

INQUINAMENTO ATMOSFERICO E CAMBIAMENTO CLIMATICO: RETI DI MONITORAGGIO A SUPPORTO DELLA PROGETTAZIONE DI POLITICHE INTEGRATE

Phd Maria Grazia Perrone – XEarPro Srl

mariagrazia.perrone@xearpro.com

- **Inquinamento Atmosferico e Cambiamento Climatico:** due emergenze critiche con impatti sull' Ambiente e la Salute Umana
- **Sorgenti, Parametri** e diversa **Scala Spazio-Temporale**
- **Piani integrati** per lo studio congiunto dell' Inquinamento Atmosferico e Cambiamento Climatico
- **Sviluppo di reti di misura** locali con centraline multiparametriche e sensoristica "smart"
- **Raccolta ed elaborazione dati** a supporto dell'elaborazione di politiche integrate

INQUINAMENTO ATMOSFERICO

L' inquinamento atmosferico rappresenta il **principale rischio ambientale per la salute umana in tutto il mondo**, e si stima che l'esposizione all' inquinamento atmosferico causi ogni anno milioni di decessi e anni di vita sani persi, alla pari con altri importanti rischi sanitari globali come alimentazione scorretta e fumo di tabacco (WHO, 2021)

- Sulla base di studi tossicologici ed epidemiologici aggiornati, **definizione di nuovi limiti** (air quality guideline AQG) **per inquinanti atmosferici per i quali è stato associato un rischio per la salute pubblica:**
 - **particolato atmosferico (PM₁₀ e PM_{2.5})**
 - **ozono (O₃)**
 - **biossalido di azoto (NO₂)**
 - **biossalido di zolfo (SO₂)**
 - **monossido di carbonio (CO)**



WHO, 2021 <https://iris.who.int/server/api/core/bitstreams/551b515e-2a32-4e1a-a58c-cdaecd395b19/content>

- **Indicazione di nuovi parametri inquinanti da monitorare**, per i quali le informazioni disponibili sono insufficienti per ricavare livelli AQG ma indicano un rischio associato:
- **Black carbon (BC) o Elemental carbon (EC)**
 - **Particelle ultrafine (UFP ultrafine particles)**
 - **Particelle provenienti da tempeste di sabbia e polveri (SDS sand and dust storms)**

Aggiornamento della **Direttiva Europea 2024/2881** sulla qualità dell'aria **per la tutela della salute umana, ambiente, vegetazione ed ecosistemi**

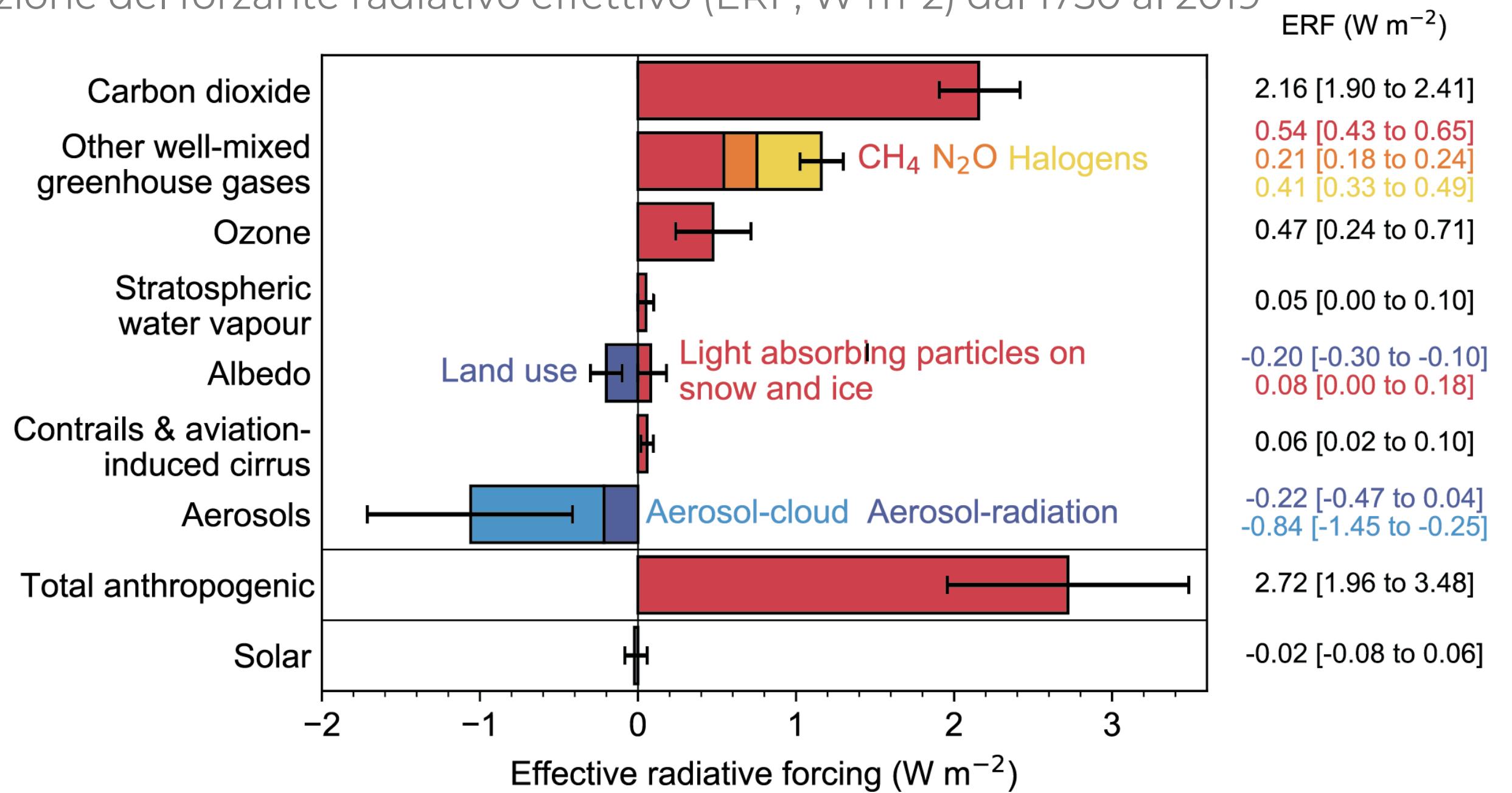


- ✓ **Nuovi standard di qualità dell' aria** (Allegato 1): valori limiti per la protezione della salute umana, vegetazione ed ecosistemi naturali da raggiungere con piani di azione e obiettivi a breve (entro 2026-2030) e lungo termine (entro 2050) Inquinanti regolamentati: PM10, PM2.5, O₃, NO₂, SO₂, CO, benzene, metalli (As, Ni, Cd, Pb) benzo[a]pirene
- ✓ **Raccolta dati di nuovi inquinanti da monitorare** in supersiti (Allegato VII): BC, UFP, ammoniaca (NH₃), mercurio (gassoso e divalente particolato), VOC precursori O₃...

CAMBIAMENTO CLIMATICO

Il riscaldamento del clima della Terra è inequivocabile ed è **evidente l'influenza delle attività umane sul sistema climatico terrestre** (IPCC, Sixth Assessment Report)

Variazione del forzante radiativo effettivo (ERF; W m⁻²) dal 1750 al 2019



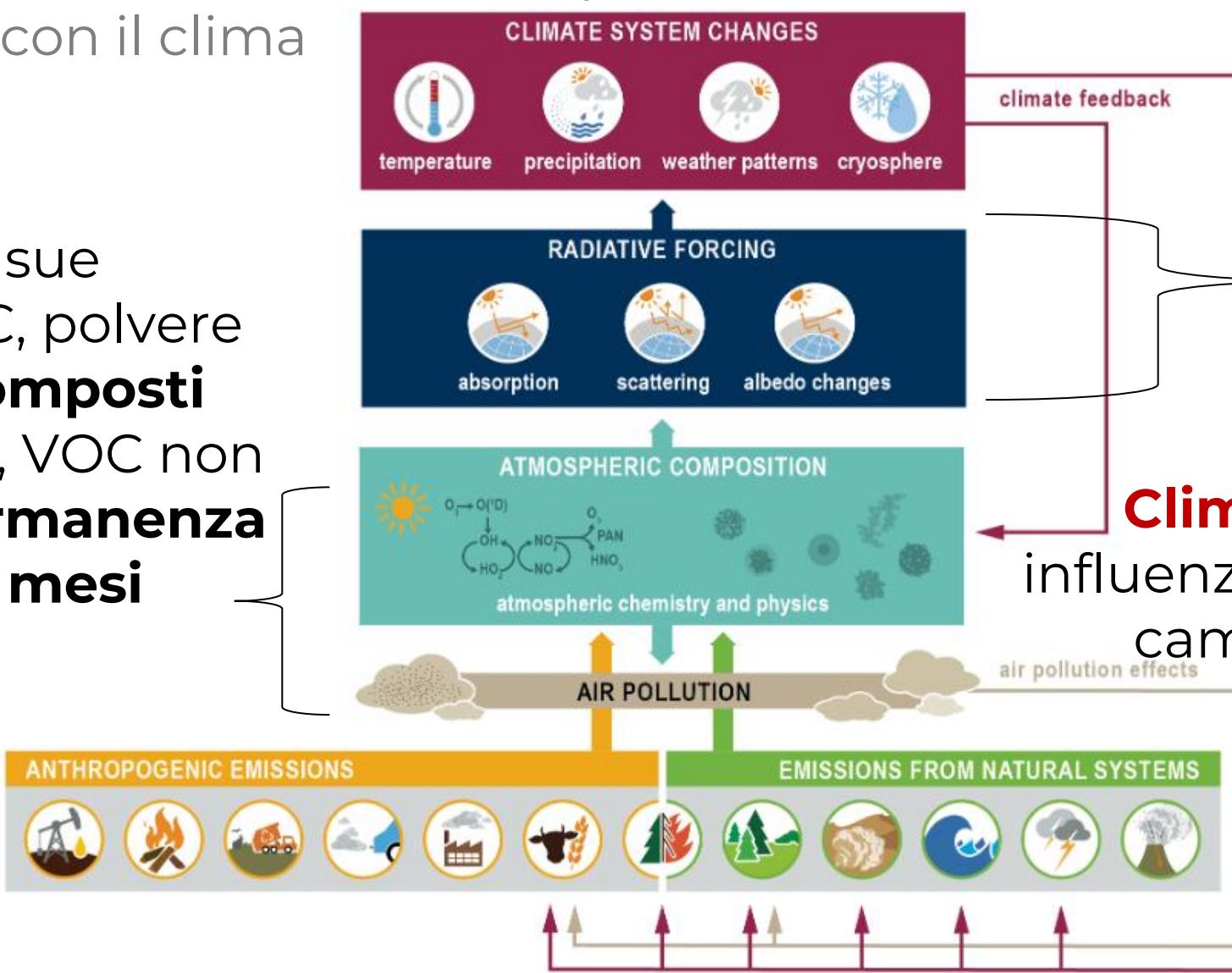
Ref. «Fig.7.6 in IPCC, 2021: Chapter 7. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change»

INQUINAMENTO ATMOSFERICO E CAMBIAMENTO CLIMATICO

Attività antropiche e non sono responsabili delle emissioni di **inquinanti gassosi e particolato (PM)** che modificano la **composizione dell'atmosfera**. Questi cambiamenti, a loro volta, causano il degrado della qualità dell'aria (**Inquinamento Atmosferico**) a scala locale e regionale e influenzano il **Cambiamento Climatico**, con effetti di feedback.

Sorgenti e processi che influenzano le conc. di inquinanti atmosferici con breve tempo di vita (SLCF Short-lived climate forcer) e interazioni con il clima

SLCF: particolato (PM e sue componenti: solfati, nitrati, BC, polvere minerale, spray marino) e **composti gassosi** (CH_4 , O_3 , CO, NOx, SO_2 , VOC non metanici, NH_3 ...). **Tempo di permanenza breve in atm: poche ore- mesi**



Effetto sul clima: SLCF interagiscono con la radiazione solare e terrestre, l'albedo della superficie, le nuvole e le precipitazioni

Climate Feedback: I cambiamenti climatici influenzano i processi atm (trasporto, reattività..) e cambiano gli ecosistemi terrestri e marini

Ref. «Fig.6.1 in IPCC, 2021: Chapter 6. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change»

Principali composti atmosferici in traccia derivanti da attività antropiche: tempo di permanenza ed effetti sulla salute, sugli ecosistemi e sul clima

Composti atmosferici a lungo tempo di vita (> anni)

Composti atmosferici a breve tempo di vita (SLCF)

Composto	Tempo di permanenza in atmosfera	Effetti sulla salute e gli ecosistemi	Effetti sul clima
Biossido di carbonio (CO ₂)	Secoli	Acidificazione dell'oceano, fotosintesi	Riscaldamento
Metano (CH ₄)	8 anni	Precursore di O ₃	Riscaldamento
Ozono (O ₃)	1 mese	Danni alla salute e alla vegetazione	Riscaldamento
Biossido di zolfo (SO ₂)	1 settimana	Danni alla salute, acidificazione degli ecosistemi	Precursore di PM raffreddamento
Ossidi di azoto (NO _x)	1 settimana	Danni alla salute, precursore di O ₃ , effetti sugli ecosistemi	Precursore di PM raffreddamento
Ammoniaca (NH ₃)	1 settimana	Acidificazione degli ecosistemi, eutrofizzazione delle acque	Precursore di PM raffreddamento
<i>Black carbon</i> (BC)	1 settimana	Danni alla salute	Riscaldamento
Composti organici volatili (VOC)	Variabile	Danni alla salute, precursori di O ₃	Precursori di O ₃

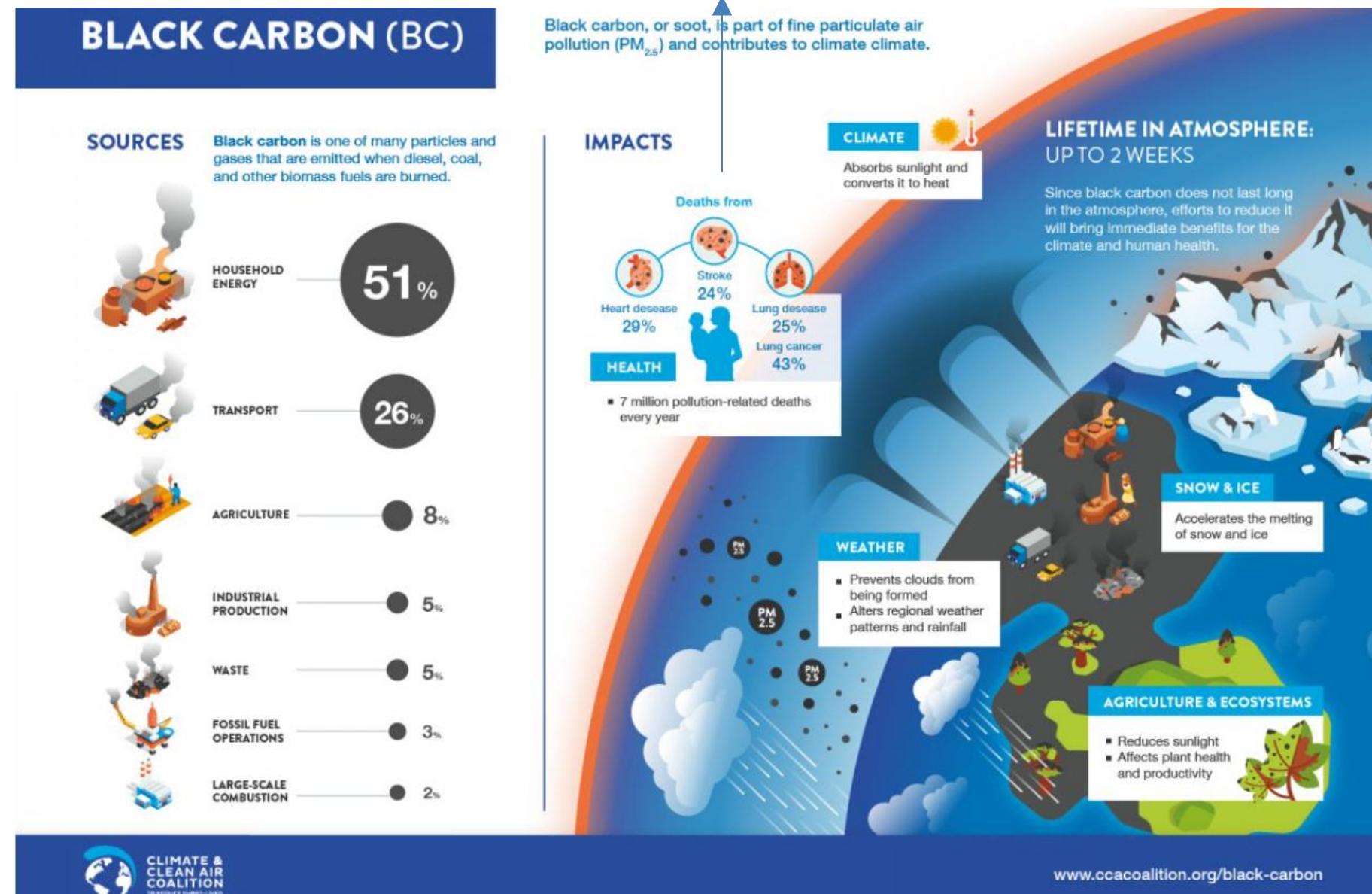
BC: componente del PM. Parte «nera» assorbente

Ref. «Qualità dell'aria e cambiamenti climatici: due facce della stessa medaglia» Ingegneria dell'Ambiente Vol.4 n.4/2017

BLACK CARBON: IMPATTO SULLA SALUTE E SUL CLIMA



Sorgente: processi di combustione: in EU e North USA > 70% da **emissioni diesel**



Ref: Climate and Clean Air Coalition (CCAC)- UNEP convened initiative
<https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/black-carbon>



Effetti sul clima: assorbe la radiazione solare e la converte in calore; **altera l'albedo superficiale**; **riduce la formazione di nuvole**; **impatta sugli ecosistemi** (salute e produttività delle piante)

SORGENTI E POLITICHE COORDINATE DI INTERVENTO

Inquinanti atmosferici e **specie climalteranti** sono generalmente co-emessi dalle stesse sorgenti. Mitigando queste ultime si può, in linea di principio, ottenere un miglioramento della qualità dell'aria e un minore impatto alternato sul clima.

BC e PM : inquinante e **climalterante**

CO₂ : **climalterante**

.....



NO₂ : inquinante

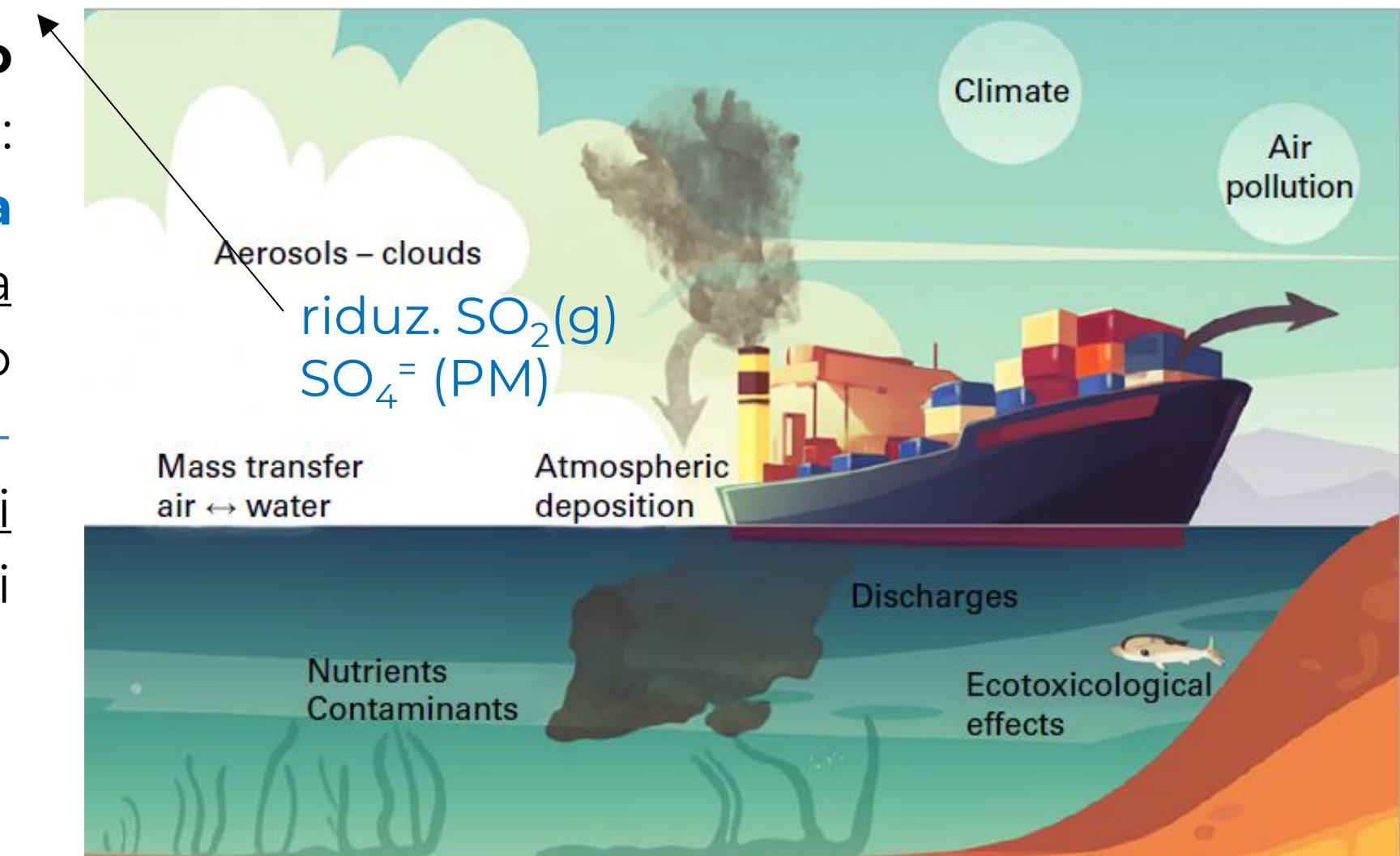
.....

Emissioni da traffico veicolare

Azioni coordinate che tengono conto delle connessioni tra qualità dell'aria e cambiamenti climatici sono la strategia migliore in termini di costi economici e sociali (**politiche WIN-WIN**).

Investire in **politiche WIN-WIN** (rispetto a politiche WIN-LOSE) per migliorare contemporaneamente la qualità dell'aria (su scala locale) e la mitigazione del riscaldamento climatico (su scala globale).

Convenzione internazionale per la **riduzione del contenuto di zolfo nei combustibili** (MARPOL VI): **impatti positivi sulla salute e la qualità dell'aria** ma non sul clima (riduz. $\text{SO}_4^{\text{--}}$: minore effetto raffreddante sul clima) (**WIN-LOSE**) e sugli ecosistemi marini (scarichi scrubber SO_2 installati sulle navi)



Impatti ambientali delle emissioni da traffico navale

Ref. International Maritime Organization (IMO) - ONU. – International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL) – Annex VI Prevention of Air Pollution from Ships

In futuro, politiche per l'uso di combustibili e sistemi di propulsione a basse o zero emissioni di carbonio eliminaranno la necessità di scrubber e avranno **vantaggi sia per il cambiamento climatico che per la qualità dell'aria (WIN-WIN)**

SVILUPPO DI RETI DI MISURA LOCALI CON SENSORISTICA “SMART”

La nuova **Direttiva Europea 2024/2881 sulla qualità dell'aria** (che deve essere recepita dagli Stati Membri entro 11/12/2026) introduce importanti **novità anche nel monitoraggio della qualità dell'aria**, con l'obiettivo di garantire una valutazione più accurata, omogenea ed accessibile in tutta l'Unione Europea.

Rafforzamento delle reti di monitoraggio: **oltre alle misurazioni in siti fissi (rete di monitoraggio ufficiale di riferimento)**, uso della **modellizzazione** e di **misure indicative** per una migliore comprensione della dispersione spaziale e temporale dei livelli di inquinamento.



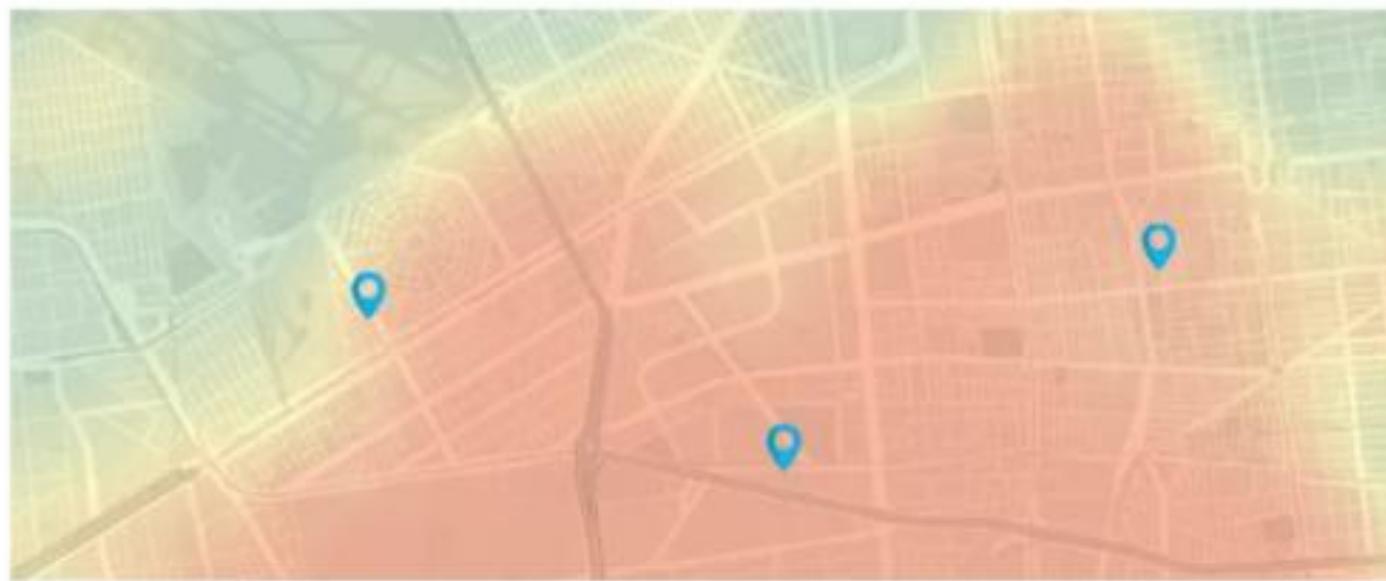
Siti fissi (misure di riferimento)



Sensoristica «smart» (misure indicative*)

* Obiettivi di qualità del dati meno stringenti rispetto a quelli richiesti per le misure di riferimento)

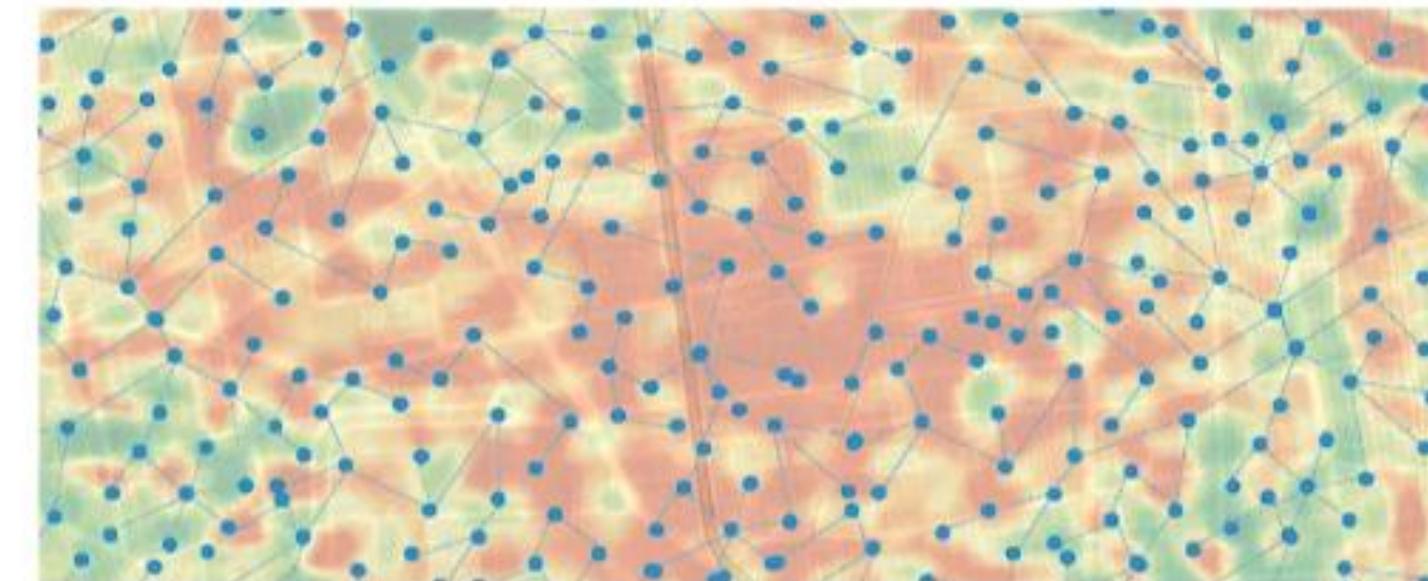
Rete tradizionale di siti fissi (misure di riferimento)



Dati ad elevata accuratezza per raccogliere **dati medi di inquinamento** per una certa area (es. Città), principalmente **per valutare il rispetto dei limiti di concentrazione per gli inquinanti atmosferici regolamentati**.

Le reti tradizioni «perdonano» la definizione degli hotspot (sorgenti) e la distribuzione locale dell'inquinamento

Reti diffuse con sensoristica «smart» (misure indicative)



Ref. Clarity
<https://www.clarity.io/landing-pages/download-guide>

Reti diffuse sul territorio con sensoristica «smart» per il **monitoraggio di più composti chimici (inquinanti atmosferici, climalteranti, sostanze odorigene...) e parametri (meteo, fisici, ambientali)**.

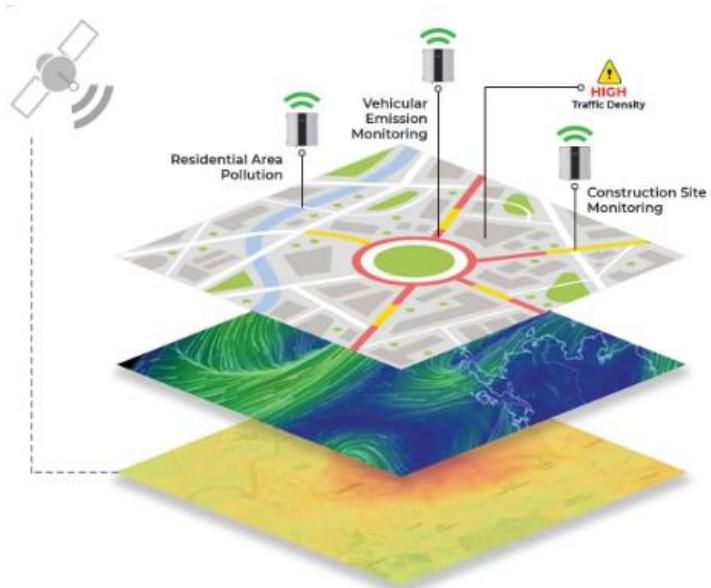
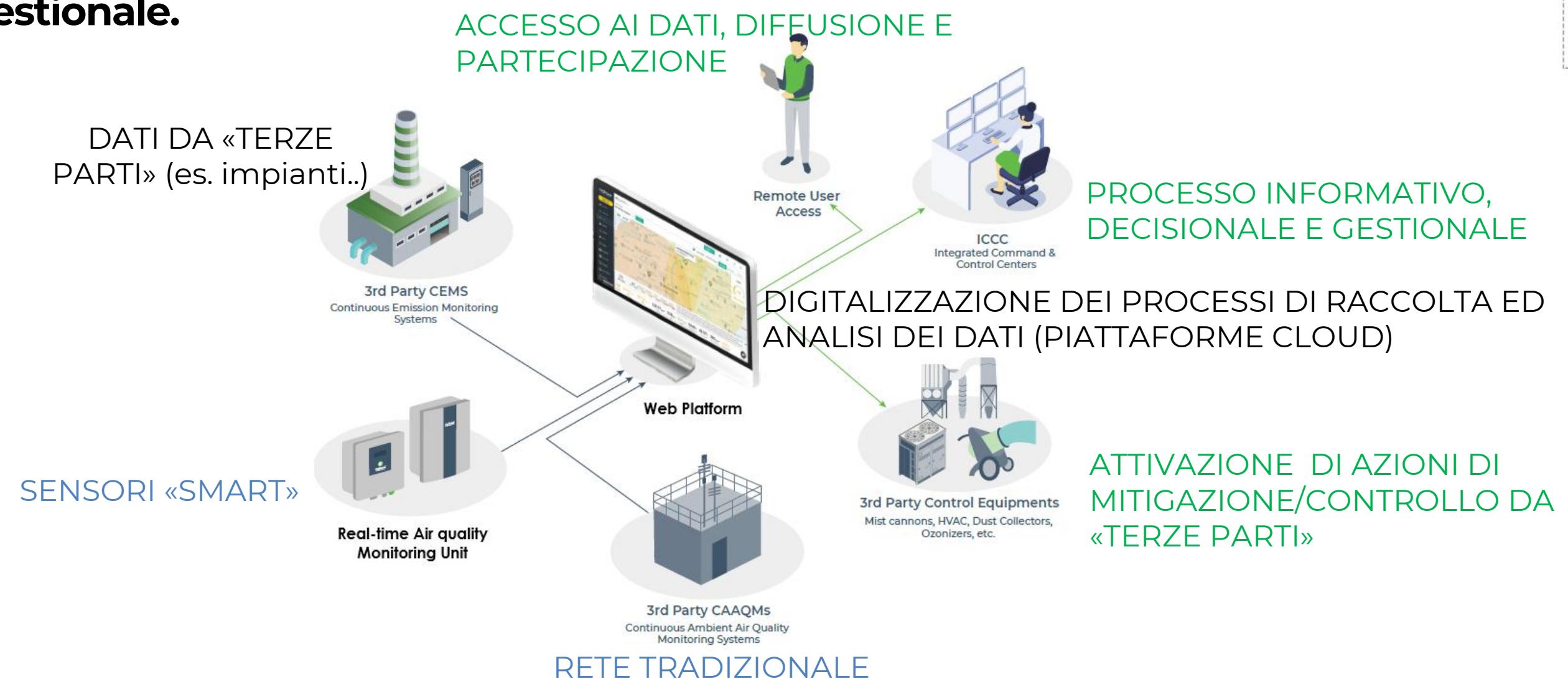
Permettono di raccogliere dati ad alta risoluzione spaziale e temporale e di intervenire sulle cause di inquinamento/fenomeni dove e quando si verificano (es. cantieri, impianti industriali, strade «canyon»...)

SISTEMI INTEGRATI CON STAZIONI IoT



La **sensoristica «smart»** per misure indicative è **integrata in sistemi IoT (Internet of Things)**: permette una **pratica gestione remota** e **un'elevata flessibilità operativa** (può essere distribuita rapidamente, a costi contenuti, per un monitoraggio anche in contesti difficili da raggiungere con le centraline tradizionali).

In sinergia con i dati provenienti dalle centraline fisse e altri sistemi informativi, contribuiscono a costruire un **sistema di sorveglianza più diffuso, partecipativo e resiliente** (condivisione e comunicazione dei dati con diversi stakeholders) e un più **efficace processo decisionale e gestionale**.



RACCOLTA, VALIDAZIONE ED ANALISI DATI

Parametri chimici / singole sostanze



Particolato atmosferico
(PM10, PM2.5, PM1, BC...)



Inquinanti gassosi regolamentati
(NO₂, CO, SO₂, O₃, benzene..)



Sostanze odorigene
(NH₃, H₂S, HCl, CH₃SH, VOC....)



Climalteranti
(CO₂, CH₄...)



Centralina «smart»

Parametri meteorologici



Temperatura, Pressione,
Umidità Relativa



Vento



Pioggia

Parametri fisici



Rumore, vibrazioni

Parametri ambientali



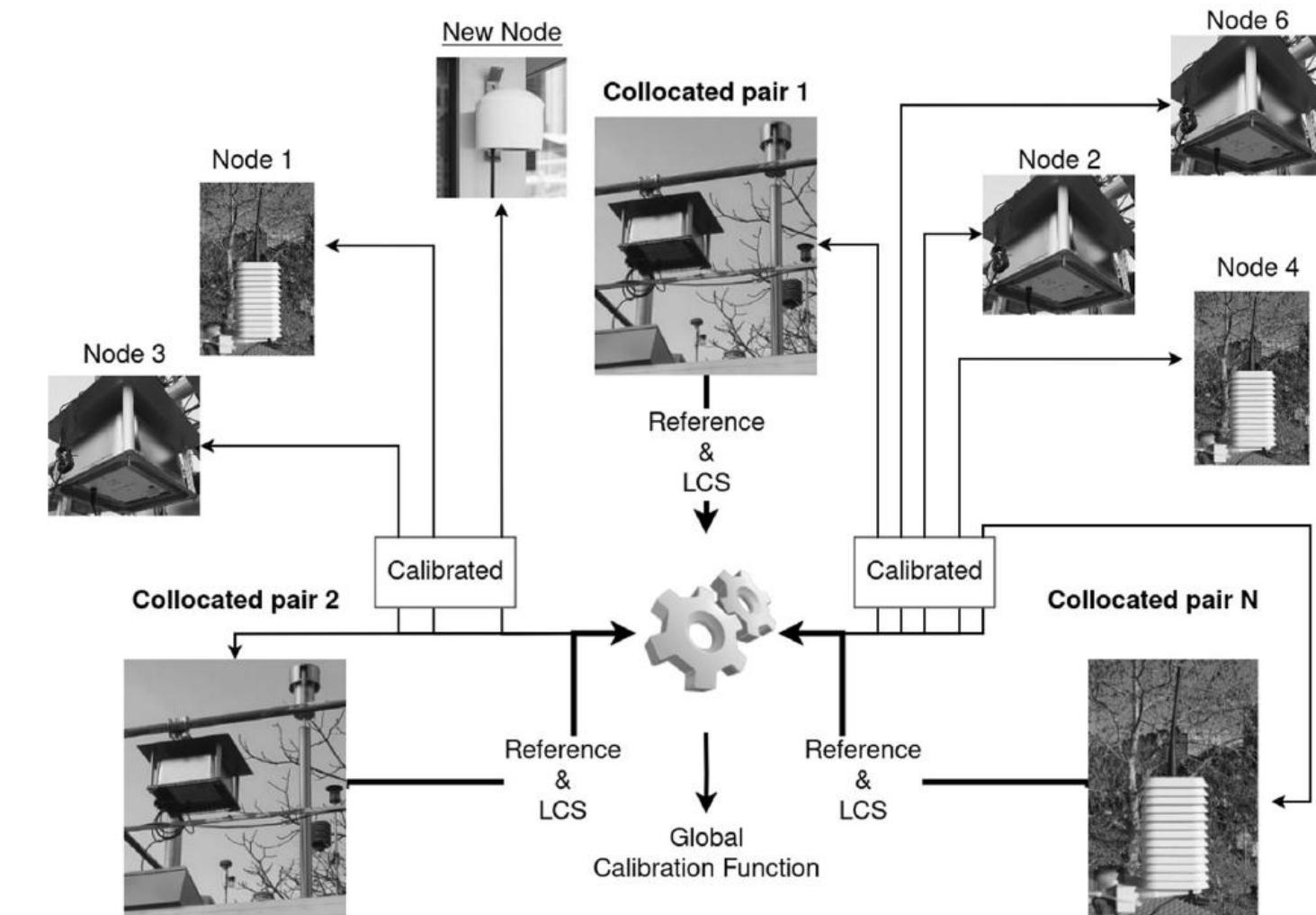
Intensità luminosa, luce visibile,
radiazione UV...

Raccolta di «big data» che permettono di ricavare **molte informazioni utili**, garantendo però un processo di **corretta calibrazione della strumentazione e validazione dei dati** (limite tecnico: deriva dei sensori nel tempo, accuratezza inferiore rispetto ai sistemi di riferimento)

Calibrazione a campo delle centraline «smart» rispetto alle stazioni fisse di riferimento: **studi di co-locazione e funzioni di calibrazione**



Co-locazione presso 1 sito di misura di riferimento



Co-locazione multipla presso più siti e funzione di calibrazione globale con processi di machine learning

Ref. Bagkis E., 2025 «Evolving trends in application of low-cost air quality sensor networks: challenges and future directions.»
<https://doi.org/10.1038/s41612-025-01216-4>

CONCLUSIONI

- **Inquinamento atmosferico e cambiamento climatico**, anche se caratterizzati da diverse scale spazio-temporali, sono **strettamente interconnessi**.
- La **sensoristica smart** permette lo sviluppo di **reti estese per il monitoraggio integrato** ad alta risoluzione temporale e spaziale sul territorio della **qualità dell'aria, singoli composti inquinanti e climalteranti e di variabili climatiche**
- Dati a supporto di **azioni preventive (early-warning) e mirate (site-specific)** per le specifiche criticità sul territorio e per **lo sviluppo di politiche win-win**

Grazie per l'attenzione!

Per maggiori informazioni:
Phd Maria Grazia Perrone – XEarPro Srl
mariagrazia.perrone@xearpro.com