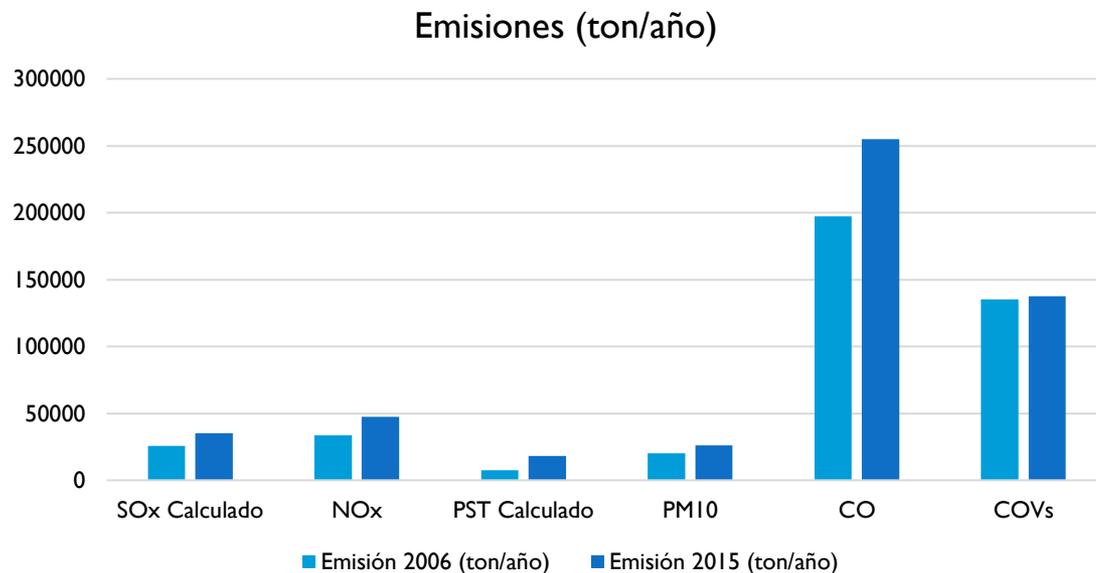
INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados sin Erosión Eólica y Rodadura:



INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Resultados sin Erosión Eólica y Rodadura:

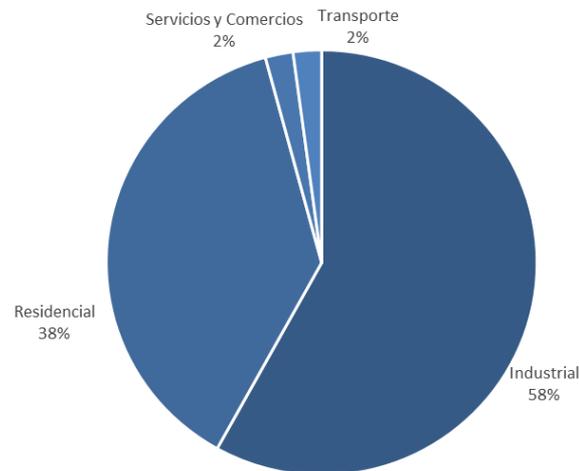
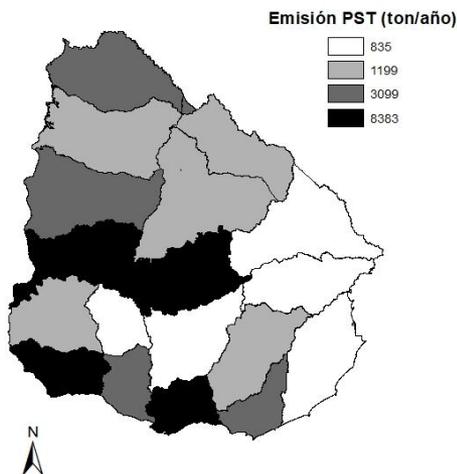


VISITA

- Laboratorio de Ensayos de Calefactores Domésticos:
 - ❖ Construido en el marco del Proyecto ANII-FSE “Determinación experimental de rendimiento energético y emisiones atmosféricas: aportes para la eficiencia energética en el sector residencial biomasa”.
 - ❖ Norma de referencia: UNE-EN 16510-1:2019 “Equipos de calefacción residencial alimentados con combustible sólido. Parte I: Requisitos generales y métodos de ensayo”.
 - ❖ Principales ensayos que se realizan:
 - ❖ Ensayo de prestaciones a potencia nominal (determinación de potencia y rendimiento).
 - ❖ Medición de emisiones de partículas.
 - ❖ Ensayo de seguridad por temperatura.

INVENTARIOS DE EMISIONES

- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Análisis de escenarios futuros de emisiones:
 - Zonas urbanas de Uruguay (no se consideran los sectores Erosión Eólica, Rodadura y Agropecuario).
 - Estimación de emisiones de PST al año 2030, utilizando proyecciones futuras oficiales de consumo de energía, y considerando como año base el 2015.
 - Comparación con meta oficial de reducción de emisiones.



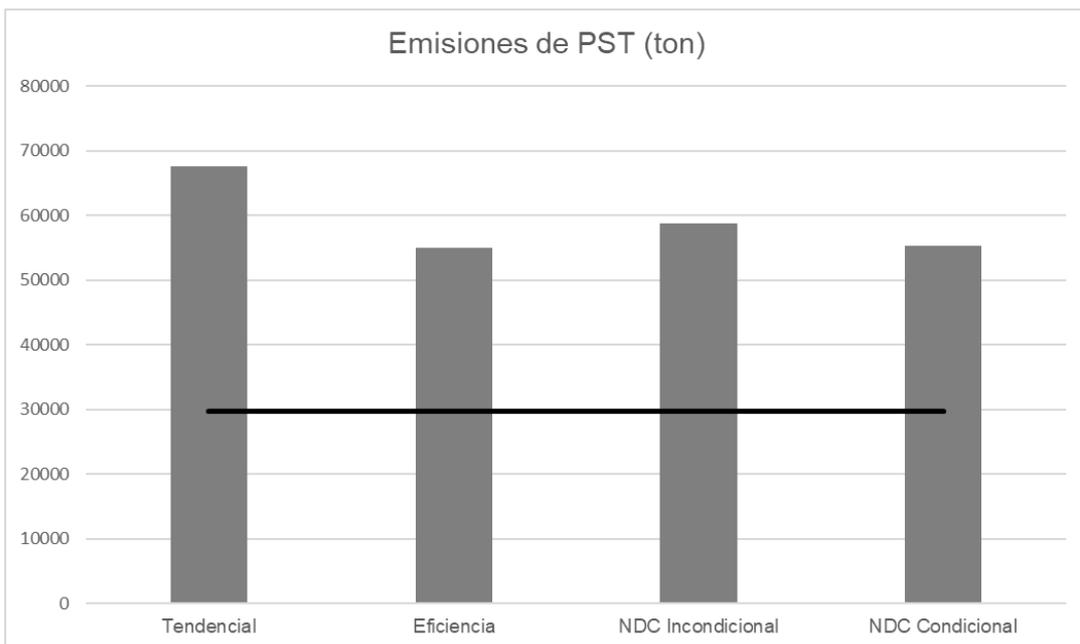
M. D'Angelo, I. Franchi, N. Rezzano, J. Cataldo, Análisis del Inventario de Emisiones Atmosféricas de Uruguay 2015: Evaluación del Cumplimiento de Políticas Ambientales de Contaminación Atmosférica en Relación al Consumo de Energía en Zonas Urbanas. XXXVII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2021.

INVENTARIOS DE EMISIONES

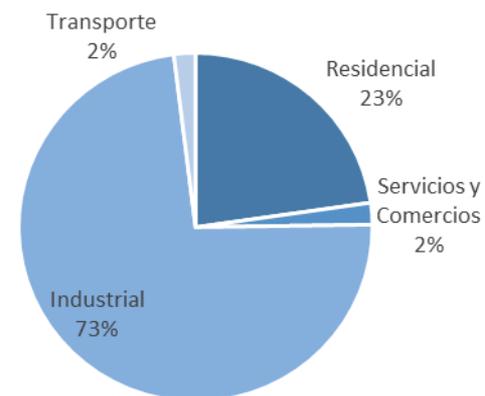
- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Análisis de escenarios futuros de emisiones:
 - Tendencial: el consumo de energía varía en función del cambio de parámetros socio-económicos.
 - Eficiencia: el consumo energético varía considerando la aplicación de diversas políticas de eficiencia energética sobre el escenario Tendencial.
 - NDC Incondicional: la demanda de energía varía considerando las metas de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a las que Uruguay se ha comprometido para el año 2025.
 - NDC Condicional: equivalente al escenario anterior, pero considerando que Uruguay recibe recursos adicionales para la implementación de medidas.

INVENTARIOS DE EMISIONES

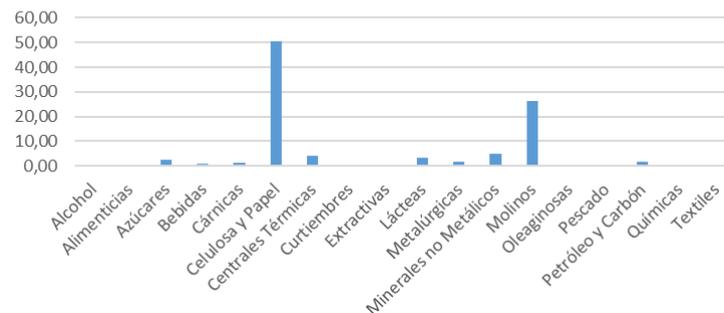
- Antecedentes nacionales:
- ❖ Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015:
 - Análisis de escenarios futuros de emisiones:



Emisiones PST (%)
Escenario Eficiencia



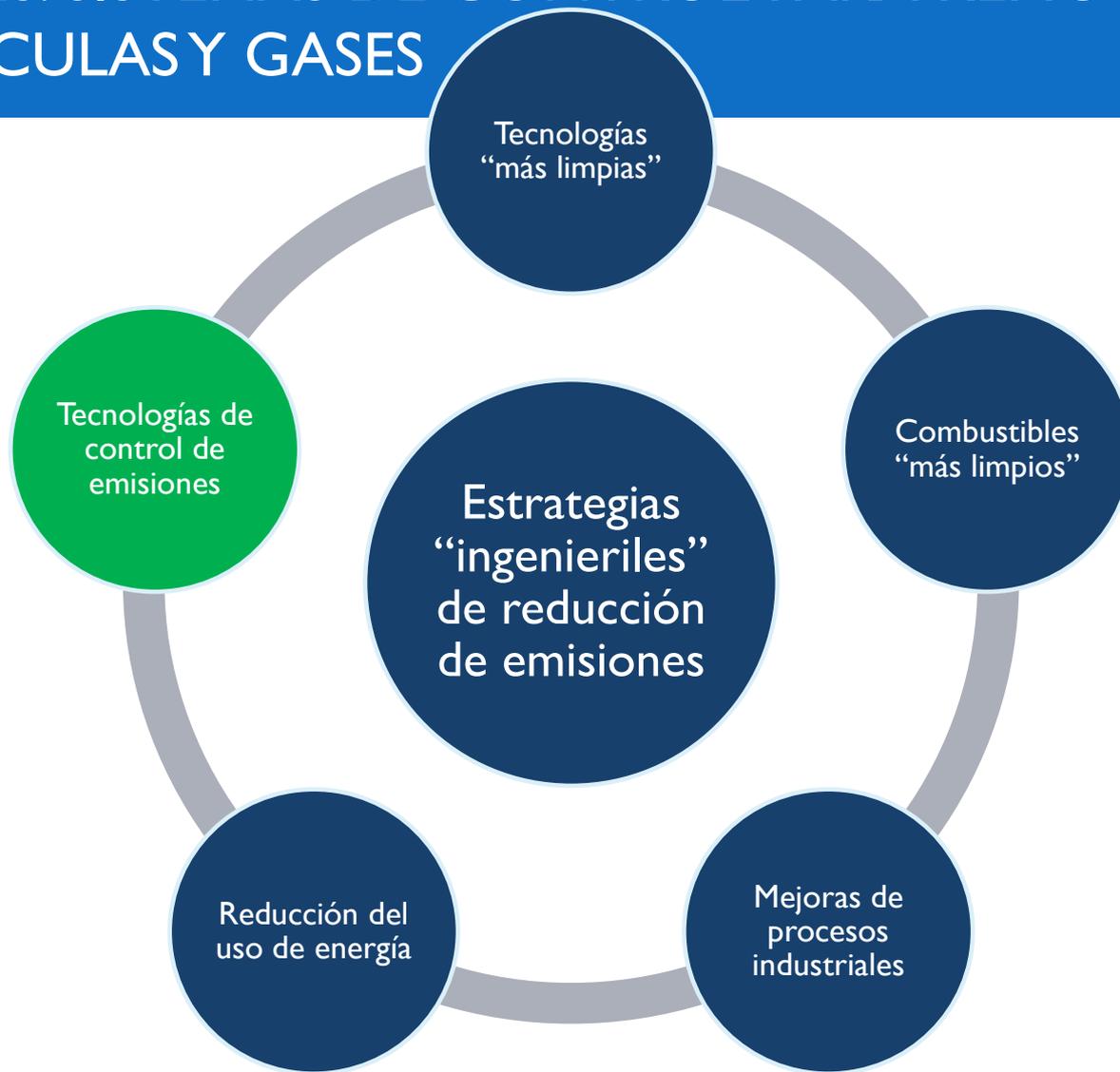
Emisiones PST (%)
Escenario Eficiencia
Sector Industrial



CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

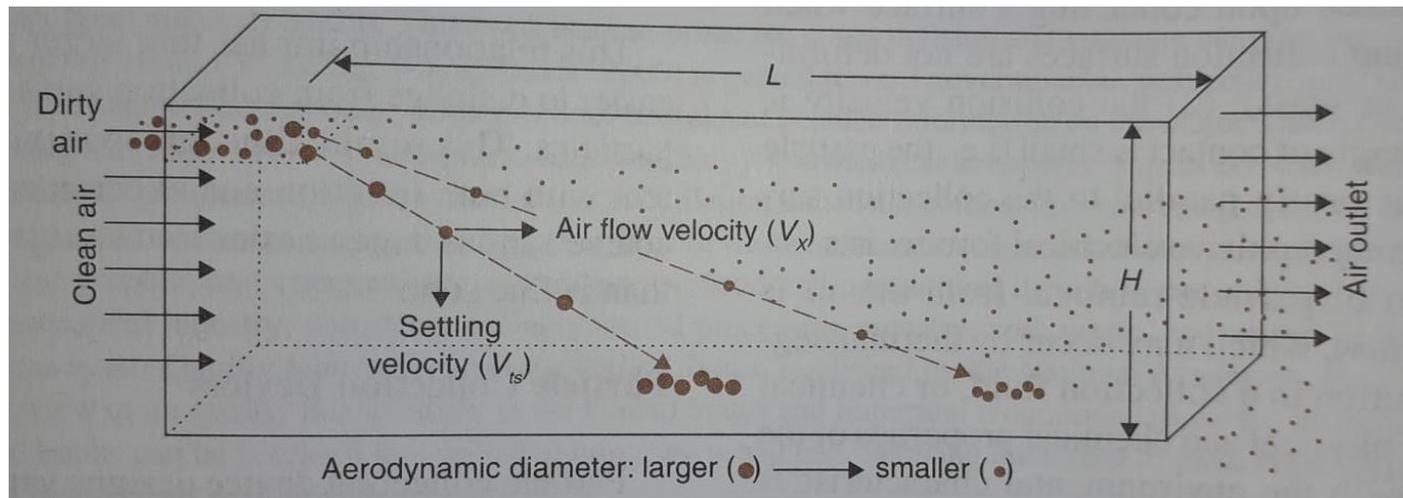
- En muchas ocasiones se utiliza el mismo mecanismo de captación de contaminantes atmosféricos en el marco del control de emisiones y en el monitoreo.
- En ambas aplicaciones, un objetivo central es lograr una eficiencia de captación cercana al 100 %.
- La principal diferencia entre estas dos operaciones es la cantidad de contaminante recolectada: mientras que en el monitoreo se colectan pequeñas cantidades de contaminante (en el orden de μg o mg), durante el control de emisiones se colectan mayores cantidades (en el orden de kg) con el objetivo de disminuir las emisiones atmosféricas.

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES



CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas:
- ❖ **Sedimentadores:** se utilizan únicamente para remover partículas de grandes diámetros. Esto limita su utilización cuando se busca remover partículas finas (PM_{10} y/o $PM_{2.5}$). Se basan en la disminución de la velocidad del flujo.



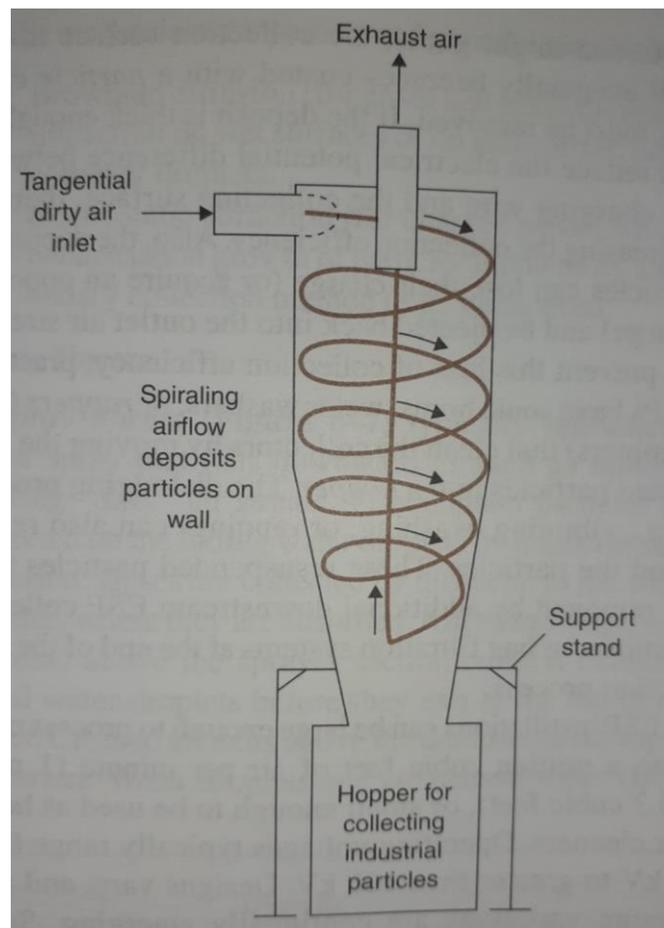
R.F. Phalen, R.N. Phalen, *Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective*. Apha Press, 2013.

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- La fracción de partículas más pequeña que logra sedimentar totalmente verifica la siguiente relación: $\Delta t_{HOR} = \Delta t_{VER} \rightarrow \frac{L}{V_x} = \frac{H}{V_{ts}} \rightarrow V_{ts} = \frac{H}{L} * V_x$
- La velocidad terminal de sedimentación (V_{ts}) es una característica propia de las partículas, y depende de su diámetro.
- A modo de ejemplo, si $V_x = 1 \text{ m/s}$ y $H = 1 \text{ m}$, para remover partículas con diámetros mayores o iguales a $1 \text{ }\mu\text{m}$ ($V_{ts} = 3,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$) L deberá ser mayor o igual a 30000 m aproximadamente (inviable).

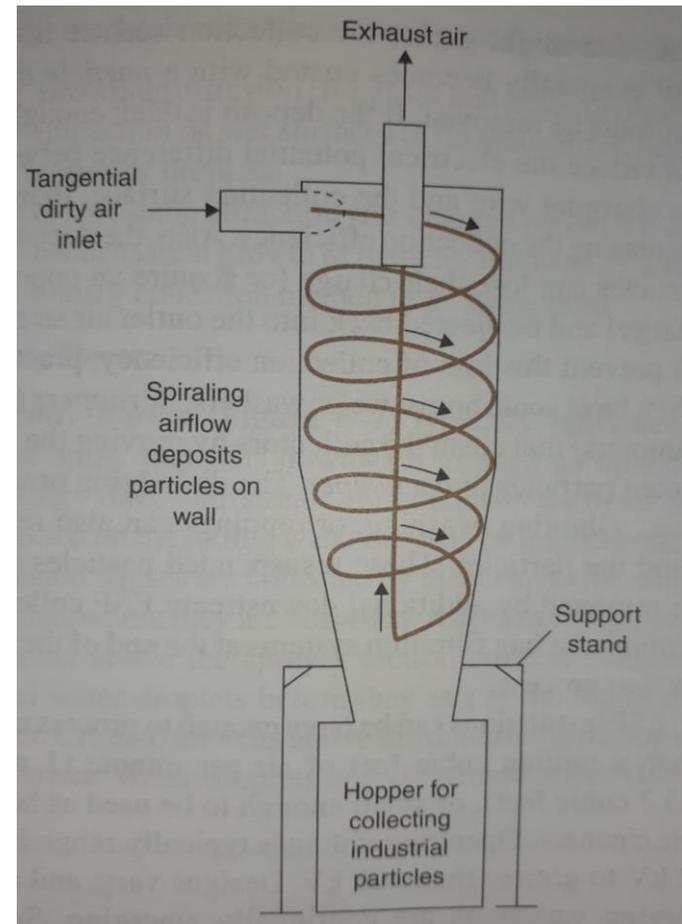
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas:
- ❖ **Ciclones:** se utilizan para recolectar partículas más pequeñas que las que pueden ser removidas en un sedimentador.
- ❖ En estas unidades se produce una fuerza centrífuga que promueve la sedimentación de partículas en las paredes del ciclón: $F_c = \frac{m \cdot V_t^2}{R}$; en donde m es la masa de la partícula, V_t es la velocidad tangencial y R es el radio del ciclón.



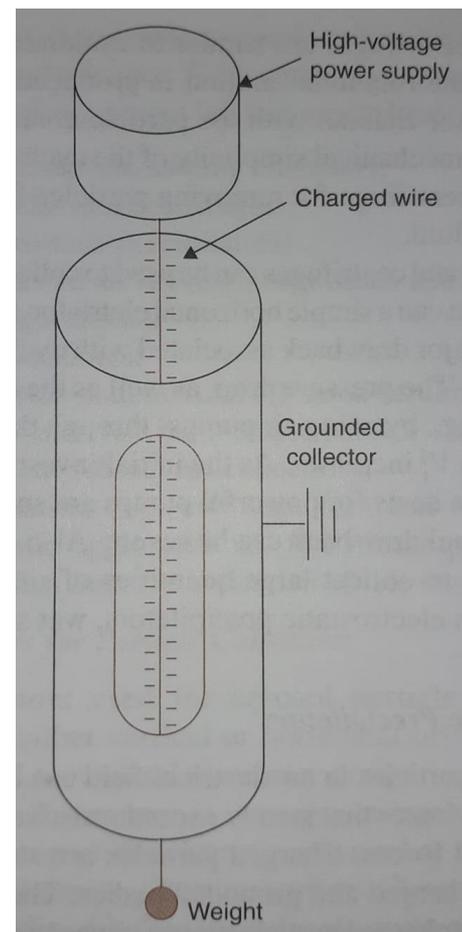
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas:
- ❖ Para favorecer la remoción, se busca aumentar el valor del cociente entre F_c y el peso de las partículas $F_g = m * g$.
- ❖ Es decir, se busca aumentar el valor del cociente: $\frac{F_c}{F_g} = \frac{V_t^2}{R * g}$
- ❖ Mayores valores de V_t requieren equipos de bombeo más potentes, lo que puede incrementar el costo de la instalación.



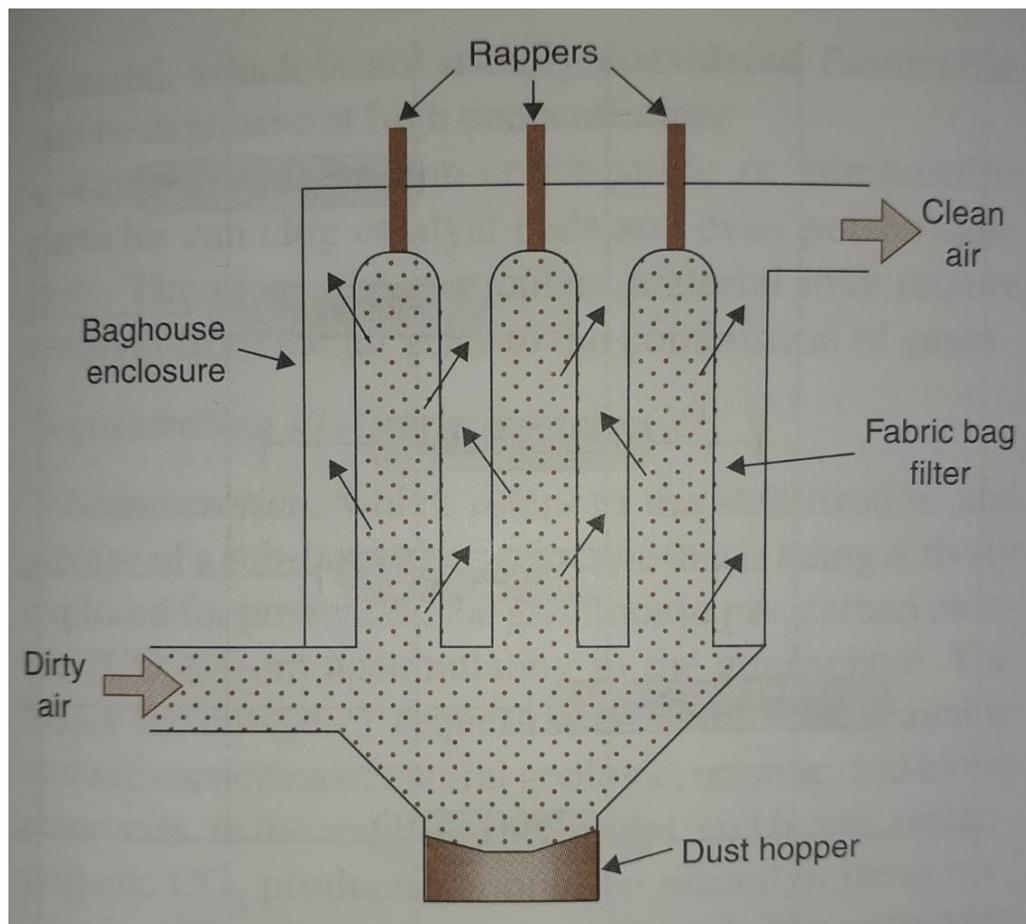
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas:
- ❖ **Precipitadores electrostáticos:** el movimiento de una partícula con carga eléctrica hacia una superficie colectora es el principio que utilizan estas unidades.
- ❖ Las partículas a ser removidas no pueden estar cargadas eléctricamente antes de comenzar el proceso de remoción.
- ❖ Este se compone de 3 pasos: 1) cargar eléctricamente a las partículas entrantes; 2) depositar las partículas en un colector; 3) limpiar el colector, removiendo las partículas depositadas.
- ❖ La eficiencia de estas unidades puede llegar al 99 %.



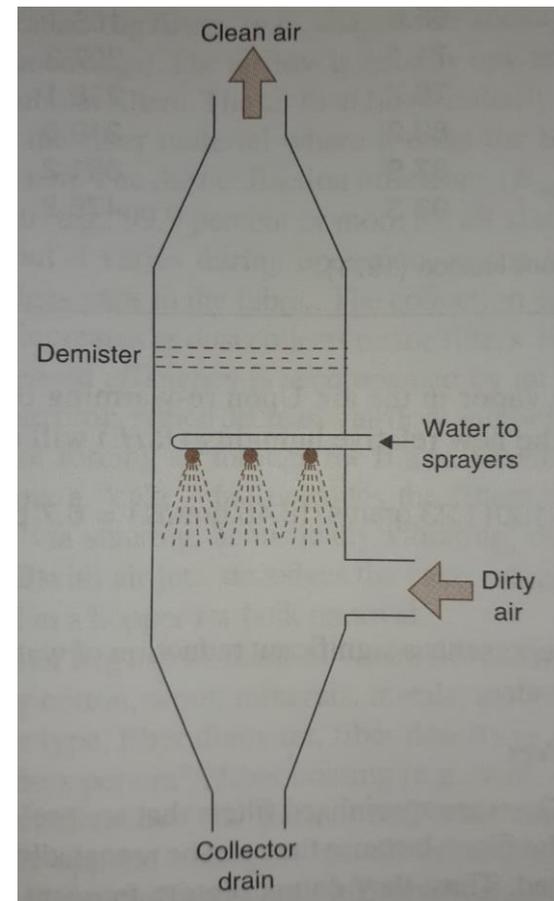
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas:
- ❖ **Filtros de mangas:** presentan la ventaja de ser reutilizables.
- ❖ La eficiencia de estas unidades puede llegar al 99.9 %.
- ❖ Durante la operación, el filtro se va colmatando, incrementándose la eficiencia de remoción pero también la pérdida de carga.



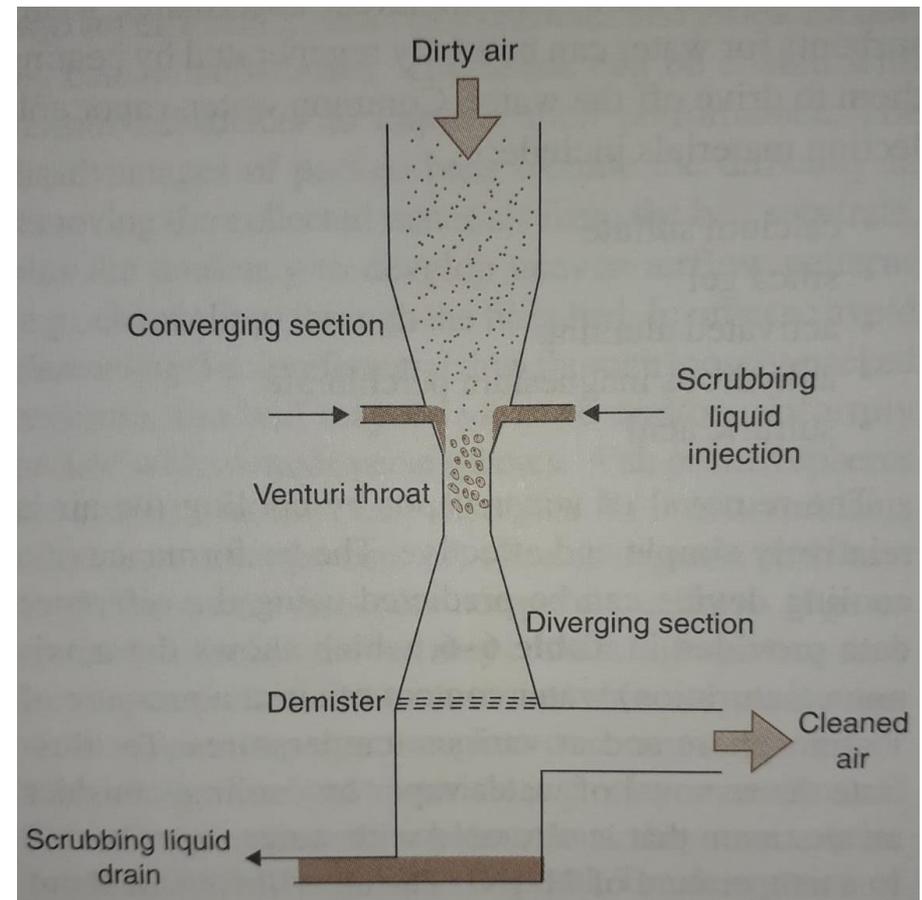
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas y gases:
- ❖ **Depurador húmedo:** en estas unidades, se utiliza un medio líquido para recolectar las partículas (o los gases), usualmente agua.
- ❖ Como desventaja, se genera un efluente líquido que debe tratarse.
- ❖ *Primer ejemplo: Spray Tower.*



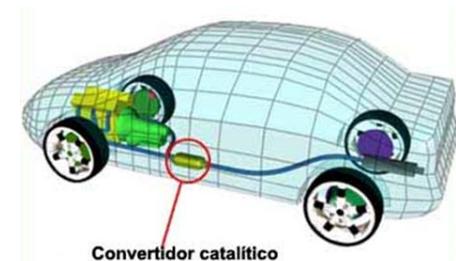
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de partículas y gases:
- ❖ **Depurador húmedo:** en estas unidades, se utiliza un medio líquido para recolectar las partículas (o los gases), usualmente agua.
- ❖ Como desventaja, se genera un efluente líquido que debe tratarse.
- ❖ *Segundo ejemplo: Venturi Scrubber.*



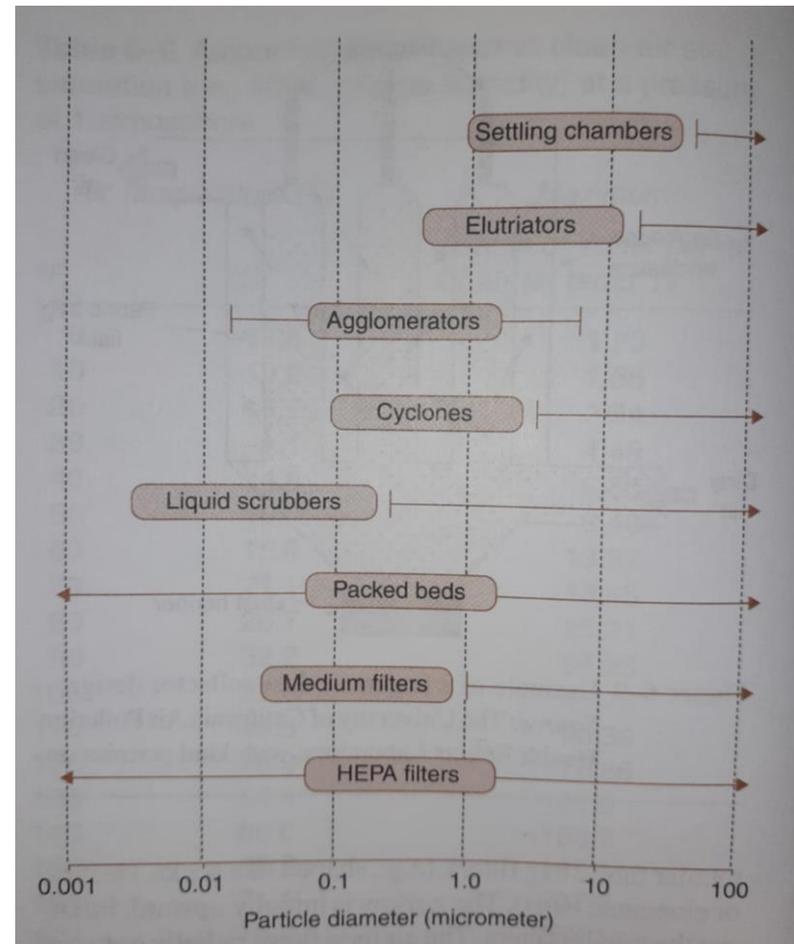
CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Tecnologías de control de emisiones de gases:
- ❖ **Métodos de adsorción:** los gases son retenidos en la superficie de un material sólido con el que, por lo general, no reaccionan (ejemplo: filtros de carbón activado).
- ❖ **Convertidores catalíticos:** son filtros que contienen sustancias catalizadoras, que se operan a elevadas temperaturas ($370\text{ }^{\circ}\text{C} - 480\text{ }^{\circ}\text{C}$) o presiones (o ambas), de forma tal de favorecer la remoción de gases y partículas.
 - Los convertidores catalíticos de los automóviles (catalizadores de tres vías) son dispositivos que incluyen un catalizador de reducción (platino y rodio) para convertir los NO_x en N_2 y O_2 ; y un catalizador de oxidación (platino y paladio) para convertir los hidrocarburos no quemados y el CO en CO_2 y vapor de agua.



CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE CONTROL DE EMISIONES: SISTEMAS DE CONTROL PARA REMOCIÓN DE PARTÍCULAS Y GASES

- Comparación de tecnologías de control de emisiones:
- ❖ La tecnología a elegir dependerá del contaminante que se busque remover (partículas, gases o ambos).
- ❖ En el caso de las partículas, también dependerá de su tamaño.



Tecnología	Aplicaciones	Ventajas	Desventajas
Sedimentadores y ciclones	Partículas grandes y medianas	Bajo costo, simplicidad, durabilidad	Baja eficiencia, alto requerimiento de espacio
Filtros	Partículas de todos los tamaños, humos	Alta eficiencia, bajos requerimientos de energía, residuo seco	Repuestos caros, limitaciones de temperatura y humedad
Depurador húmedo	Aire húmedo y caliente, todo tipo de partículas salvo las más pequeñas	Compactos, pérdida de carga constante, no genera polvo	Se genera un efluente líquido a tratar
Precipitadores electrostáticos	Todo tipo de partículas y nieblas	Alta eficiencia, baja pérdida de carga, residuo seco, bajos costos de mantenimiento	Alto requerimiento de espacio, alto costo inicial
Convertidores catalíticos	Gases y vapores	Bajo mantenimiento, baja pérdida de carga, alta eficiencia	Requiere altas temperaturas, las partículas pueden obstruirlo, alto costo

R.F. Phalen, R.N. Phalen, Introduction to Air Pollution Science, a Public Health Perspective. Apha Press, 2013.

EJERCICIO

- Estrategias de control de emisiones vehiculares en Montevideo:
- ❖ Fuente de información: Inventario de Emisiones Atmosféricas 2015.
- ❖ Se definen diferentes estrategias de control de emisiones vehiculares:

Escenario	Característica
Base	Estado actual
Transporte activo	Se reduce la flota de autos EURO 3 en un 30 %
Transporte eléctrico	Se reduce la flota de ómnibus EURO III en un 30 %
Modernización camiones	El 30 % de la flota de camiones EURO III pasa a EURO V

- ❖ Los escenarios alternativos se construyen con respecto al escenario Base.
- ❖ A partir de la información proporcionada, calcular las emisiones totales de NO_x y de CO en ton/año para cada escenario, y comentar los resultados obtenidos.