

ZANICHELLI

Fabio Fanti

Biologia, microbiologia e tecnologie di controllo ambientale

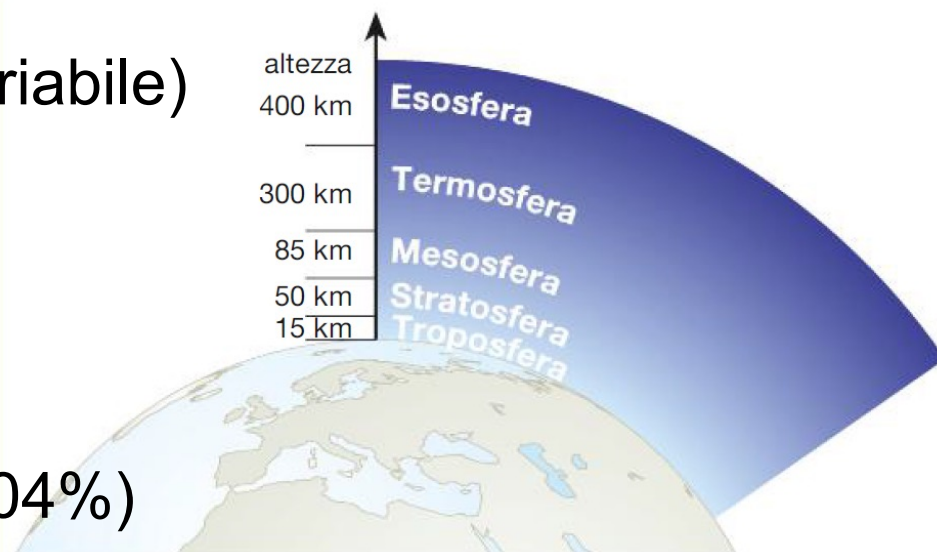
L'atmosfera, l'accumulo degli inquinanti e la loro rimozione

Strati dell'atmosfera e radiazioni luminose /1

L'**atmosfera** è la massa d'aria che circonda la Terra. Le sue caratteristiche chimico-fisiche variano con l'altezza.

Principali costituenti:

- Vapore acqueo (quantità variabile)
- Azoto molecolare N_2 (78%)
- Ossigeno O_2 (21%)
- Argon Ar (1%)
- Anidride carbonica CO_2 (0,04%)

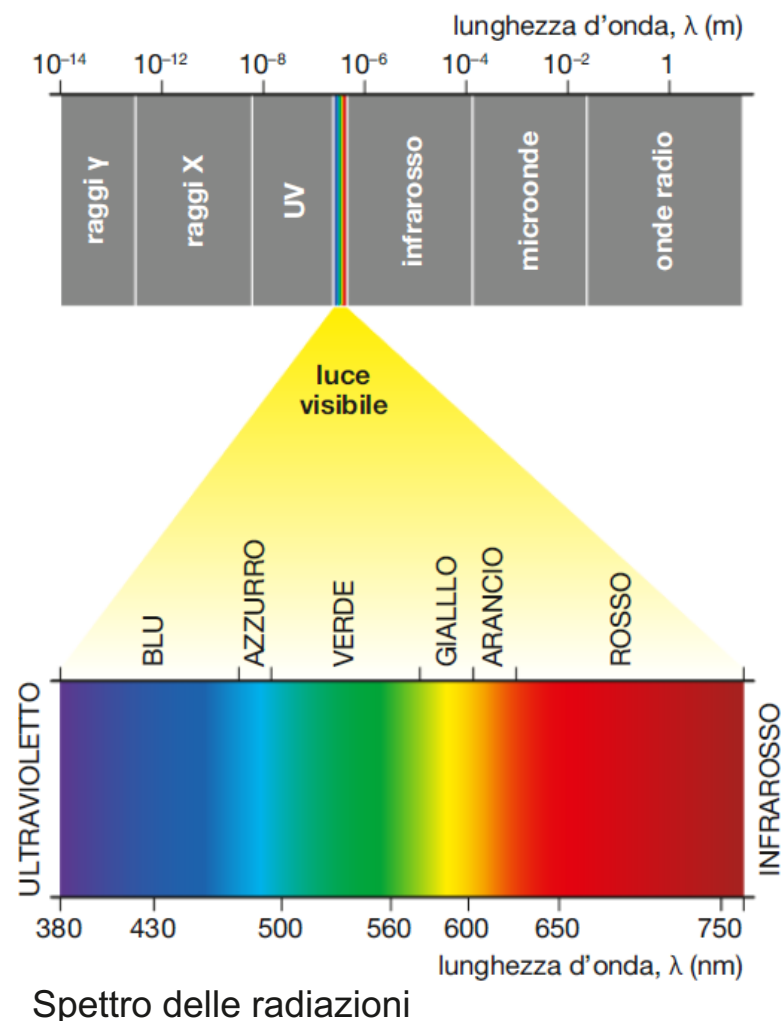


I diversi strati dell'atmosfera terrestre

Strati dell'atmosfera e radiazioni luminose /2

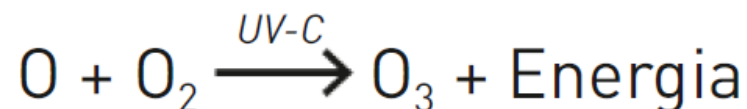
La capacità di assorbimento delle radiazioni elettromagnetiche è diversa per ciascuno dei gas presenti in atmosfera.

L'**ozono** filtra i raggi **UV-C** (200 - 280 nm) e parzialmente i raggi **UV-B** (280 - 320 nm). Solo gli **UV-A** (320 - 400 nm) raggiungono la superficie terrestre.

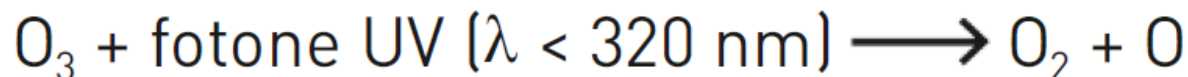


Il ciclo dell'ozono in atmosfera

1. La **produzione dell'ozono** si verifica nella stratosfera:



2. L'ozono filtrando UV-B e UV-C subisce una **decomposizione fotochimica**:



3. Alcuni atomi di ossigeno collidono con le molecole di ozono le distruggono:



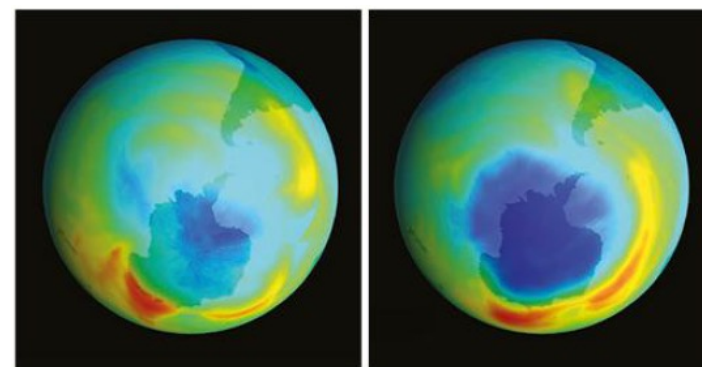
Il processo di formazione-distruzione dell'ozono è noto come «**Ciclo Chapman**».

Il buco dell'ozono nella stratosfera e le sue cause

Cloro atomico (Cl) e **monossido di cloro (ClO)** in atmosfera agiscono da catalizzatori nella reazione di distruzione dell'ozono:

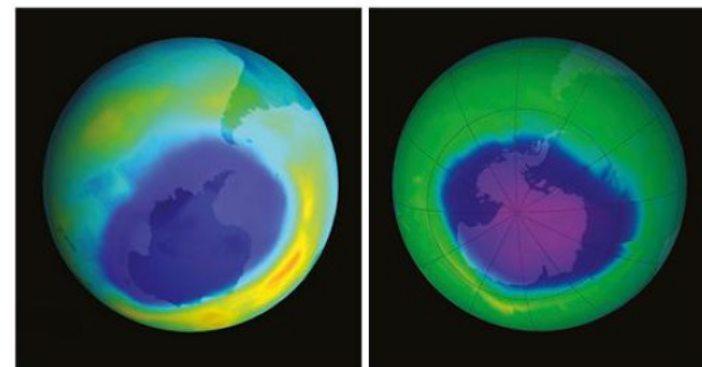


Le sostanze maggiormente responsabili dell'arricchimento di cloro in atmosfera sono i **clorofluorocarburi (CFC)**.



Settembre 1979

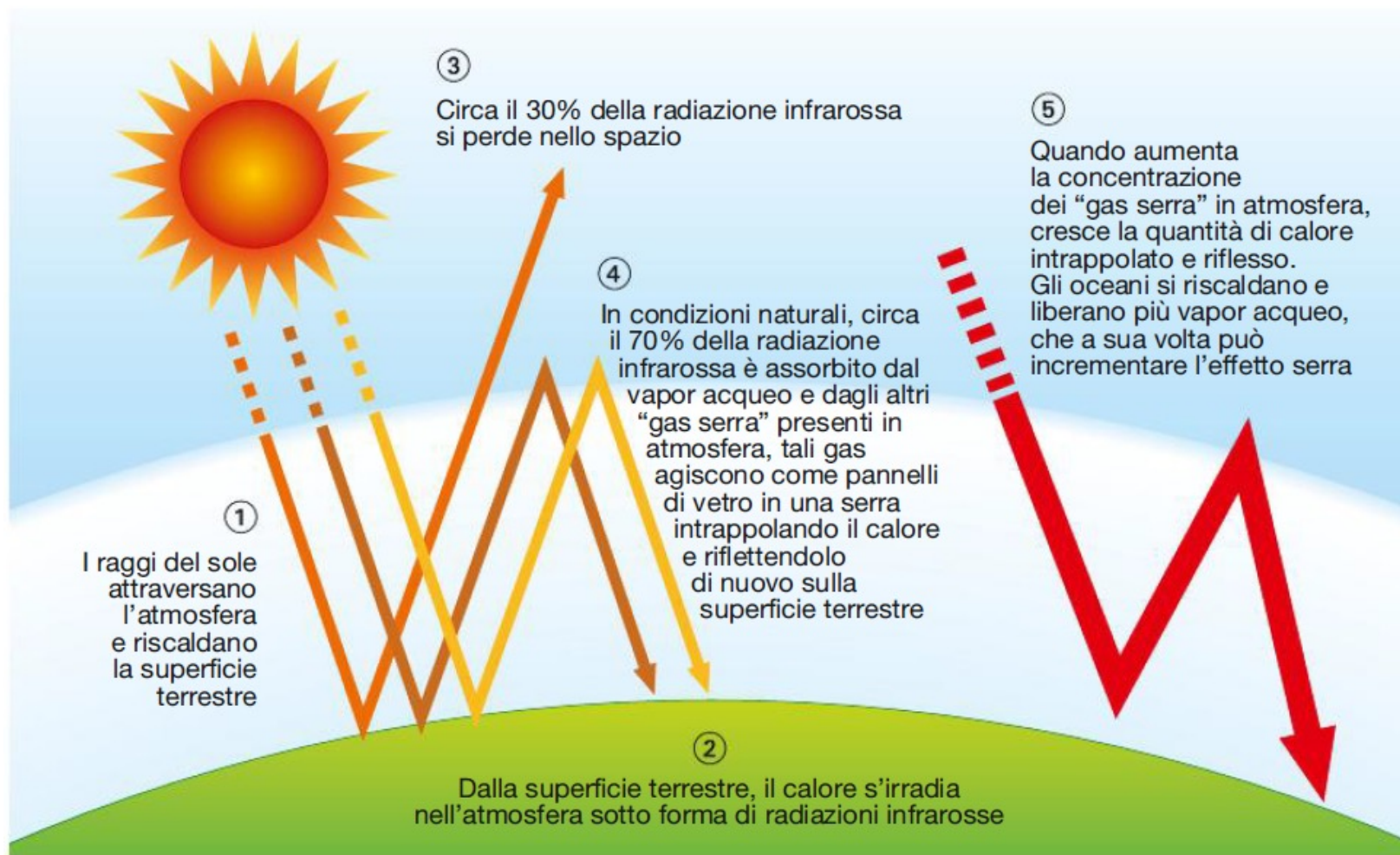
Settembre 1988



Settembre 2000

Settembre 2010

L'effetto serra e la concentrazione dei gas in atmosfera /1



L'effetto serra e la concentrazione dei gas in atmosfera /2

L'**effetto serra** permette di mantenere a livello della superficie terrestre una temperatura media prossima ai 15 ° C.

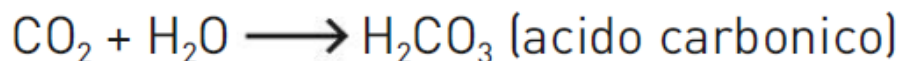
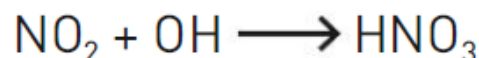
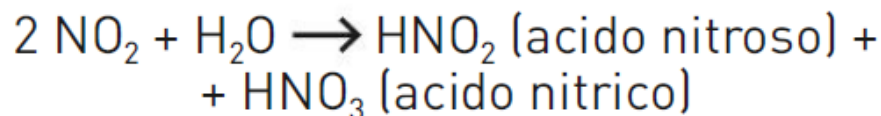
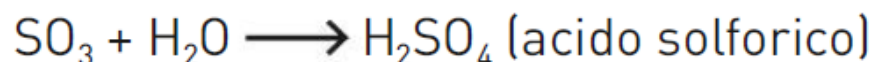
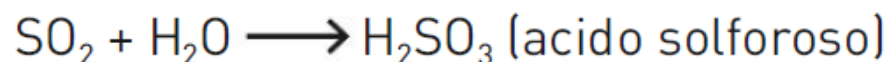
È di per sé un **fenomeno naturale e positivo**: solo quando in atmosfera aumenta la concentrazione dei gas-serra (in particolare CO₂ e CH₄) si ha un aumento della temperatura media della superficie terrestre.

→ L'effetto serra quindi aumenta e con esso il **riscaldamento artificiale del pianeta**.

L'effetto serra e la concentrazione dei gas in atmosfera /3

Le **piogge acide** sono dovute all'aumento in atmosfera di gas quali le anidridi solforosa (SO_2) e solforica (SO_3).

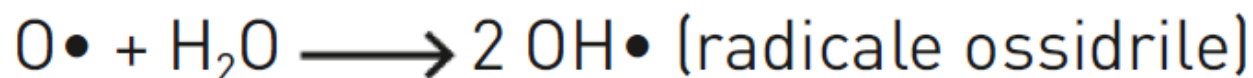
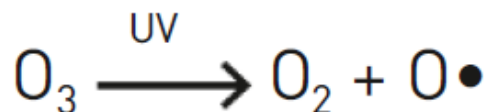
Il pH delle piogge acide è compreso tra 2 e 5 (piogge normali (pH = 5,5)).



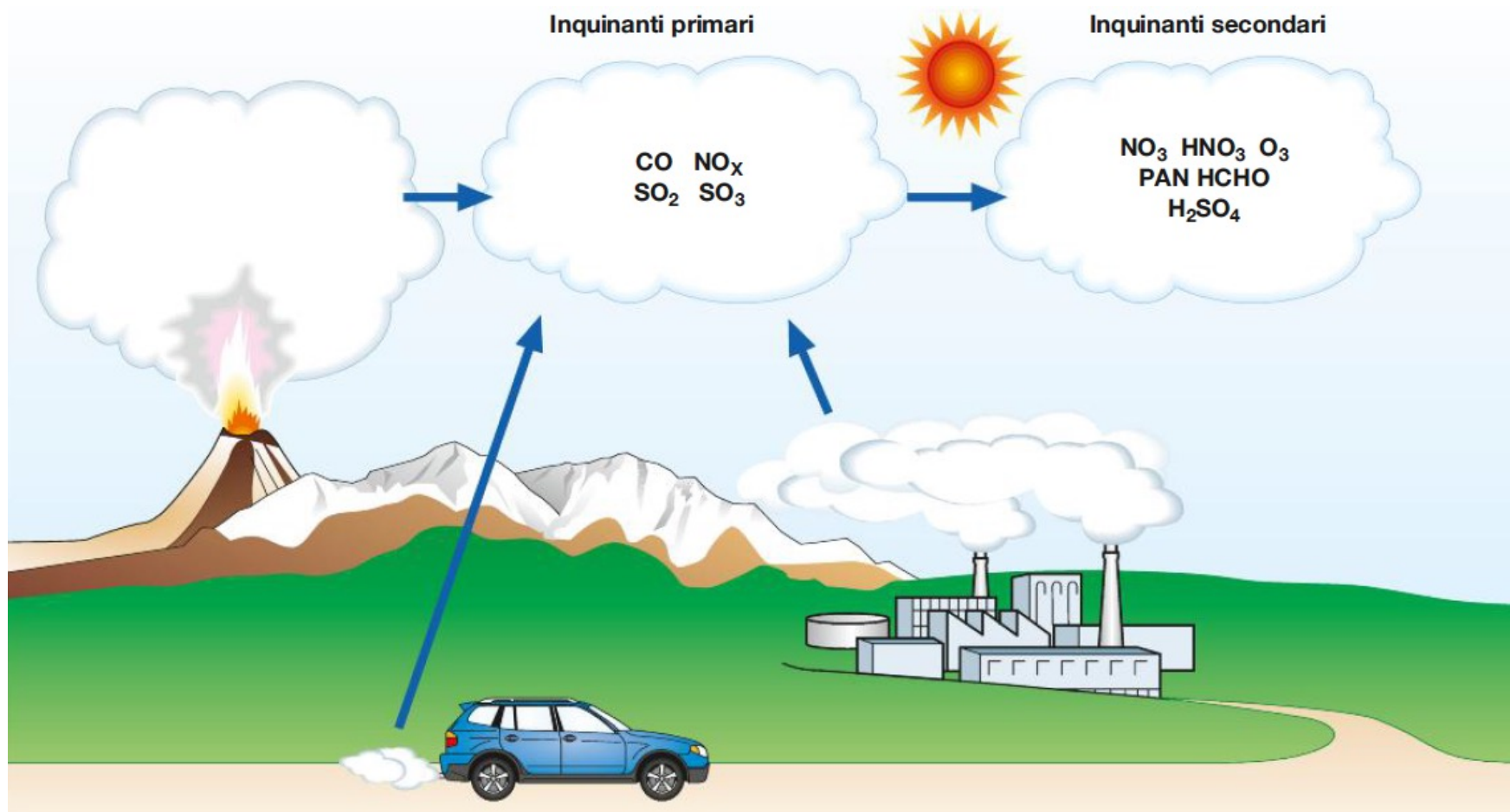
Emissioni in atmosfera non inquinata

L'atmosfera ha un elevato **potere ossidante**, dovuto all'alta concentrazione di O₂.

Le **fonti naturali** emettono in atmosfera monossido di carbonio (CO), anidride solforosa (SO₂) e altre sostanze che vengono quasi tutte ossidate (reagendo con il radicale libero ossidrile) e i prodotti di reazione ricadono sul terreno.



Emissioni in atmosfera: inquinanti primari e secondari /1



Emissioni in atmosfera: inquinanti primari e secondari /2

Gli **inquinanti primari** provengono direttamente dalle sorgenti che li producono.

- **Biossido di zolfo e triossido di zolfo** (SO_x): dalla combustione del carbone e dei derivati del petrolio, dagli impianti di riscaldamento e dal traffico veicolare
- **Monossido di carbonio** (CO): dalla combustione incompleta dei prodotti contenenti carbonio (es. carburanti, benzine, carbone, legna)
- **Ossidi di azoto** (NO_x): da impianti di riscaldamento e motori dei veicoli, ma anche per ossidazione dell'azoto atmosferico.

Emissioni in atmosfera: inquinanti primari e secondari /3

- **Particolato atmosferico primario:** particelle microscopiche aerodisperse, liquide o solide, disperse in atmosfera
- **Metalli pesanti:** presenti in atmosfera sotto forma di particolato aerotrasportato nella frazione PM10
- **COV:** composti organici ad alta volatilità, cioè che evaporano con facilità
- **Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)**
- **Policlorobifenili (PCB)**
- **Policlorodibenzo-*p*-diossine (PCDD o diossine) e policlorodibenzofurani (PCDF o furani)**

Emissioni in atmosfera: inquinanti primari e secondari /4

Gli **inquinanti secondari** si formano per trasformazione chimico-fisica di alcuni inquinanti primari:

- **Ozono troposferico:** l'ozono è presente naturalmente nella stratosfera. Negli strati più bassi rappresenta invece un grave pericolo per gli animali e le piante, nelle quali inibisce i processi di fotosintesi e di trasporto di nutrienti
- **Perossiacetilnitrato (PAN)** $\text{CH}_3(\text{CO})\text{-O-ONO}_2$
- **Acido nitrico** HNO_3 e **acido nitroso** HNO_2
- **Formaldeide** HCHO : deriva soprattutto dall'ossidazione degli idrocarburi

La formazione dello smog fotochimico /1

Lo **smog** è una foschia costituita da microscopiche goccioline di acqua che contengono in soluzione le sostanze inquinanti e i prodotti delle loro reazioni e che rimangono in sospensione nell'aria.

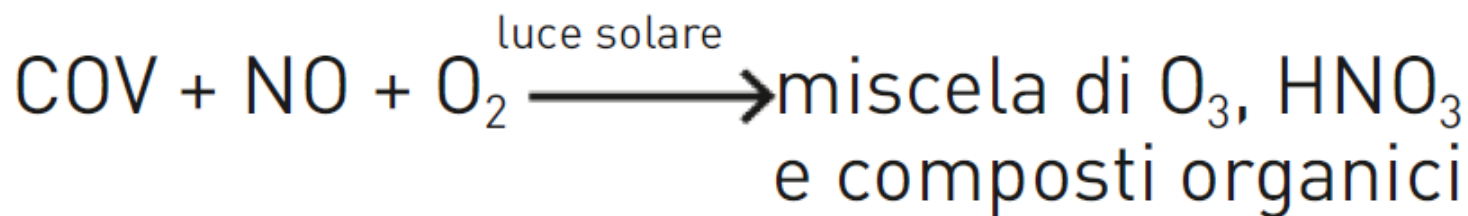
Ne esistono due tipi:

1. **Smog di zolfo**
2. **Smog fotochimico**



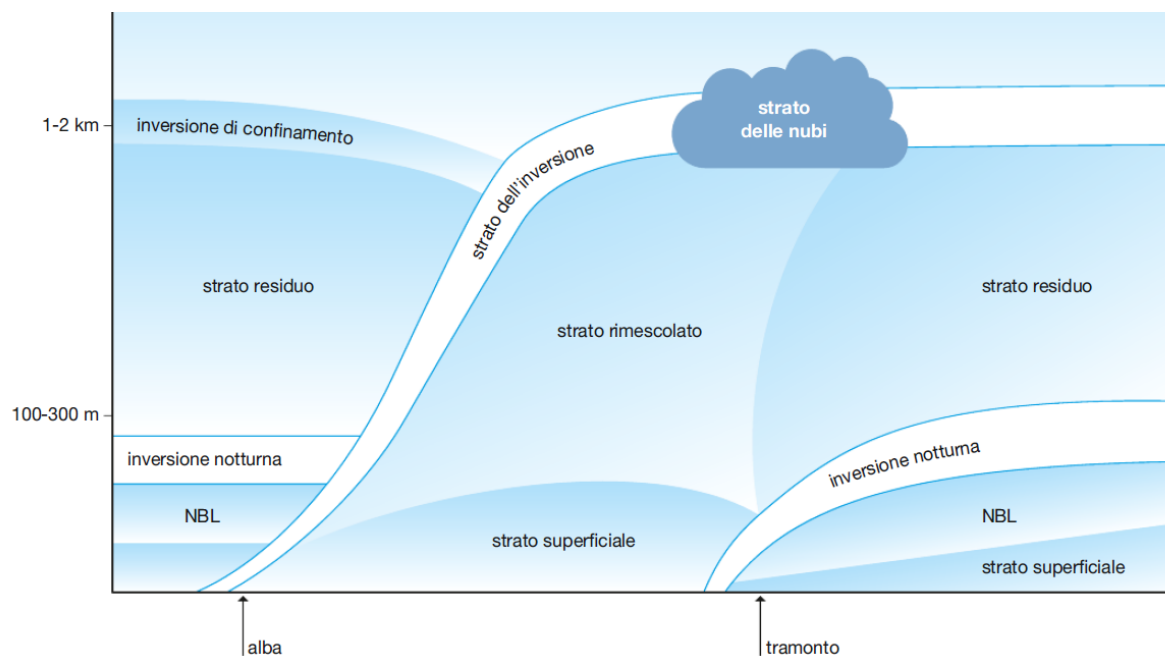
La formazione dello smog fotochimico /2

- 1. Smog di zolfo:** dispersione nell'aria di ossidi di zolfo che provengono dalla combustione di combustibili fossili.
- 2. Smog fotochimico:** originato da una anomala e rilevante produzione di ozono negli strati bassi della troposfera, formando il cosiddetto **strato di ozono nel posto sbagliato**



Lo strato limite o di rimescolamento

Lo strato della troposfera più diretto contatto con il suolo è definito ***Planetary Boundary Layer (PBL***, strato limite planetario) o **strato di rimescolamento**: è largamente influenzato dalla superficie terrestre ed è quello coinvolto più direttamente nei fenomeni di dispersione degli inquinanti.



L'evoluzione del PBL in una giornata soleggiata

Trasporto, rimozione e accumulo degli inquinanti nell'atmosfera /1

Gli inquinanti immessi in atmosfera vengono **trasportati e dispersi** per mezzo di processi fisici:

- **Diffusione molecolare:** moto delle particelle dovuto alle collisioni tra molecole
- **Turbolenza o diffusione turbolenta:** generata dai cambiamenti di direzione e di velocità del vento
- **Avvezione:** moto orizzontale delle masse d'aria per l'azione dei venti prevalenti (avvettivi)
- **Convezione:** moto verticale delle masse d'aria verso l'alto, originato dal riscaldamento diurno della superficie terrestre

Trasporto, rimozione e accumulo degli inquinanti nell'atmosfera /2

La **rimozione** degli inquinanti dall'atmosfera può avvenire per:

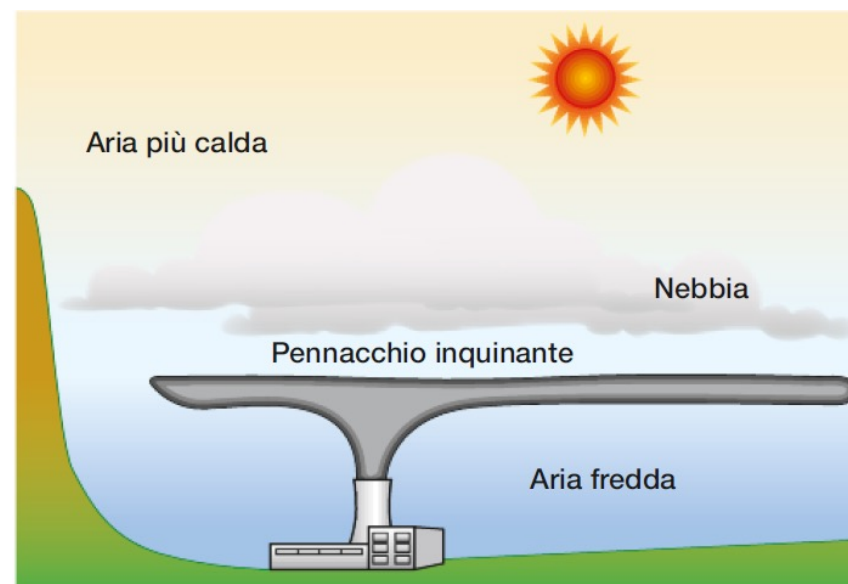
- **Sedimentazione gravitazionale:** ricaduta verso il basso delle particelle in sospensione
- **Deposizione secca:** favorisce l'eliminazione delle particelle dall'atmosfera grazie alla loro deposizione su qualsiasi tipo di supporto
- **Deposizione umida** (su particolato e gas): si verifica per inglobamento delle particelle inquinanti nelle gocce di pioggia (*rain-out* o *wash-out*)

Fenomeni fisico-climatici e sostanze inquinanti

L'inquinamento atmosferico dipende anche da **variabili ambientali** e da **fenomeni fisico-chimici**.

Inversione termica: comportamento anomalo della temperatura che aumenta con l'aumentare dell'altitudine.

Si accompagna ad un'alta stabilità atmosferica che limita la circolazione verticale dell'aria con il conseguente accumulo degli inquinanti negli strati inferiori.



Convertitori catalitici per i gas di scarico /1

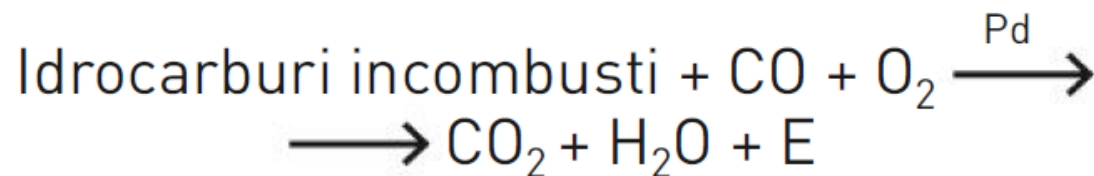
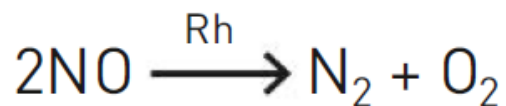
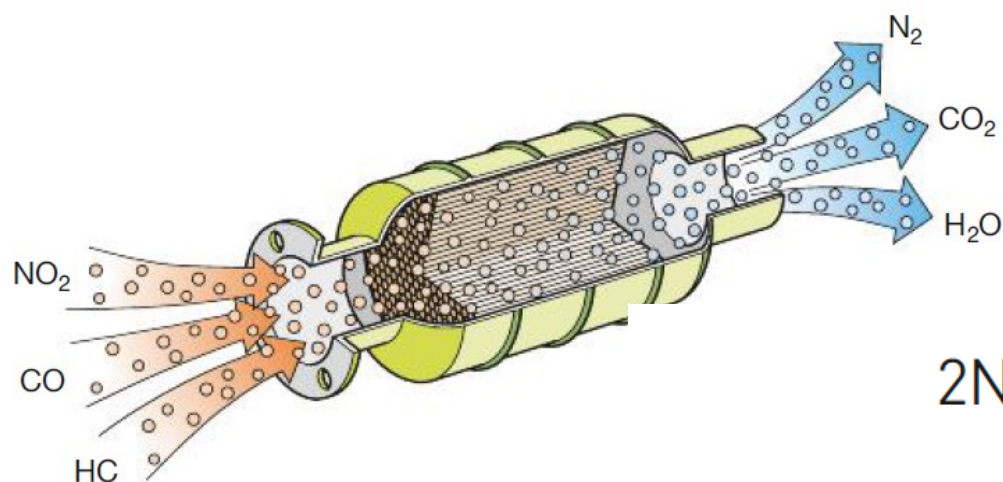
Nei **motori a scoppio** la combustione ideale di un carburante dovrebbe produrre: **CO₂** , **H₂O**, **energia termica**. In realtà:

- la combustione è incompleta per cui nei gas di scarico si trovano anche monossido di carbonio e idrocarburi combusti in modo parziale
- l'alta temperatura e pressione nei cilindri provocano anche la combustione dell'azoto dell'aria N₂ formando ossido di azoto

→ Quindi gli inquinanti prodotti sono: **CO**, **NO** e **idrocarburi combusti parzialmente**.

Convertitori catalitici per i gas di scarico /2

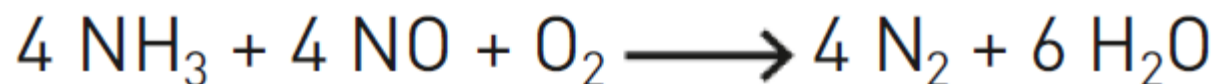
Per eliminare gli inquinanti dai gas di scarico si usano i **convertitori a tre vie**:



Rimozione delle emissioni industriali /1

Emissioni delle centrali termoelettriche:

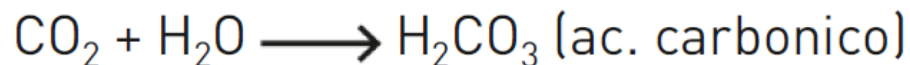
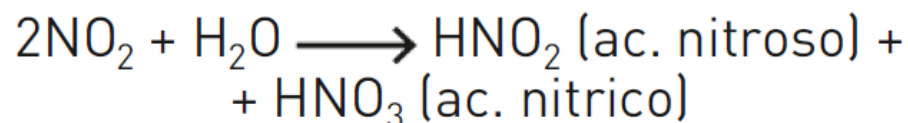
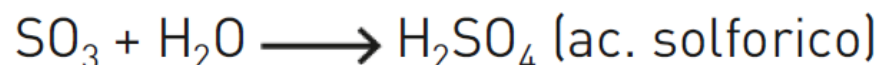
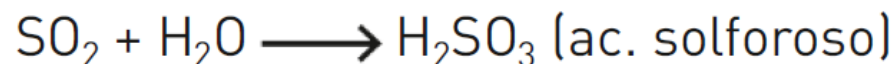
- combustione per fasi successive (prima alta temperatura e bassa concentrazione di ossigeno, poi più ossigeno ma temperatura inferiore) per produrre meno NO
- sistemi catalitici a riduzione selettiva (SCR), che convertono gli NO_x in N₂ prima di essere rilasciati in atmosfera grazie all'impiego di ammoniaca:



Rimozione delle emissioni industriali /2

Composti dello zolfo: SO₂ viene emessa in atmosfera dalle centrali elettriche che utilizzano come combustibile il **carbone**. Le strategie che vengono messe in atto sono la ripulitura precombustione, postcombustione o durante la combustione.

Un problema legato all'emissione di SO_x di origine antropica sono le **piogge acide**, che contengono acido solforico H₂SO₄ e acido nitrico HNO₃.



Rimozione delle emissioni industriali /3

Composti organici volatili (COV) e altri inquinanti allo stato gassoso. Le strategie utilizzate per abbattere tali emissioni sono:

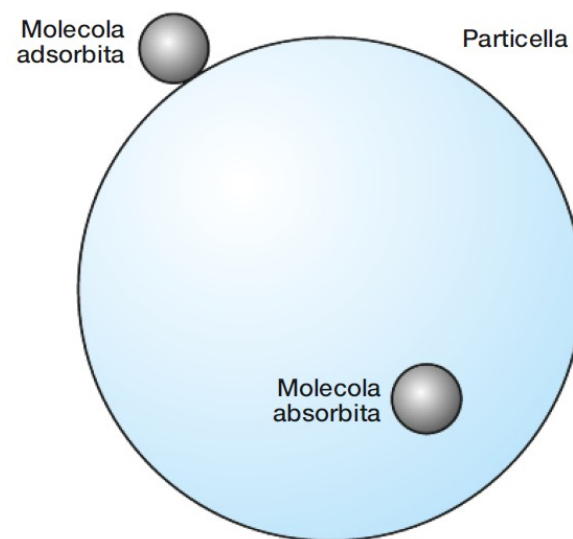
- Adsorbimento su substrati solidi
- Filtrazione biologica (biofiltrazione)
- Condensazione
- Assorbimento o lavaggio su liquido (sistemi a umido)
- Combustione

Rimozione per adsorbimento su substrato solido /1

L'adsorbimento consiste nell'accumulo di una sostanza dispersa in un gas (sostanza adsorbita) su una superficie solida (adsorbente). In base alla natura delle forze che si instaurano si parla di **adsorbimento chimico** e **adsorbimento fisico**.

Una sostanza viene:

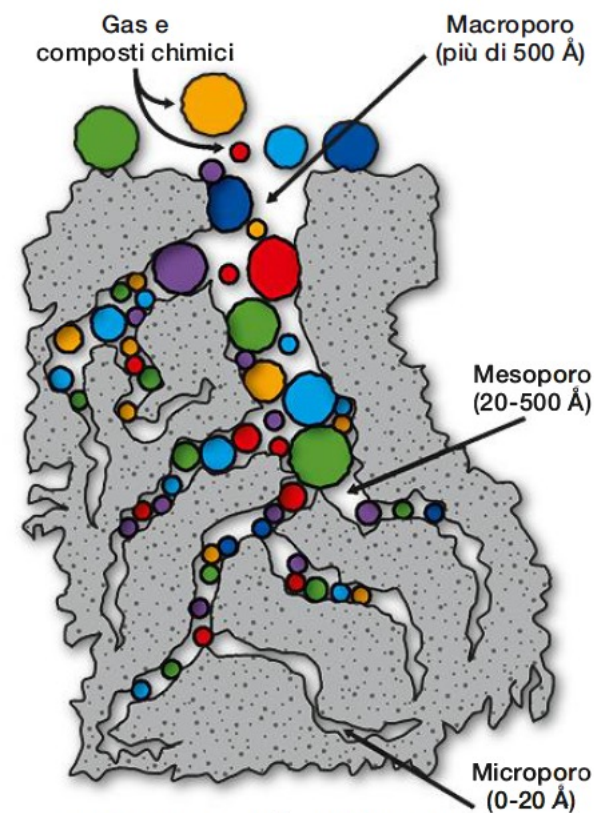
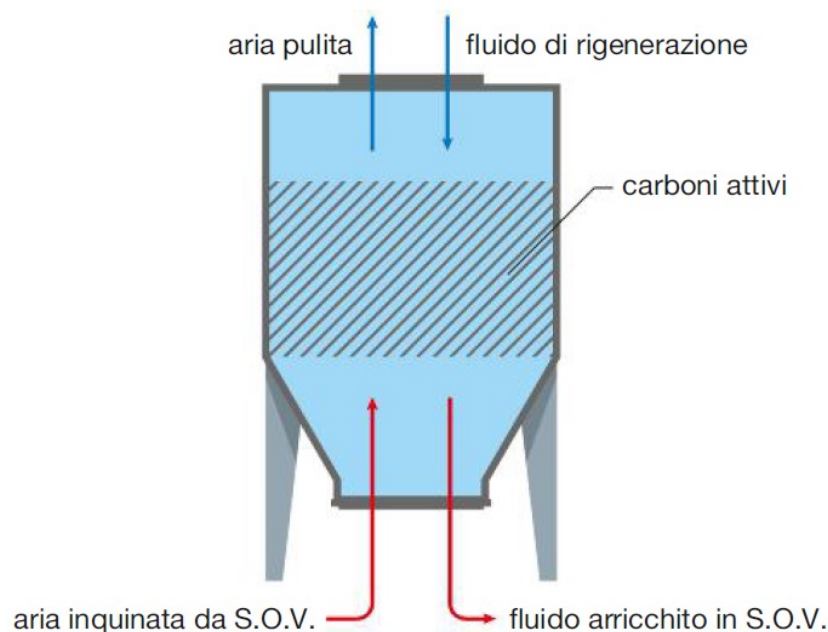
- **adsorbita** quando si lega alla superficie delle particelle di un substrato
- **assorbita** quando si scioglie nella massa delle particelle del substrato



Rimozione per adsorbimento su substrato solido /2

Gli adsorbenti più impiegati sono le **zeoliti sintetiche** e i **carboni attivi**.

Impianto a letto fisso:

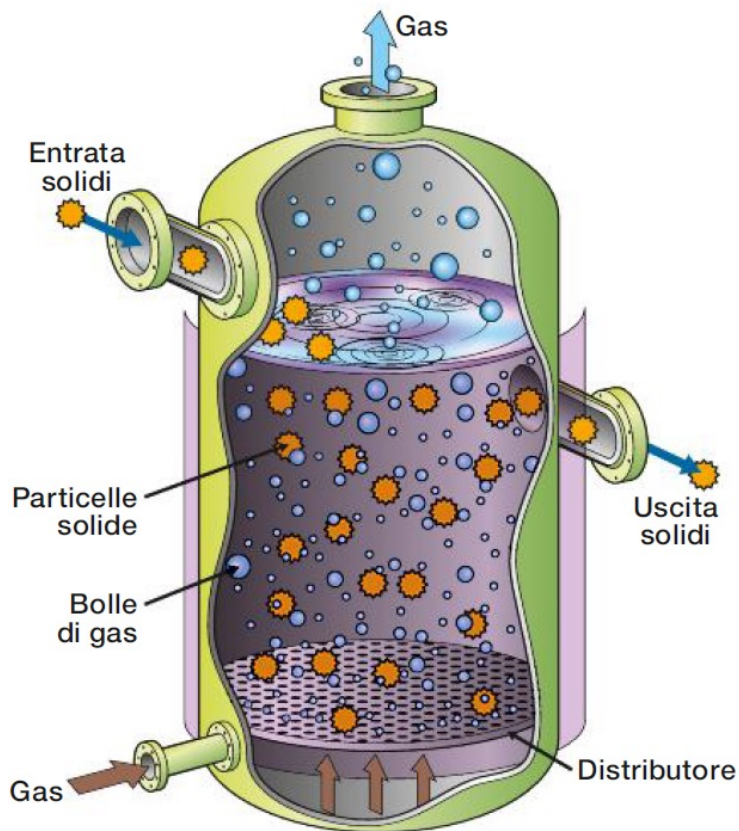


1 Angstrom = 1 Å = 10^{-10} metri

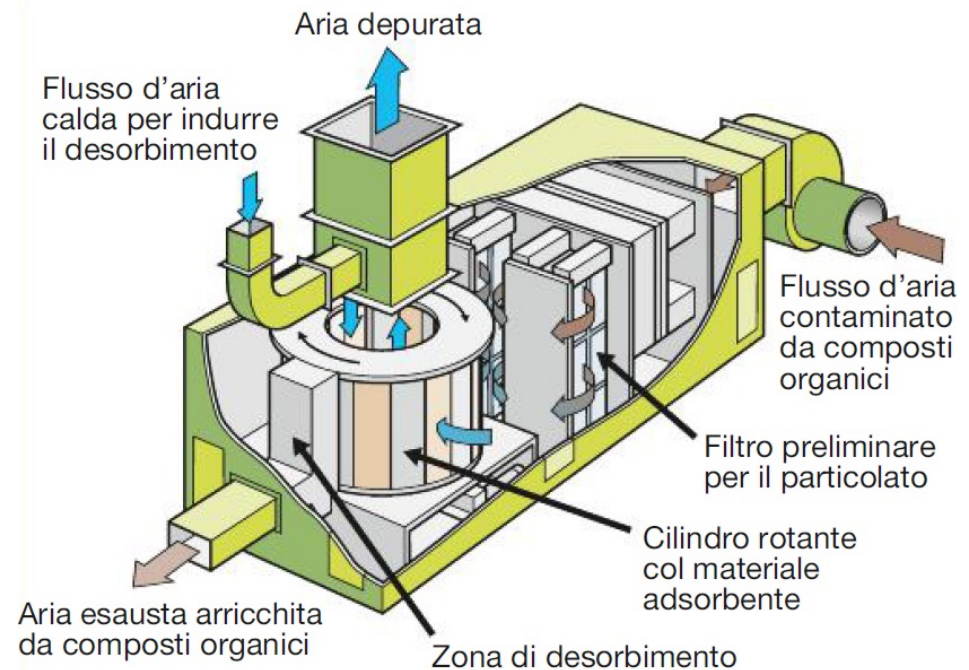
Microstruttura del carbone attivo

Rimozione per adsorbimento su substrato solido /3

Impianto a letto fluido:

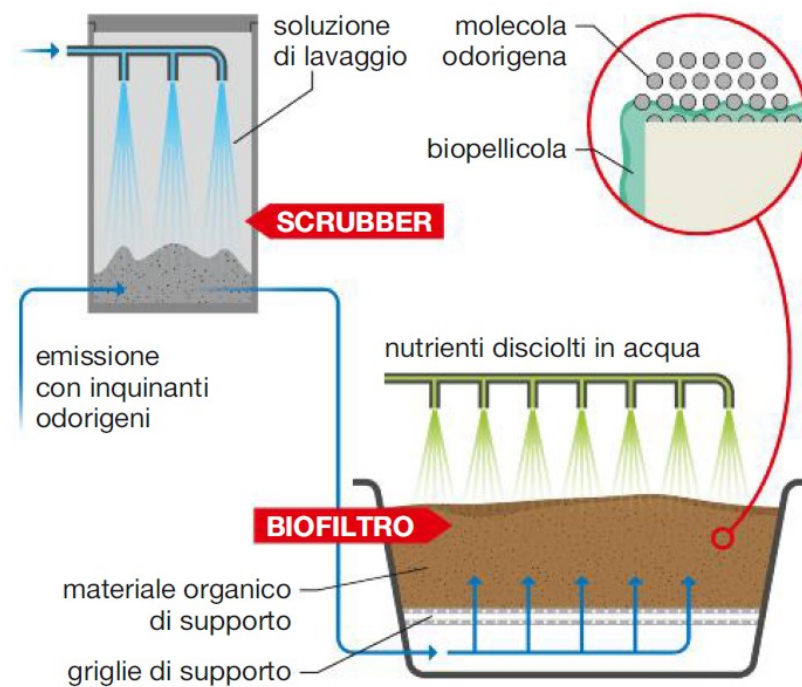
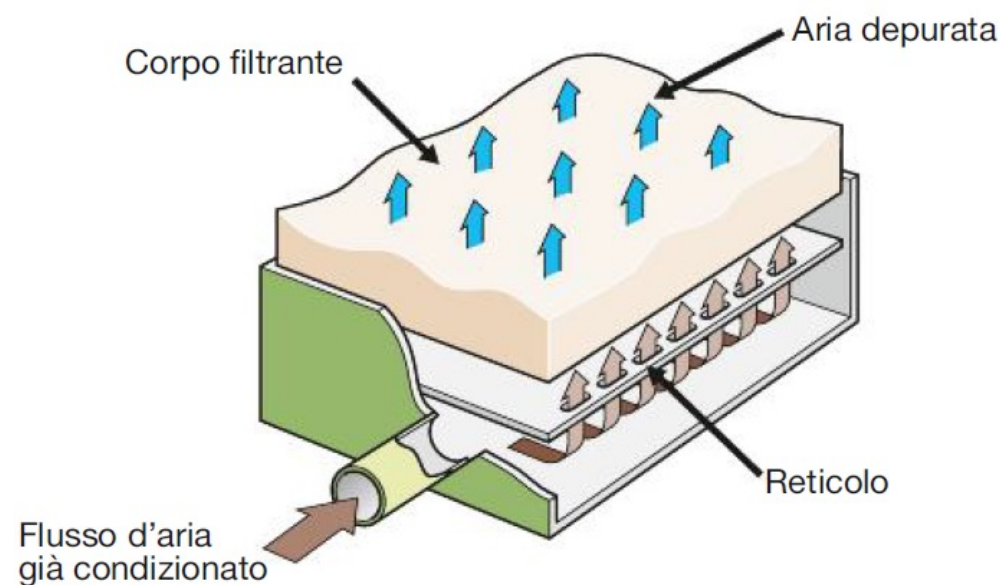


Pannelli di filtri a carbone attivo (rotoconcentratore):



Biofiltrazione delle emissioni inquinanti

La **biofiltrazione** si serve di **microrganismi** (batteri e funghi) che, immobilizzati su substrati solidi porosi, utilizzano gli inquinanti presenti nelle emissioni come sorgente di carbonio ed energia.



Abbattimento per mezzo di condensazione

La **condensazione** dei vapori inquinanti avviene per aumento di pressione e/o per diminuzione di temperatura.

La temperatura alla quale le molecole di vapore si condensano in forma liquida viene detta «temperatura di rugiada».

In base alle tecniche utilizzate per diminuire la temperatura si distinguono:

- **Condensatori convenzionali** (4° C)
- **Condensatori refrigerativi** (-60° C)
- **Condensatori criogenici** (-160° C)

Sistemi di rimozione a umido degli inquinanti /1

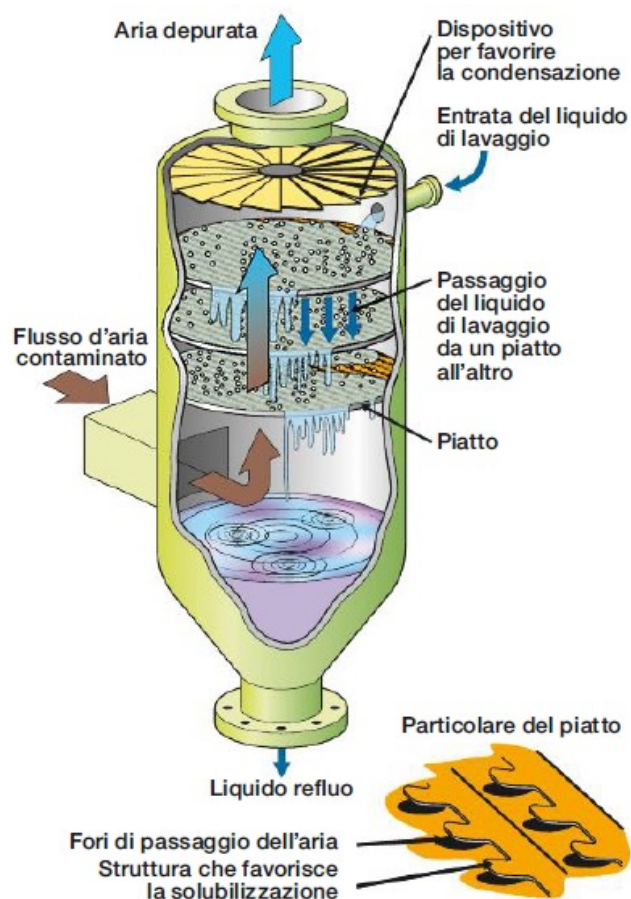
I **sistemi di rimozione a umido** si basano sul principio di abbattimento dei contaminanti presenti in un flusso gassoso per mezzo di un liquido. Utilizzano sistemi diversi, con apparecchiature note come ***scrubber***.

L'assorbente più utilizzato è l'acqua, ma nel caso di idrocarburi scarsamente o per nulla idrosolubili si utilizzano solventi organici.

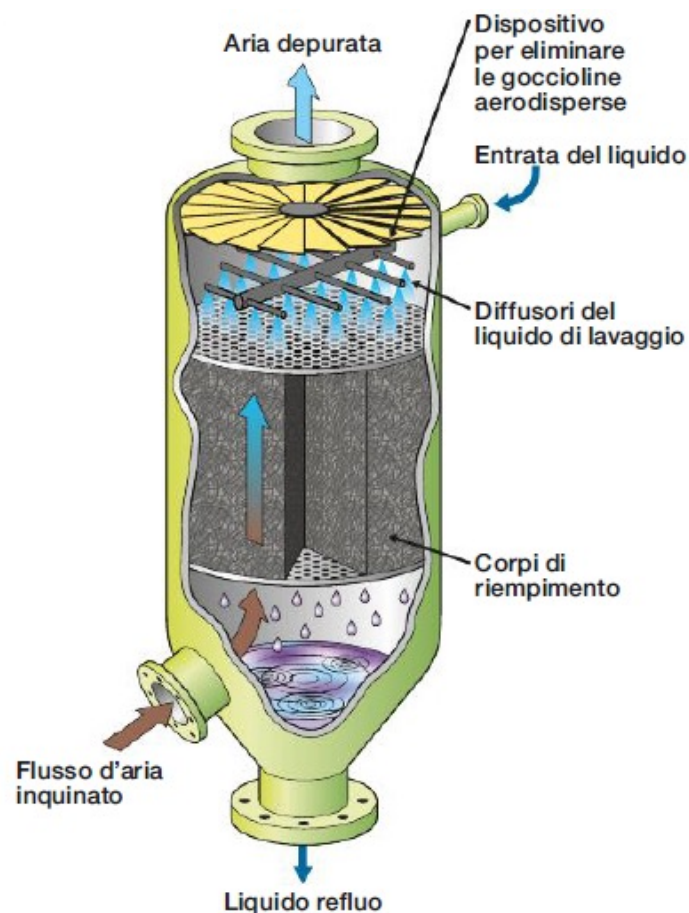
Si producono liquidi reflui che devono essere smaltiti dopo un ulteriore opportuno trattamento.

Sistemi di rimozione a umido degli inquinanti /2

Torre a piatti forati:

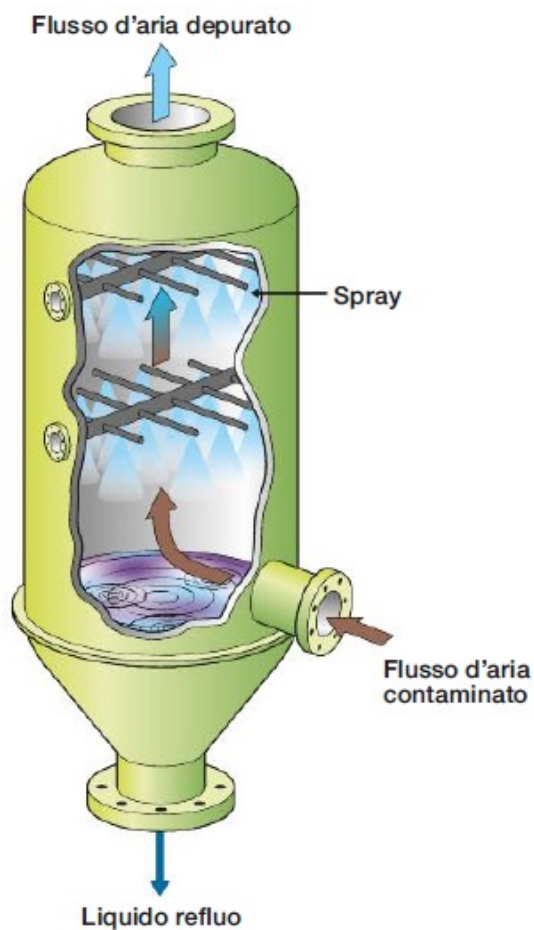


Torre a corpi di riempimento:

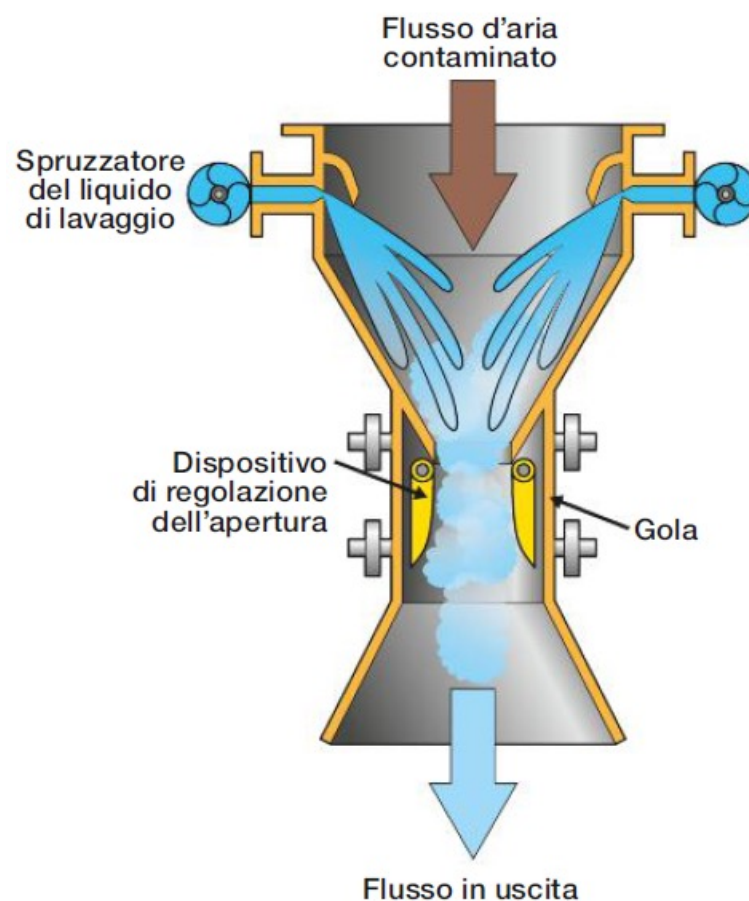


Sistemi di rimozione a umido degli inquinanti /3

Torre a nebulizzazione:



Sistema Venturi:



Combustione dei contaminanti organici /1

Quando non è possibile il recupero dei contaminanti organici presenti nelle emissioni gassose, si attua la loro combustione (**ossidazione a fiamma**).

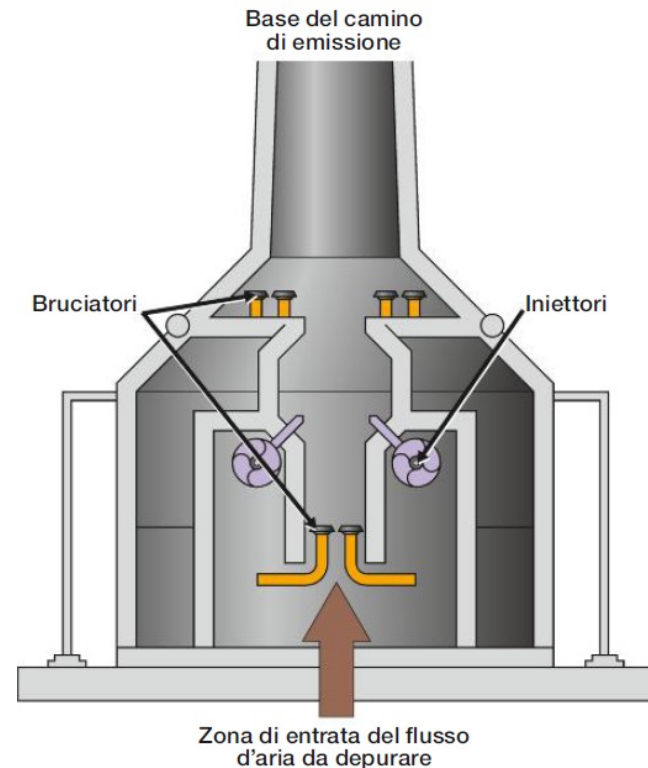
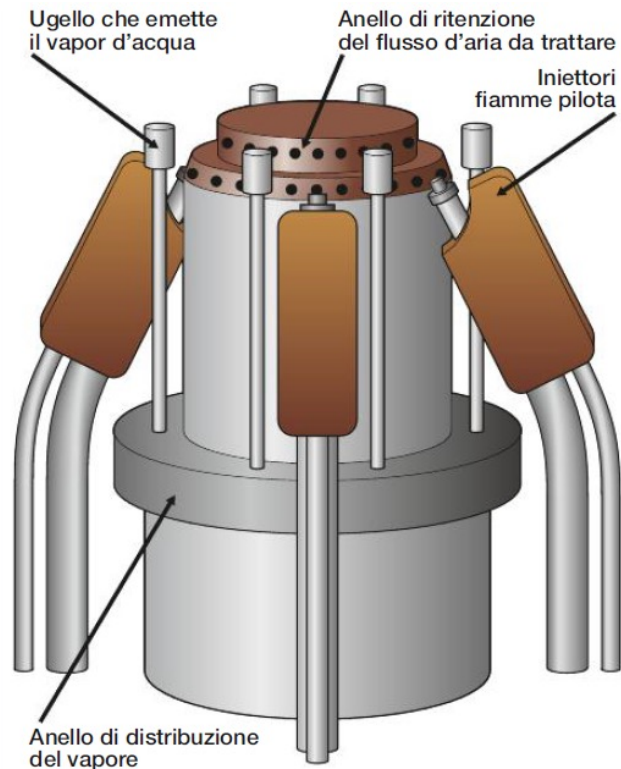
Se gli inquinanti contengono solo carbonio e idrogeno si formano CO_2 e H_2O ; altrimenti si ottengono sostanze ancora pericolose e si procede con una postcombustione.

I processi di combustione sono governati dalla **legge delle tre T**, cioè da tre importanti parametri:

- Temperatura
- Tempo
- Turbolenza

Combustione dei contaminanti organici /2

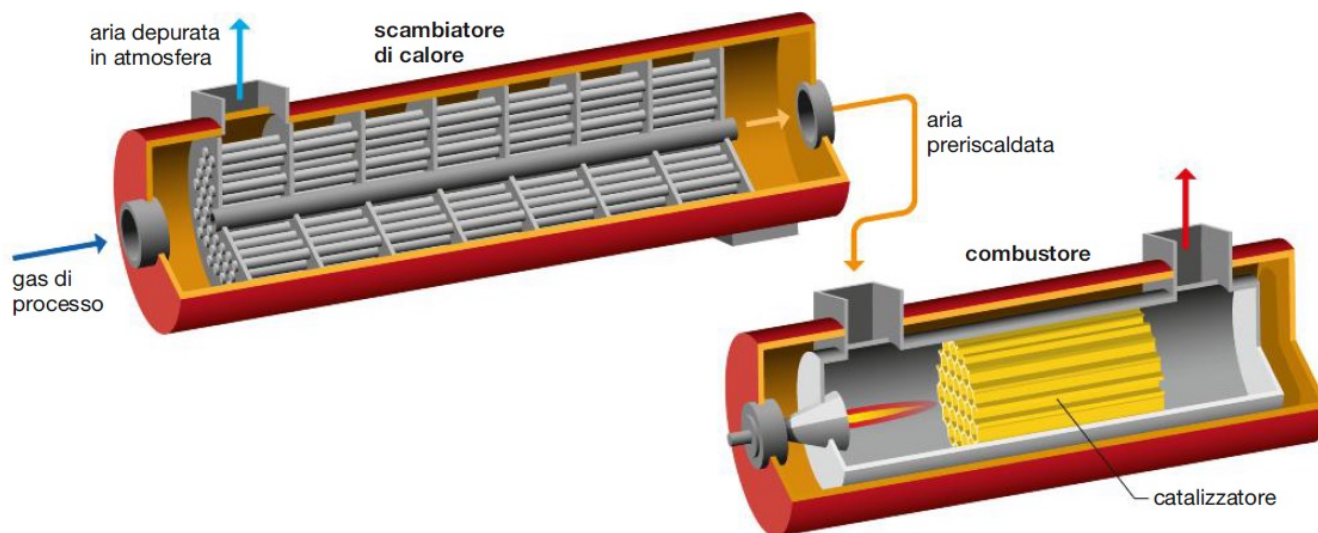
Le torce: in questi sistemi il rifiuto gassoso viene utilizzato come combustibile, brucia e viene emesso direttamente in atmosfera. Esistono **torce elevate** e **torce a terra**:



Combustione dei contaminanti organici /3

Combustori termici: il flusso da trattare viene portato alla temperatura di ossidazione corrispondente a 650-900 ° C.

Combustori catalitici: impiegano catalizzatori in grado di promuovere e accelerare le reazioni chimiche coinvolte nell'ossidazione degli inquinanti.



Rimozione del particolato aerodisperso /1

Il fumo emesso da motori a combustione interna contiene **microparticolato**: microparticelle solide o liquide classificate in base al diametro.

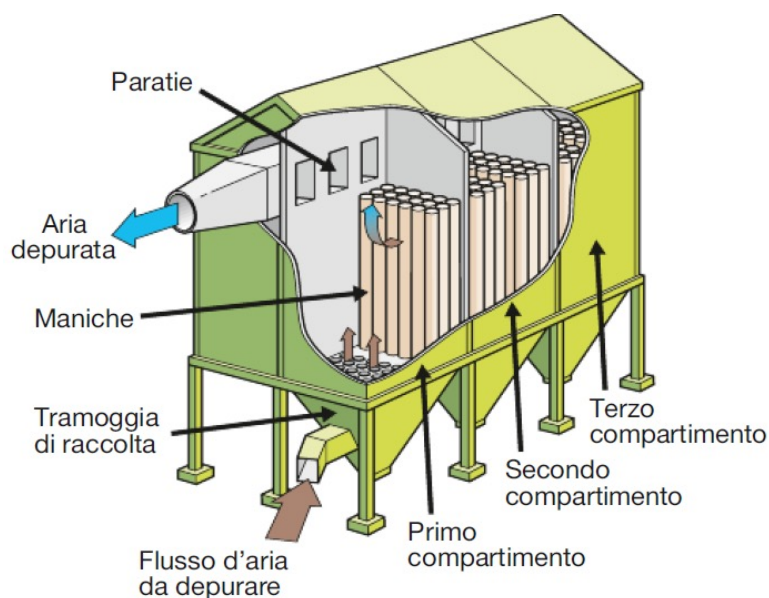
L'**indice PM** (*particulate matter*) esprime la qualità dell'aria attraverso la concentrazione delle microparticelle in sospensione:

- **PM10**: indica la concentrazione di microparticelle con diametro inferiore a 10 μm (comprende le fini e le più piccole fra le grossolane)
- **PM2,5**: comprende solamente le fini

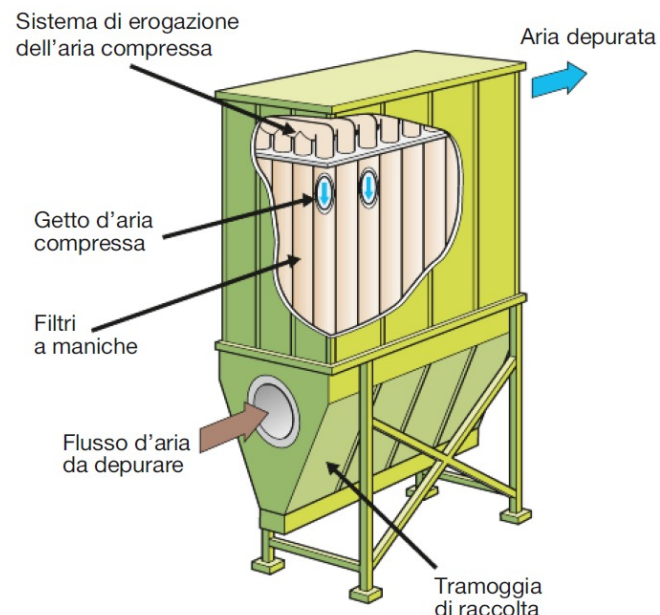
Rimozione del particolato aerodisperso /2

La rimozione del particolato aerodisperso con **filtri tessili** consiste nel fare passare il flusso d'aria da depurare attraverso filtri costituiti da fibre naturali o sintetiche.

Filtri con sistema di pulizia a inversione di flusso:



Filtri con sistema di pulizia ad aria compressa:



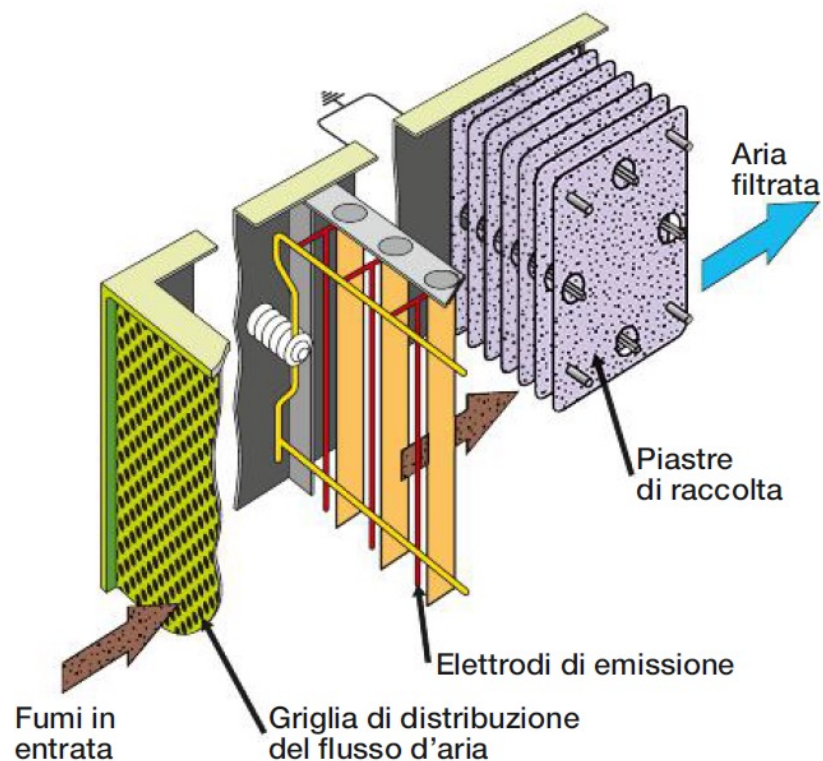
Elettrofiltri per la rimozione di particolato /1

La **precipitazione elettrostatica** viene impiegata per la rimozione di **inquinanti in forma di particolato**.

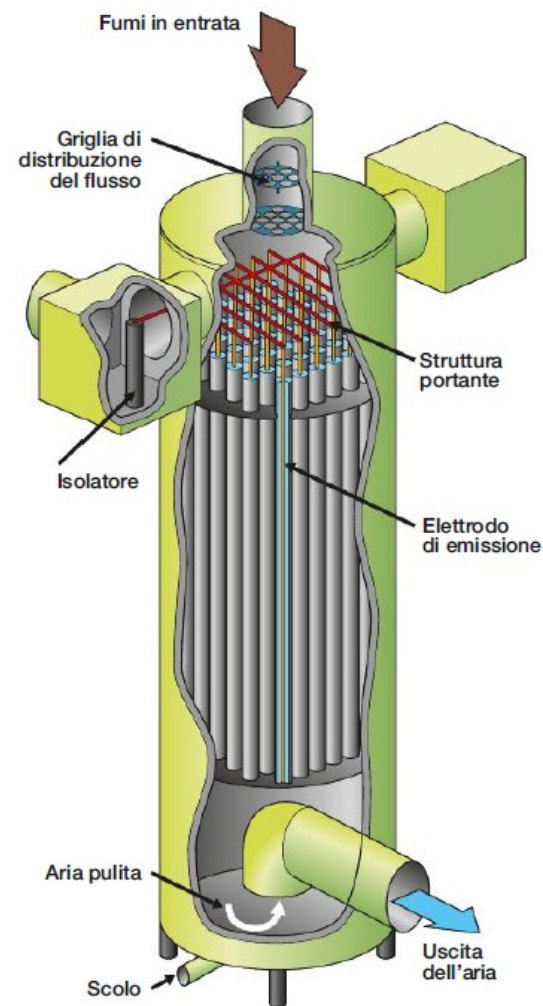
Un campo elettrico ad alta tensione carica positivamente o negativamente le particelle che vengono così attratte da un elettrodo di segno opposto, su cui vanno a depositarsi e da cui sono successivamente allontanate o dilavate con acqua.

Si possono avere elettrofiltri **a secco o a umido, verticali, con corona negativa o positiva**.

Elettrofiltri per la rimozione di particolato /2



Precipitatore elettrostatico a umido a flusso orizzontale



Filtro elettrostatico a umido a corona negativa a flusso discendente