

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale

in Ingegneria per L'Ambiente ed il Territorio

Tesi di Laurea Magistrale

Aria di cambiamento: l'inquinamento atmosferico tra normative europee e didattica scolastica



Relatore

Prof. Ing. Marina Clerico

Candidato

Simone Oliva

Novembre 2025

Sommario

1. Introduzione e obiettivo della tesi
 2. L'inquinamento atmosferico: definizione, cause ed effetti
 - 2.1. Concetto di inquinamento atmosferico
 - 2.2. Le principali fonti antropiche e naturali di inquinamento
 - 2.3. Gli inquinanti: classificazione
 - 2.4. Effetti sull'ambiente e sugli ecosistemi
 - 2.5. Effetti sulla salute umana: rischi acuti e cronici
 3. Il caso della Pianura Padana
 4. Normativa e strumenti di misurazione
 - 4.1 La normativa europea: quadro generale
 - 4.1.1. La Direttiva Europea 50 del 2008
 - 4.1.2. La Direttiva europea 2024/2881
 - 4.2 Confronto tra le direttive 2008/50/CE e (UE) 2024/2881
 - 4.3. La normativa italiana
 - 4.3.1. Decreto Legislativo n° 155 del 2010
 5. Proposta didattica: un modulo interdisciplinare per le scuole secondarie
 - 5.1. Obiettivi formativi del modulo
 - 5.2. Destinatari e competenze in uscita
 - 5.3. Struttura del modulo
 - 5.3.1. Lezione frontale introduttiva
 - 5.3.2. Escursioni e visite guidate presso enti di ricerca e di monitoraggio
 - 5.3.3 Laboratori pratici nelle singole discipline
 - 5.3.4 Progetto didattico
 - 5.4.Valutazione degli apprendimenti
 - 5.4.1. Lezione introduttiva
 - 5.4.2. Escursioni e visite tecniche
 - 5.4.3. Laboratori pratici
 - 5.4.4. Project-Based Learning (realizzazione del dispositivo di monitoraggio della qualità dell'aria)
 - 5.4.5. Valutazione finale e autovalutazione
 6. Conclusioni
- Bibliografia

Capitolo 1 — Introduzione e obiettivo della tesi

La diffusione e la comprensione delle normative ambientali rappresentano un aspetto fondamentale per la loro reale efficacia. La Direttiva (UE) 2024/2881, ad esempio, prevede misure specifiche per informare il pubblico riguardo alle concentrazioni degli inquinanti atmosferici e ai potenziali impatti sulla salute umana e sugli ecosistemi. Il linguaggio tecnico-giuridico impiegato, tuttavia, si rivela spesso complesso e poco accessibile a un pubblico non specializzato. Questo lavoro di tesi si propone di analizzare nel dettaglio la normativa europea per quanto concerne la tutela della qualità dell'aria e successivamente di proporre un articolato progetto didattico interdisciplinare, destinato agli studenti della scuola secondaria di secondo grado, al fine di sensibilizzare le nuove generazioni di fronte all'importante tema dell'inquinamento dell'aria.

Capitolo 2 — L'inquinamento atmosferico: definizione, cause ed effetti

2.1. Concetto di inquinamento atmosferico

Per inquinamento atmosferico si intende la contaminazione ambientale dovuta ad agenti chimici, fisici e biologici che modificano le caratteristiche e la composizione dell'atmosfera. Si tratta di sostanze che possono trovarsi in differenti stati di aggregazione o stati fisici (solido, liquido e aeriforme) e che mettono a rischio la quasi totalità della popolazione mondiale, specialmente nelle aree urbane. Questo dato deve far riflettere poiché più della metà della popolazione urbana vive attualmente in città sovraffollate con elevati livelli di inquinamento atmosferico¹⁰. Questa tendenza tenderà ad aumentare nei prossimi decenni con conseguenze rilevanti per quanto concerne la qualità dell'aria.

L'inquinamento atmosferico rappresenta la principale minaccia a livello globale per quanto concerne la salute umana e una delle principali cause di morte e malattie¹. In base alle stime dell'Organizzazione Mondiale della Sanità l'effetto combinato dell'inquinamento *indoor* e *outdoor* determina la morte prematura di circa 7 milioni di persone ogni anno a causa di malattie cardiache, infarto, malattie croniche all'apparato respiratorio, tumori polmonari e infezioni acute nei bambini. In base a queste stime le morti superano quelle di altre malattie quali malaria, tubercolosi e AIDS messe assieme.

2.2. Le principali fonti antropiche e naturali di inquinamento

Il principale responsabile dell'inquinamento atmosferico è senza alcun dubbio l'uomo che provoca, direttamente e indirettamente, l'incremento delle sostanze disperse nell'aria: si tratta di particelle gassose, liquide e solide prodotte dalle attività industriali e agricole e dal massiccio utilizzo dei combustibili fossili in ogni ambito dell'economia. A queste sorgenti antropiche si vanno ad aggiungere quelle dovute a fenomeni naturali quali i pollini, le spore, le ceneri vulcaniche, le polveri sollevate dal vento e gli incendi boschivi, in forte aumento a livello globale a seguito dell'innalzamento delle temperature medie. Indipendentemente dall'origine queste sostanze inquinanti non hanno un impatto localizzato al sito in cui sono state prodotte. Difatti i gas si mescolano e si disperdono nell'atmosfera con grande facilità, le sostanze liquide, sotto forma di aerosol, e quelle solide, in forma di particelle di dimensioni micrometriche, entrano in sospensione nell'aria e possono essere trasportate per distanze molto lunghe e propagarsi grazie alle correnti di alta quota per migliaia di chilometri.

2.3. Gli inquinanti: classificazione

A seguire viene riportata la classificazione degli inquinanti in funzione della loro origine.

Inquinanti primari e secondari

Per inquinanti primari si intendono tutte quelle sostanze che vengono emesse direttamente da sorgenti definite, ad esempio le polveri sottili (PM_{10} , $PM_{2,5}$), l'anidride carbonica, gli ossidi di azoto e dello zolfo. Diversamente gli inquinanti secondari si formano nella bassa atmosfera (troposfera, che si estende dal suolo fino a 10 km di altezza in media) a seguito di reazioni chimiche. Tra gli esempi più rilevanti citiamo la formazione dell'ozono troposferico, particolarmente nocivo per la salute umana di bambini, anziani e persone con patologie all'apparato respiratorio. Gli inquinanti secondari sono complessi da monitorare e controllare perché si formano a seguito di diversi processi non sempre compresi appieno ^{4,8,9}.

Per quanto concerne la classificazione e descrizione dei principali inquinanti atmosferici la letteratura scientifica e le normative fanno riferimento alle seguenti sostanze:

- **Particolato (PM_{10} e $PM_{2,5}$):**

- **Descrizione:** Il particolato atmosferico è una complessa miscuglio eterogeneo di particelle solide e liquide sospese nell'aria. Si classifica in base al diametro delle stesse: PM₁₀ (particelle con diametro < a 10 µm) e PM_{2.5} (particelle con diametro < a 2,5 µm). La frazione PM_{2.5} è definita "fine" e include particelle primarie (emesse direttamente) e secondarie (formate in atmosfera da reazioni chimiche di precursori gassosi).
- **Composizione:** Può includere solfati, nitrati, ammonio, carbonio (organico ed elementare), metalli, composti organici complessi, polvere minerale e acqua.
- **Fonti antropiche:** Traffico veicolare (emissioni da scarico, usura pneumatici e freni), combustione di biomasse (riscaldamento domestico, incendi), processi industriali, agricoltura (polveri da lavorazioni, emissioni zootecniche). Per quanto riguarda le sorgenti indoor si segnala l'emissione di PM₁₀ correlata all'utilizzo delle fotocopiatrici negli uffici.
- **Fonti naturali:** erosione eolica del suolo, spray marino.
- **Impatti:** PM_{2.5} è particolarmente pericoloso per la salute poiché può penetrare in profondità nell'albero bronchiale e raggiungere gli alveoli polmonari. Le sostanze inquinanti possono infine penetrare nei capillari alveolari e raggiungere ogni distretto del corpo umano. Causa malattie respiratorie croniche (asma, bronchite), cardiovascolari (infarti, ictus), e neurodegenerative.
- **Stato attuale e tendenze future:** Le emissioni di particolato sono diminuite del 30% per il PM₁₀ e del 32% per il PM_{2.5} tra il 2005 e il 2020. Le emissioni da trasporto di PM₁₀ e PM_{2.5} sono diminuite rispettivamente del 46% e del 58% tra il 1990 e il 2022 . Tuttavia, una preoccupazione crescente riguarda la frazione non da scarico di queste emissioni (dovuta all'usura di freni e pneumatici o all'abrasione stradale), che sta aumentando in percentuale e ha costituito il 75% delle emissioni di PM₁₀ e il 59% delle emissioni di PM_{2.5} dal trasporto stradale nel 2022. Fonte: European Environment Agency ¹¹

- **Biossido di Azoto (NO₂):**

- **Descrizione:** Gas di colore bruno-rossastro (specialmente ad alte concentrazioni), con odore pungente e irritante. È uno dei principali ossidi di azoto (NO_x), che si formano prevalentemente come monossido di azoto (NO)

durante la combustione ad alta temperatura, seguito dalla sua ossidazione ad NO_2 in atmosfera.

- **Fonti:** Principalmente processi di combustione, in particolare motori a combustione interna (traffico veicolare), centrali termoelettriche, impianti industriali.
- **Meccanismi di Formazione:** Gli NO_x si formano per ossidazione dell'azoto atmosferico (N_2) o dell'azoto presente nel combustibile in condizioni di temperature elevate. L' NO rilasciato da fonti antropiche reagisce con l'ozono o radicali per formare NO_2 .
- **Impatti:** Forte irritante per le vie respiratorie, può aggravare l'asma e causare bronchite. È un precursore chiave per la formazione di ozono troposferico e particolato secondario (nitrati), e contribuisce alle piogge acide e all'eutrofizzazione degli ecosistemi.
- **Stato attuale e tendenze future:** Le emissioni di NO_x sono diminuite del 48% tra il 2005 e il 2020.² Il trasporto stradale rimane la fonte principale, responsabile del 37% delle emissioni nel 2020. Le emissioni da trasporto sono diminuite del 51% tra il 1990 e il 2022 . Fonte: European Environment Agency

11

- **Biossido di Zolfo (SO_2):**

- **Descrizione:** Gas incolore, non infiammabile, dall'odore pungente. È un inquinante primario.
- **Fonti:** Combustione di combustibili fossili ad alto contenuto di zolfo (carbone, petrolio, gasolio) in centrali elettriche e impianti industriali.
- **Meccanismi di Formazione:** Lo zolfo presente nei combustibili reagisce con l'ossigeno durante la combustione.
- **Impatti:** Irritante per il sistema respiratorio, causa broncocostrizione e aggravamento dello stato di salute nei soggetti che soffrono di asma. È il principale precursore delle piogge acide (attraverso la reazione con il vapore acqueo presente in atmosfera si può formare acido solforico) e della formazione di solfati, che costituiscono una frazione significativa del particolato secondario fine, e può danneggiare la vegetazione.
- **Stato attuale e tendenze future:** Questo inquinante ha registrato una delle riduzioni più significative negli ultimi anni, con un calo del 79% tra il 2005 e il

2020.² Questa diminuzione è principalmente imputabile alla riduzione dell'utilizzo del carbone nel settore energetico, a seguito delle politiche di decarbonizzazione. Fonte: CEIP, Centre on Emission Inventories and Projections, che fa parte dell'EMEP (Programma Europeo per il monitoraggio e la valutazione dell'inquinamento atmosferico a lungo raggio)¹²

- **Ozono (O₃) Troposferico:**

- **Descrizione:** Gas bluastro, estremamente reattivo e dall'odore penetrante. Sebbene sia nota la sua capacità di schermare la radiazione ultravioletta a livello stratosferico, quando si forma nella troposfera costituisce un inquinante secondario con forte potere ossidante.
- **Meccanismi di Formazione:** Non è emesso direttamente ma si forma in atmosfera tramite complesse reazioni fotochimiche che coinvolgono ossidi di azoto (NO_x) e composti organici volatili (COV) in presenza di luce solare intensa. Le temperature elevate e le giornate soleggiate, tipiche del periodo estivo, favoriscono la sua formazione.
- **Impatti:** Essendo un potente ossidante, danneggia le membrane cellulari del tessuto polmonare, causando infiammazione, riduzione della funzionalità dei polmoni e peggioramento delle malattie respiratorie. A livello ambientale, può avere un impatto negativo sulla vegetazione (riduzione della fotosintesi, necrosi fogliare) e può compromettere la resa delle colture e la salute degli ecosistemi forestali.³

- **Benzene (C₆H₆):**

- **Descrizione:** Composto organico volatile (COV) aromatico, liquido, incolore, infiammabile, con un caratteristico odore dolciastro. È un idrocarburo costituito da un singolo anello aromatico.
- **Fonti:** Emissioni da scarico dei veicoli (in particolare dai motori a benzina), evaporazione di carburanti, processi industriali (produzione di materie plastiche, gomme, coloranti, ecc.).
- **Impatti:** È un cancerogeno umano noto (classificato come Gruppo 1 dall'IARC), associato a leucemia e altri disordini ematologici. È anche neurotossico e può causare problemi al sistema immunitario¹³.

Risulta particolarmente problematico per le categorie professionali che entrano a contatto con gli idrocarburi (ad esempio gli addetti dei distributori)¹⁴.

- **Monossido di Carbonio (CO):**

- **Descrizione:** Gas incolore, inodore, insapore e altamente tossico. Di fatto rappresenta un veleno.
- **Fonti:** Combustione incompleta di combustibili a base di carbonio, come quella che avviene nei motori dei veicoli, apparecchiature di riscaldamento mal funzionanti, incendi boschivi.
- **Meccanismi di Formazione:** Si forma ogni qualvolta il tenore di ossigeno non è sufficiente per consentire la completa ossidazione del carbonio a CO₂.
- **Impatti:** Estremamente pericoloso per la salute umana a causa dell'elevata affinità con l'emoglobina del sangue, circa 200 volte superiore a quella dell'ossigeno. Ciò riduce drasticamente la capacità del sangue di trasportare ossigeno ai tessuti e agli organi vitali, portando a ipossia, vertigini, nausea, perdita di coscienza e, a concentrazioni elevate, morte¹⁵. Ogni anno di registrano incidenti, talvolta mortali, a causa di intossicazioni da monossido di carbonio.

- **Arsenico (As):**

- **Descrizione:** Elemento appartenente ai semimetalli, tossico che può esistere in forme organiche e inorganiche. Le forme inorganiche risultano maggiormente tossiche.
- **Fonti:** Principalmente emissioni da fonderie di metalli non ferrosi, combustione di carbone, produzione di cemento, utilizzo di insetticidi e erbicidi contenenti arsenico.
- **Impatti:** È un cancerogeno noto che può favorire l'insorgenza di tumori polmonari, cutanei e vescicali. In alcuni casi si deposita anche sul suolo e nell'acqua, accumulandosi nelle reti trofiche.

- **Cadmio (Cd):**

- **Descrizione:** Metallo pesante tossico che si trova raramente allo stato elementare in natura.

- **Fonti:** Fonderie di metalli non ferrosi, incenerimento di rifiuti, combustione di combustibili fossili, produzione di fertilizzanti fosfatici.
- **Impatti:** È un cancerogeno noto. Si accumula nei tessuti e ha un'emivita biologica molto lunga.

- **Piombo (Pb):**

- **Descrizione:** Metallo pesante ad alta densità. Sebbene l'uso di piombo nella benzina come antidetonante sia stato drasticamente ridotto o eliminato, rimane un inquinante significativo.
- **Fonti:** Ceramiche e vernici, fonderie di piombo-zinco, riciclaggio di batterie al piombo, produzione di vetro, residui della combustione di carburanti (in passato).
- **Impatti:** Neurotossico, particolarmente dannoso per lo sviluppo neurologico in fase evolutiva. Può portare ad una significativa riduzione del QI e problemi comportamentali. Causa inoltre anemia, ipertensione, disfunzioni renali e problemi a livello dell'apparato riproduttore. Permane a lungo nell'ambiente e nel corpo umano.

- **Nichel (Ni):**

- **Descrizione:** Metallo appartenente agli elementi di transizione. Nell'aria, si trova principalmente sotto forma di particelle disperse.
- **Fonti:** Processi di combustione (centrali a carbone, inceneritori), fonderie, raffinerie di petrolio, produzione di leghe.
- **Impatti:** L'esposizione al nichel può causare asma e bronchite. Alcuni composti di nichel sono classificati come cancerogeni per l'uomo, in particolare per le alte vie respiratorie (cavità orale, faringe e laringe).

- **Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) (con Benzo(a)pirene come marker):**

- **Descrizione:** Gli IPA sono un vasto gruppo di composti organici contenenti più anelli benzenici. Si formano dalla combustione incompleta di materiale organico. Il Benzo(a)pirene (BaP) è uno degli IPA più studiati e viene

utilizzato come indicatore del rischio complessivo associato all'esposizione agli IPA nell'aria.

- **Fonti:** Traffico veicolare (specialmente motori diesel), combustione di biomasse (legna da ardere, carbone per riscaldamento), processi industriali (produzione di coke, catrame), incendi boschivi.
- **Impatti:** Molti IPA sono cancerogeni (in particolare a livello polmonare), e possono avere effetti tossici sul sistema immunitario e riproduttivo.

Gli effetti di arsenico, cadmio, piombo, mercurio, nichel e idrocarburi policiclici aromatici sono anche dovuti alla deposizione e accumulo a livello del suolo e delle falde freatiche.

- **Particolato Ultrafine (UFP):**

- **Descrizione:** Particelle con diametro inferiore a 0,1 micrometri (100 nanometri). Costituiscono la frazione più abbondante del particolato atmosferico.
- **Fonti:** Principalmente processi di combustione ad alta temperatura (motori a combustione interna, specialmente diesel), processi industriali.
- **Impatti:** A causa delle loro dimensioni estremamente piccole, gli UFP possono penetrare in profondità nell'albero bronchiale, raggiungendo gli alveoli polmonari e di conseguenza il flusso sanguigno. In alcuni casi possono addirittura attraversare la barriera emato-encefalica. Si ritiene che possano aumentare la probabilità di contrarre patologie riguardanti l'apparato cardiovascolare, respiratorio e il sistema nervoso. Tuttavia, il loro impatto sulla salute deve ancora essere indagato a fondo.

- **Particolato Carbonioso / Carbonio Elementare (BC/EC):**

- **Descrizione:** Componenti del particolato fine e ultrafine derivanti dalla combustione incompleta di combustibili fossili e biomasse. Il carbonio nero (Black Carbon, BC) è un forte assorbitore di luce, mentre il carbonio elementare (Elemental Carbon, EC) è una misura del carbonio puro nelle particelle.
- **Fonti:** Emissioni da scarico di veicoli diesel, combustione di biomasse, processi industriali.

- **Impatti:** Contribuisce significativamente al riscaldamento globale (essendo un potente assorbitore di radiazioni solari) e alla formazione di smog. Per la salute, è associato a problemi respiratori e cardiovascolari, essendo una componente significativa del $PM_{2.5}$.
- **Ammoniaca (NH_3):**
 - **Descrizione:** Gas incolore con odore pungente caratteristico. È un inquinante gassoso.
 - **Fonti:** Le principali emissioni di ammoniaca provengono dal settore agricolo (fertilizzanti azotati, deiezioni animali, allevamenti intensivi). Altre fonti includono processi industriali e decomposizione di materia organica.
 - **Impatti:** Sebbene a basse concentrazioni non sia direttamente tossica per l'uomo, l'ammoniaca è un precursore fondamentale per la formazione di particolato fine secondario nell'atmosfera, reagendo con acidi (come l'acido solforico e l'acido nitrico) per formare nitrati e solfati di ammonio, che contribuiscono all'inquinamento da $PM_{2.5}$. Contribuisce infine all'eutrofizzazione dei corpi idrici, specialmente dove non è presente un sufficiente ricambio d'acqua..
- **Mercurio (Hg):**
 - **Descrizione:** Metallo pesante presente in diverse forme (elementare, inorganico, organico), ognuna con proprietà e tossicità diverse. Il mercurio elementare (Hg) è volatile e può essere trasportato a lunghe distanze nell'atmosfera.
 - **Fonti:** Combustione di carbone (la principale fonte antropica), produzione di cemento, incenerimento di rifiuti, estrazione mineraria (oro e mercurio), processi industriali.
 - **Impatti:** Estremamente tossico, specialmente la forma organica (metilmercurio), che si bioaccumula e si bioconcentra nelle reti trofiche (es. nei pesci). Causa gravi danni neurologici, renali e al sistema immunitario.

2.4. Effetti sull'ambiente e sugli ecosistemi

L'inquinamento atmosferico può avere un impatto diretto sull'ambiente, con effetti che spaziano dall'aumento delle temperature globali, causato dall'incremento di anidride carbonica, alla rarefazione dello strato di ozono stratosferico. Inoltre, alcuni inquinanti atmosferici, reagendo con l'umidità dell'aria, possono generare il fenomeno delle piogge acide, che possono manifestare i loro effetti nocivi anche a notevoli distanze dal sito di emissione. Sono noti, inoltre, effetti negativi sulle colture agricole, sugli animali selvatici e sugli ecosistemi marini. Di seguito vengono illustrati in dettaglio i principali fenomeni ⁷.

Cambiamento climatico

Uno degli effetti più noti dell'inquinamento atmosferico è l'aumento della concentrazione di anidride carbonica e di altri gas serra di origine antropica (ad esempio metano, idrofluorocarburi, protossido di azoto, ecc.), che intensificano l'effetto serra naturale. L'aumento delle temperature medie globali sta già producendo conseguenze sempre più evidenti: intensificazione di eventi meteorologici estremi (ondate di calore, siccità, alluvioni, uragani), fusione dei ghiacci marini e continentali, innalzamento del livello del mare, acidificazione degli oceani, incremento del numero di migranti ambientali, perdita e spostamento di habitat naturali, con conseguenti impatti sulla biodiversità animale e vegetale. Anche la produttività agricola e la salute umana sono messe a rischio da questi cambiamenti, basti pensare all'aumento dell'incidenza di malattie virali veicolate da vettori animali (ad esempio Dengue, Zika, Chikungunya, West Nile).

Rarefazione dello strato di ozono

Lo strato di ozono stratosferico svolge un ruolo fondamentale nella protezione della vita sulla Terra, schermando la superficie dalla componente ultravioletta (UV) dello spettro elettromagnetico provenienti dal Sole. Tuttavia, alcune sostanze di sintesi, come i clorofluorocarburi (CFC), impiegati in passato in refrigeranti, schiume isolanti, estintori, solventi, pesticidi e come propellenti per aerosol, hanno contribuito alla rarefazione dello strato di ozono, causando il cosiddetto "buco" dell'ozono.

La riduzione dello strato di ozono comporta un aumento dell'esposizione ai raggi UV, con conseguente incremento di patologie tumorali della pelle, cataratta e danni agli ecosistemi.

Per contrastare questo fenomeno, è stato adottato il Protocollo di Montréal, entrato in vigore nel gennaio 1989 e ratificato da 197 Paesi, tra cui l'Italia. Il protocollo stabilisce le modalità e le scadenze per l'eliminazione progressiva della produzione e dell'uso delle sostanze che riducono l'ozono. Grazie a queste misure, negli ultimi anni si osservano segnali di lento e costante aumento della concentrazione di ozono.

Smog fotochimico

A livello stratosferico l'ozono è fondamentale per l'umanità; tuttavia, al suolo, nella bassa troposfera, possono avvenire reazioni chimiche — favorite dalle elevate temperature e dalla presenza di inquinanti primari — che generano ozono in concentrazioni potenzialmente nocive. Questo ozono è pericoloso per la salute delle persone e dannoso per la vegetazione e gli animali ⁸. La foschia che si forma, soprattutto durante il periodo estivo, prende il nome di smog fotochimico.

Fuliggine o particolato

La fuliggine o particolato è costituita da minuscole particelle solide, liquide o aeriformi trasportate nell'aria. Le sorgenti possono essere sia antropiche (fabbriche, centrali elettriche, autoveicoli, inceneritori, caldaie) sia naturali (eruzioni vulcaniche, incendi, tempeste di sabbia). Numerose indagini hanno dimostrato che il particolato ha effetti negativi sulla salute umana, provocando malattie respiratorie e cardiovascolari, e sugli ecosistemi acquatici e terrestri.

Piogge acide

La combustione di combustibili fossili immette nell'aria grandi quantità di ossidi di azoto (NO_x) e ossidi di zolfo (SO_x). Questi gas reagiscono con l'acqua presente nell'atmosfera, formando rispettivamente acido nitrico e acido solforico. Le piogge acide possono cadere al suolo sotto forma di precipitazioni “bagnate” (pioggia e neve) o “secche” (depositi di gas e particolato).

Esse hanno effetti dannosi sugli ecosistemi lacustri e fluviali, riducendo il pH delle acque e danneggiando le comunità ittiche, sulle foreste e sui suoli, impoverendone la fertilità. Inoltre, la loro blanda azione corrosiva provoca danni anche ai monumenti, alle statue e agli edifici storici.

Effetti sulle coltivazioni e sulla vegetazione arborea

Alcuni inquinanti possono modificare il pH del suolo, rendendolo perlopiù acido e talvolta sterile. L'ozono troposferico, l'anidride solforosa, i fluoruri, l'ammoniaca, il cloro e il particolato possono causare danni significativi alla vegetazione, sia erbacea che arborea, tra cui: riduzione della crescita fogliare, maggiore predisposizione a malattie e parassiti, fino alla morte nei casi più gravi. Ciò compromette sia gli ecosistemi naturali sia la produzione agricola ⁸.

Effetti sulla fauna selvatica

Oltre agli esseri umani, anche gli animali selvatici sono esposti agli inquinanti atmosferici, soprattutto in ambienti urbani o prossimi a siti industriali. Le sostanze tossiche possono accumularsi nei tessuti degli animali attraverso l'aria, l'acqua e gli alimenti contaminati, causando infezioni, intossicazioni, alterazioni comportamentali e talvolta spostamenti forzati in cerca di habitat più salubri.

Nei sistemi acquatici, il deposito di inquinanti sulle superfici di laghi, fiumi e mari ha effetti negativi sulle popolazioni ittiche, compromettendo anche risorse alimentari importanti per l'uomo.

2.5. Effetti sulla salute umana: rischi acuti e cronici

La qualità dell'aria rappresenta una componente fondamentale della salute pubblica e dell'integrità ambientale in Europa. Nonostante i progressi compiuti, l'inquinamento atmosferico persiste come il principale rischio ambientale per la salute nel continente. Le sue conseguenze sono tangibili e misurabili in termini di impatto sulla vita umana. L'impatto sulla salute umana, così come precedentemente detto sull'ambiente, è dovuto alle concentrazioni e alla deposizione.

Tra i rischi dovuti ad un'esposizione a breve termine vi sono la riduzione della funzionalità polmonare e l'aumento del rischio di infezioni respiratorie come riporta l'OMS ¹⁶

Inoltre l'esposizione a livelli eccessivi di inquinanti può causare effetti a lungo termine come malattie croniche che l'OMS suddivide in cardiovascolari (ictus, cardiopatia ischemica), respiratorie (broncopneumopatia cronica ostruttiva - BPCO , cancro ai polmoni) e neurologiche quali morbo di Parkinson ⁶ o danni cerebrali ⁴

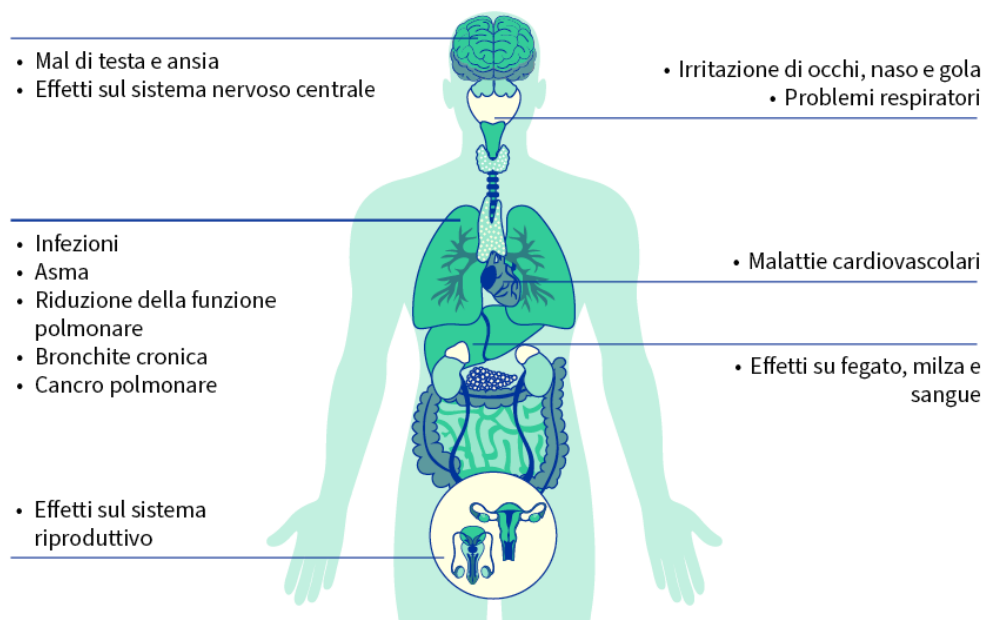


Fig 01: Conseguenze sulla salute umana a seguito dell'esposizione a sostanze inquinanti presenti nell'aria¹⁷

Nello specifico il $PM_{2.5}$ è particolarmente pericoloso per la salute poiché possono penetrare in profondità nei bronchioli e negli alveoli polmonari, entrando talvolta nel circolo sanguigno. Invece l'Ozono O_3 , essendo un potente ossidante, può danneggiare le membrane cellulari del tessuto polmonare, causando infiammazione, riduzione della funzionalità polmonare e peggioramento del quadro clinico qualora il soggetto sia affetto da malattie respiratorie croniche.

Mentre il biossido di azoto NO_2 , essendo un forte irritante per le vie respiratorie, può aggravare l'asma e causare bronchite. Si stima che l'esposizione a livelli di particolato fine ($PM_{2.5}$), ozono e biossido di azoto superiori alle raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) abbia causato rispettivamente circa 239.000, 70.000 e 48.000 decessi prematuri nel 2022¹⁸. Particolarmente preoccupante è l'impatto sui più giovani, con oltre 1.200 decessi stimati in persone di età inferiore ai 18 anni ogni anno nei paesi membri e collaboratori dell'Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA). Questi dati preoccupanti inducono alla riflessione e sottolineano l'importanza delle politiche finalizzate a migliorare la qualità dell'aria.

La tabella seguente illustra l'impatto significativo di alcuni inquinanti presenti in atmosfera sulla salute umana in Europa, fornendo il contesto per comprendere l'importanza degli sforzi di riduzione delle emissioni.

Inquinante	Decessi Prematuri Stimati (2022)	Note
PM _{2.5}	239.000	Il numero di decessi attribuibili al PM _{2.5} nell'UE è diminuito del 45% tra il 2005 e il 2022.
Ozono	70.000	
Biossido di Azoto	48.000	
Totale (sotto i 18 anni)	> 1.200	Decessi stimati in persone sotto i 18 anni nei paesi membri e collaboratori dell'EEA.

Tabella 01 : Decessi Prematuri Stimati Attribuibili ai Principali Inquinanti Atmosferici in Europa (2022) ¹⁸

Capitolo 3 — Il caso della Pianura Padana

Un rapporto pubblicato nel 2019 dall'Agenzia Europea dell'Ambiente ha evidenziato come il Bacino Padano, l'area compresa tra la catena alpina, l'Appennino settentrionale e il mare Adriatico, rappresenti la zona più inquinata d'Europa, a causa delle elevate concentrazioni di polveri sottili (PM_{10} e $PM_{2,5}$). Oggi, l'elevato livello di inquinamento atmosferico ha conseguenze sempre più gravi sulla salute della popolazione: in particolare, l'incidenza dell'asma allergica nei bambini è aumentata in modo significativo, colpendo attualmente circa un bambino su dieci oltre i sei anni di età ².

Secondo i dati più recenti dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, circa 3,7 milioni di persone residenti nel Nord Italia, su una popolazione complessiva di circa 27 milioni, sono esposte a concentrazioni di inquinanti atmosferici superiori ai limiti stabiliti dalla normativa vigente.

Le ragioni di questa situazione non risiedono unicamente nel livello delle emissioni, che grazie alle politiche di mitigazione e al progresso tecnologico, sono diminuite negli ultimi trent'anni, bensì nelle caratteristiche orografiche del territorio. La particolare conformazione geografica della Pianura Padana e le condizioni meteorologiche tipiche della stagione invernale, come il fenomeno dell'inversione termica e la scarsa ventilazione, ostacolano la dispersione degli inquinanti, favorendone l'accumulo nei bassi strati dell'atmosfera. Questa scarsa diluizione comporta un sensibile peggioramento della qualità dell'aria, con ricadute documentate sia a livello ambientale sia sulla salute dei cittadini.

Di fronte a un quadro così critico e preoccupante, le strategie di mitigazione devono necessariamente muoversi su un doppio binario: da un lato, proseguire nella riduzione delle emissioni attraverso l'efficientamento dei processi produttivi, la transizione energetica e il miglioramento dei sistemi di mobilità; dall'altro, sviluppare soluzioni innovative per favorire la dispersione e la riduzione degli inquinanti già presenti nell'atmosfera ².

Nel 2017, le Regioni del Bacino Padano hanno sottoscritto con il Ministero dell'Ambiente un nuovo accordo (che ha aggiornato quello precedente del 2013) finalizzato alla definizione e all'implementazione di misure di contenimento specifiche per i principali settori responsabili delle emissioni, tra cui i trasporti, l'agricoltura e la combustione di biomasse per il riscaldamento domestico.

A supporto di queste politiche, dal 2017 al 2024, tutte le Regioni del Bacino Padano, insieme alle rispettive Agenzie Regionali per la Protezione Ambientale (ARPA) e alle città metropolitane di Torino, Milano e Bologna, hanno aderito al progetto europeo PREPAIR (*Po*

Regions Engaged to Policies of Air), cofinanziato dall'Unione Europea ¹⁹. Questo progetto rappresenta un importante esempio di cooperazione interregionale finalizzata a coordinare le politiche di miglioramento della qualità dell'aria e a monitorare l'efficacia.

L'Accordo di Bacino e il progetto PREPAIR hanno individuato come prioritari i seguenti settori di intervento per la riduzione delle emissioni e del loro impatto a livello atmosferico:

- combustione di biomasse legnose per il riscaldamento domestico;
 - trasporto di persone e merci su gomma;
 - riscaldamento civile e uso dell'energia nelle abitazioni;
 - processi industriali ed energetici;
- pratiche agricole, in particolare la gestione degli effluenti zootecnici e delle concimazioni azotate.

Queste misure riflettono la necessità di un approccio integrato e multisettoriale alla questione dell'inquinamento atmosferico, che consideri non solo la riduzione delle emissioni alla fonte, ma anche il miglioramento delle condizioni ambientali locali per favorire una maggiore resilienza del territorio.



Fig. 02: Immagine satellitare della Pianura Padana in presenza di smog ²⁰

Eventi significativi a livello globale, come ad esempio il caso della pandemia da COVID-19, hanno avuto un impatto temporaneo ma marcato per quanto concerne la qualità dell'aria nella Pianura Padana.

L'Ispira (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) nel suo primo rapporto nazionale di sistema sulla qualità dell'aria ("La qualità dell'aria in Italia - I edizione

2020") ha riportato che durante il lockdown dovuto al COVID-19, si è osservata una significativa diminuzione del biossido di azoto (NO_2), inquinante derivante dal traffico veicolare. Dal rapporto emerge un calo medio nazionale di circa il 40% per l' NO_2 , con picchi superiori al 70% in prossimità di importanti arterie stradali. Questa diminuzione è direttamente correlata alla drastica riduzione dei trasporti durante il lockdown del mese di marzo e aprile 2020: a partire da metà marzo, i flussi di traffico leggero sono calati di circa il 70% e quelli pesanti del 38% a livello nazionale. Di conseguenza, anche i consumi di benzina, gasolio e GPL sono diminuiti notevolmente rispetto all'anno precedente.

Nel Bacino Padano, le analisi del progetto Life Prepair¹⁹ hanno confermato questo trend, riscontrando una riduzione settimanale massima fino al 40% per gli ossidi di azoto. Si è notato come la concentrazione giornaliera media di NO e NO_2 sia diminuita gradualmente da gennaio a maggio, con una diminuzione particolarmente rilevante da marzo 2020. Il confronto con i dati del periodo 2016-2019 ha mostrato concentrazioni abbondantemente inferiori alla media e prossime ai valori minimi. Questo dimostra chiaramente che, per ridurre l' NO_2 in atmosfera, è necessario agire sul settore dei trasporti. L'indagine Ispra si è soffermata anche sul particolato (PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$), particelle di polveri prodotte principalmente da combustioni, traffico veicolare, industrie e riscaldamento. A differenza degli ossidi di azoto, la dinamica del particolato è fortemente influenzata dalle condizioni meteorologiche. Ad esempio, a fine marzo 2020, una depressione ciclonica ha contribuito a portare sabbia dalla regione caucasica e/o dal deserto del Sahara, causando un innalzamento delle polveri nel Nord-Centro Italia. Nel Bacino Padano, il PM_{10} ha mostrato un andamento più complesso, con un brusco calo a fine febbraio dovuto a un importante rimescolamento delle masse d'aria. Nonostante le misure di contenimento abbiano portato a una riduzione della domanda di energia elettrica (rispettivamente del 10,2% e 17,2% a marzo e aprile) e della produzione di energia termoelettrica (16% e 21,4%), la produzione industriale è diminuita a marzo del 28,2% rispetto allo stesso periodo del 2019. Tuttavia, il riscaldamento civile non è diminuito, e nel mese di marzo ha registrato un incremento del 4,6% dei consumi di gas. Questo sottolinea come, anche con una riduzione delle emissioni dovuta al lockdown, le condizioni meteorologiche di stagnazione, tipiche della Pianura Padana, e il persistente consumo per il riscaldamento domestico possano limitare il miglioramento della qualità dell'aria per quanto riguarda il PM_{10} e il $\text{PM}_{2,5}$.

Capitolo 4 — Normativa e strumenti di misurazione

4.1 La normativa europea: quadro generale

Dal punto di vista europeo sono state emanate due direttive riguardanti la qualità dell'aria. Si tratta della Direttiva Europea 50 del 2008, che è stata recentemente superata dalla Direttiva Europea 2881 del 2024.

4.1.1. La Direttiva Europea 50 del 2008

La Direttiva 2008/50/CE ²¹, adottata il 21 maggio 2008, è stata un riferimento molto importante a livello dell'Unione Europea finalizzata a salvaguardare la salute umana e l'ambiente dalle conseguenze dell'inquinamento atmosferico.

Le finalità della direttiva dichiarate all'articolo 1 sono molto ambiziose. Innanzitutto, ha come principale obiettivo la definizione di obiettivi chiari e vincolanti per la qualità dell'aria ambiente, con lo scopo di prevenire, ridurre o eliminare gli effetti nocivi che l'inquinamento atmosferico può avere sulla salute delle persone e sugli ecosistemi. Successivamente, la direttiva impone agli Stati membri l'obbligo di monitorare la qualità dell'aria su tutto il loro territorio, utilizzando metodologie e criteri comuni per garantire coerenza e comparabilità dei dati raccolti. Un altro obiettivo importante è la raccolta e la condivisione di informazioni precise e aggiornate sulla qualità dell'aria, essenziali per il contrasto dell'inquinamento, il monitoraggio delle tendenze e la valutazione dei progressi compiuti. La direttiva si prefigge inoltre di mantenere o, nelle aree particolarmente inquinate, migliorare la qualità dell'aria, promuovendo allo stesso tempo una cooperazione più stretta tra gli Stati membri per affrontare le sfide dell'inquinamento atmosferico transfrontaliero.

Le definizioni fondamentali contenute nell'articolo 2 sono cruciali per l'applicazione uniforme della direttiva. "Aria ambiente" è specificata come l'aria esterna nella troposfera, escludendo tuttavia gli ambienti di lavoro. Un "inquinante" è qualsiasi sostanza presente nell'aria che, a causa della sua natura o concentrazione, può produrre effetti nocivi. Il "livello" si riferisce alla concentrazione di un inquinante nell'aria o alla sua deposizione. Viene introdotto il "valore limite", un livello massimo consentito da raggiungere entro un termine stabilito, mentre il "livello critico" è quello oltre il quale si possono osservare effetti negativi sulle piante o sugli ecosistemi, escludendo gli esseri umani. Vengono definite anche le "soglie di informazione" e

"di allarme", le "soglie di valutazione superiore e inferiore" per la classificazione delle zone, e specificati il "PM₁₀" e "PM_{2,5}" come materiale particolato con dimensioni diverse. Altre definizioni importanti includono l'indicatore di esposizione media, l'obiettivo di concentrazione dell'esposizione e il sito di fondo urbano.

La responsabilità degli Stati membri è centrale nell'attuazione della direttiva. Ogni Stato membro è tenuto a designare le autorità e gli organismi competenti. Questi organismi sono incaricati di svolgere diverse funzioni essenziali, tra cui la valutazione della qualità dell'aria ambiente, l'approvazione e la supervisione dei sistemi di misurazione, la garanzia dell'accuratezza e della precisione delle misurazioni, l'analisi dei metodi di valutazione e la promozione della cooperazione a livello nazionale e internazionale.

Per facilitare la gestione e la valutazione della qualità dell'aria, gli Stati membri sono obbligati a individuare zone e agglomerati su tutto il loro territorio. Questa suddivisione geografica è fondamentale per applicare e differenziare le diverse strategie di monitoraggio e di intervento. La valutazione della qualità dell'aria trattata negli articoli 5 e 6 è un processo che deve perdurare nel tempo con le medesime metodologie di indagine. La direttiva stabilisce un dei valori precisi di riferimenti per la valutazione di specifici inquinanti come biossido di zolfo (SO₂), biossido di azoto (NO₂), ossido di azoto (NO_x), particolato (PM₁₀ e PM_{2,5}), piombo, benzene e monossido di carbonio (CO). Le zone e gli agglomerati devono essere individuati e classificati in base al superamento o meno di determinate soglie di valutazione. Questa classificazione deve essere riesaminata con una certa regolarità, almeno ogni cinque anni, o più frequentemente se si verificano cambiamenti significativi nella misurazione delle concentrazioni di inquinanti. Gli Stati membri hanno l'obbligo di garantire che la valutazione sia condotta secondo criteri specifici e condivisi.

In determinate circostanze eccezionali e ben definite, l'articolo 22 prevede la possibilità di proroga dei termini per il raggiungimento dei valori limite. Questa proroga può essere concessa a condizione che lo Stato membro presenti una richiesta motivata alla Commissione, accompagnata da un piano dettagliato che dimostri come verranno raggiunti i valori limite entro il nuovo termine prorogato.

Gli Stati membri sono obbligati a elaborare piani per la qualità dell'aria per le zone e gli agglomerati dove i valori limite o i valori-obiettivo per gli inquinanti sono superati. Questi piani devono descrivere le misure concrete e appropriate che saranno adottate per ridurre i livelli di inquinamento e assicurare il rispetto dei valori limite nel più breve tempo possibile. Tali piani possono anche includere provvedimenti specifici per la protezione dei gruppi più sensibili della popolazione.

Per affrontare situazioni di inquinamento acuto o imminente, la direttiva consente l'elaborazione di piani d'azione a breve termine. Questi piani, non obbligatori ma altamente raccomandati, mirano a ridurre il rischio di superamento delle soglie di allarme e a limitarne la durata. Possono prevedere una serie di misure operative, come restrizioni alla circolazione dei veicoli, regolamentazioni per lavori di costruzione, limitazioni alle attività industriali, controllo sull'uso di specifici prodotti e interventi sul riscaldamento domestico.

L'inquinamento atmosferico transfrontaliero (Articolo 25) è riconosciuto come una sfida che richiede cooperazione internazionale. Qualora il superamento delle soglie o dei valori limite in una zona sia attribuibile in modo significativo al trasporto di inquinanti da un altro Stato membro, gli Stati interessati devono avviare una cooperazione attiva. Questa cooperazione può concretizzarsi in iniziative congiunte, come la formulazione di piani comuni o coordinati per la riduzione delle emissioni.

Infine, la direttiva pone grande enfasi sull'informazione del pubblico e sulla comunicazione dei dati con gli articoli 26 e 27. Gli Stati membri devono garantire che il pubblico e le associazioni interessate siano regolarmente e adeguatamente informati sulla qualità dell'aria ambiente, sulle decisioni relative a eventuali proroghe e sui piani per la qualità dell'aria. È altresì obbligatorio che gli Stati membri trasmettano alla Commissione europea relazioni annuali e altre informazioni pertinenti sulla qualità dell'aria ambiente entro scadenze prefissate.

4.1.2. La Direttiva europea 2024/2881

La direttiva (UE) 2024/2881 ²² mira a migliorare la qualità dell'aria nell'Unione Europea, rifondendo le precedenti direttive 2004/107/CE e 2008/50/CE. L'obiettivo principale è raggiungere un livello di “inquinamento zero” entro il 2050, allineando gli standard dell'UE alle raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e riducendo l'impatto dell'inquinamento atmosferico sulla salute di oltre il 55% entro il 2030. Le misure, sia a livello nazionale sia a livello europeo, saranno guidate dal principio di precauzione, dal principio dell'azione preventiva, dal principio della correzione prioritaria alla fonte dei danni e dal principio del "chi inquina paga", nonché dal principio del “non nuocere” del Green Deal europeo.

La direttiva stabilisce valori limite, valori obiettivo, indice di esposizione media, obiettivi di concentrazione dell'esposizione media, livelli critici, soglie di allarme, soglie di informazione

e obiettivi a lungo termine. Particolare attenzione è dedicata alla protezione delle categorie vulnerabili della popolazione.

Per favorire la comprensione della direttiva, l'articolo 4 riporta le definizioni dei principali termini utilizzati. Nella seguente tabella si presenta un estratto di quelli più significativi.

Termine	Definizione
valore limite	livello di concentrazione <u>da non superare</u> che è fissato per evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi per la salute umana o per l'ambiente
valori obiettivo	livello di concentrazione <u>da raggiungere</u> al fine di evitare, prevenire o ridurre effetti nocivi per la salute umana o per l'ambiente
indice di esposizione media (IDM)	livello medio di concentrazione determinato in siti di fondo urbano o rurale che rispecchia l'esposizione della popolazione
livello critico	livello al di sopra del quale vi possono essere effetti negativi diretti su piante, alberi o ecosistemi naturali
soglie di allarme	livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata della popolazione nel suo insieme e raggiunto il quale gli Stati membri devono adottare provvedimenti immediati
soglie di informazione	livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana in caso di esposizione di breve durata per alcune categorie particolarmente vulnerabili della popolazione. Nel caso in cui il limite venga raggiunto sono necessarie informazioni adeguate e tempestive

Tabella 02: Legenda termini specifici riportati nell'articolo 4 della Direttiva europea 2024/2881

Gli inquinanti per i quali è previsto un monitoraggio sistematico sono quelli riportati nel paragrafo introduttivo, noti per avere un impatto diretto sulla salute umana e sull'ambiente: particolato (PM₁₀ e PM_{2.5}), biossido di azoto, biossido di zolfo, benzene, monossido di

carbonio, arsenico, cadmio, piombo, nichel, idrocarburi policiclici aromatici e ozono. È inoltre ritenuta particolarmente importante la misurazione di inquinanti emergenti, come il particolato ultrafine (UFP), il particolato carbonioso, il carbonio elementare e l'ammoniaca. La rete di monitoraggio prevede misurazioni in siti fissi, in contesti urbani o rurali, e l'innovativa introduzione dei cosiddetti "supersiti di monitoraggio", ovvero siti che combinano più punti di campionamento.

Per quanto riguarda la tutela della salute e la giustizia ambientale, la direttiva dedica un'attenzione particolare alle categorie più vulnerabili (anziani, bambini, persone con patologie) e ai gruppi sensibili costituiti da persone con uno status socioeconomico svantaggiato, che tendono a subire maggiormente gli effetti dell'inquinamento atmosferico. Gli Stati membri sono pertanto tenuti a informare in modo chiaro e tempestivo la popolazione circa le concentrazioni misurate di inquinanti nell'aria, l'eventuale superamento dei valori limite e l'impatto sulla salute pubblica e sull'ambiente. Le informazioni devono essere rese pubbliche gratuitamente, attraverso mezzi e canali di comunicazione facilmente accessibili, garantendo un ampio accesso da parte del pubblico. In caso di danni sanitari derivanti da violazioni della normativa, è garantito un diritto al risarcimento.

Gli Stati membri sono inoltre obbligati a sviluppare piani per la qualità dell'aria e tabelle di marcia da adottare entro il 2030, finalizzati alla riduzione dei livelli di inquinanti. Nei casi in cui si verifichi il superamento delle soglie di allarme, devono essere predisposti piani di azione a breve termine. È prevista la cooperazione tra Stati membri per individuare le fonti di inquinamento atmosferico transfrontaliero, formulare iniziative coordinate e valutare se i superamenti dei valori limite siano dovuti, almeno in parte, a fonti naturali (ad esempio incendi boschivi, polveri desertiche, eruzioni vulcaniche) oppure a fonti antropiche non evitabili, come la manutenzione stradale invernale (es. spargimento di sale). Questa valutazione è essenziale per escludere tali contributi dal computo dei valori rilevati.

Sono previste proroghe nel caso in cui non sia possibile rispettare i valori limite fissati per alcuni inquinanti. Questo può avvenire, ad esempio, a causa di condizioni climatiche avverse, apporti transfrontalieri di inquinanti o particolari condizioni orografiche (come la presenza di montagne, rilievi, valli, esposizione dei versanti e ostacoli al passaggio dell'aria e dell'umidità). Per ottenere una proroga è necessario produrre una relazione tecnico-scientifica dettagliata, che descriva i metodi utilizzati e i dati ottenuti dai monitoraggi.

La Commissione riesaminerà periodicamente i dati scientifici per aggiornare le norme e potrà esercitare poteri delegati per l'adeguamento tecnico e scientifico della direttiva.

In conclusione, di seguito si propone una breve descrizione del contenuto di ciascun allegato della direttiva. Per quanto riguarda gli allegati I, IV, V, VI e X, viene fornito un approfondimento, al fine di evidenziarne gli aspetti più significativi e innovativi della nuova normativa.

- **ALLEGATO I - Standard di qualità dell'aria.**

Questo allegato definisce i **valori limite** e i **valori obiettivo** per vari inquinanti, inclusi biossido di zolfo, biossido di azoto, particolato (PM₁₀ e PM_{2,5}), benzene, monossido di carbonio, arsenico, cadmio, piombo, nichel e benzo(a)pirene, specificando anche la data di entrata in vigore di tali valori.

<u>Valori limite</u> per la protezione della salute umana da raggiungere entro il 11 dicembre 2026		
Inquinante	Valore limite	Periodo di mediazione
PM _{2,5}	25 µg/m ³	Anno civile
PM ₁₀	50 µg/m ³	1 giorno
	40 µg/m ³	Anno civile
Biossido di azoto (NO ₂)	200 µg/m ³	1 ora
	40 µg/m ³	Anno civile
Biossido di zolfo (SO ₂)	350 µg/m ³	1 ora
	125 µg/m ³	1 giorno
Benzene	5 µg/m ³	Anno civile
Monossido di carbonio (CO)	10 mg/m ³	MEDIA massima giornaliera su 8 ore
Piombo (Pb)	0,5 µg/m ³	Anno civile

Tabella 03: Valori limite per la protezione della salute umana da raggiungere entro il 11 dicembre 2026

Valori limite per la protezione della salute umana da raggiungere entro il 1° gennaio 2030

Inquinante	Valore limite	Periodo di mediazione
PM _{2,5}	25 µg/m ³	1 giorno
	10 µg/m ³	Anno civile
PM ₁₀	45 µg/m ³	1 giorno
	20 µg/m ³	Anno civile
Biossido di azoto (NO ₂)	200 µg/m ³	1 ora
	50 µg/m ³	1 giorno
	20 µg/m ³	Anno civile
Biossido di zolfo (SO ₂)	350 µg/m ³	1 ora
	50 µg/m ³	1 giorno
	20 µg/m ³	Anno civile
Benzene	3,4 µg/m ³	Anno civile
Monossido di carbonio (CO)	10 mg/m ³	MEDIA massima giornaliera su 8 ore
	4 mg/m ³	1 giorno
Piombo (Pb)	0,5 µg/m ³	Anno civile
Arsenico (As)	6,0 ng/m ³	Anno civile
Cadmio (Cd)	5,0 ng/m ³	Anno civile
Nichel (Ni)	20 ng/m ³	Anno civile

Benzo(a)pirene	1,0 ng/m ³	Anno civile
----------------	-----------------------	-------------

Tabella 04: Valori limite per la protezione della salute umana da raggiungere entro il 1° gennaio 2030

<u>Valori-obiettivo per la protezione della salute umana da raggiungere entro l'11 dicembre 2026</u>		
Inquinante	Valore limite	Periodo di mediazione
Arsenico (As)	6,0 ng/m ³	Anno civile
Cadmio (Cd)	5,0 ng/m ³	Anno civile
Nichel (Ni)	20 ng/m ³	Anno civile
Benzo(a)pirene	1,0 ng/m ³	Anno civile

Tabella 05: Valori-obiettivo per la protezione della salute umana da raggiungere entro l'11 dicembre 2026

<u>Valori-obiettivo e obiettivi a lungo termine per l'ozono</u>			
Finalità	Valore-obiettivo da raggiungere entro il 1 gennaio 2030	Obiettivo a lungo termine da raggiungere entro il 1 gennaio 2050	Periodo di mediazione
Protezione della salute umana	120 µg/m ³ da non superare più di 18 volte per anno civile	100 µg/m ³ da non eccedere più di 3 giorni per anno civile	Media massima giornaliera da calcolare su 8 ore
Protezione della vegetazione	AOT40 ^(*) = 18000 µg/m ³ h	AOT40 ^(*) = 6000 µg/m ³ h	Da maggio a luglio

Tabella 06: Valori-obiettivo e obiettivi a lungo termine per l'ozono

*Esposizione cumulata all'ozono al di sopra della soglia di concentrazione di 40 parti per miliardo (Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 parts per billion, AOT40), espressa in «µg/m³ · ore»).

Soglie di allarme		
Inquinante	Periodo di mediazione	Soglia di allarme
Biossido di zolfo (SO ₂)	1 ora	350 µg/m ³
Biossido di azoto (NO ₂)	1 ora	200 µg/m ³
PM _{2,5}	1 giorno	50 µg/m ³
PM ₁₀	1 giorno	90 µg/m ³
Ozono	1 ora	240 µg/m ³

Tabella 07: Soglie di allarme riportare nell'allegato 1 della Direttiva europea 2024/2881

Soglie di informazione		
Inquinante	Periodo di mediazione	Soglia di informazione
Biossido di zolfo (SO ₂)	1 ora	275 µg/m ³
Biossido di azoto (NO ₂)	1 ora	150 µg/m ³
PM _{2,5}	1 giorno	50 µg/m ³
PM ₁₀	1 giorno	90 µg/m ³
Ozono	1 ora	180 µg/m ³

Tabella 08:: Soglie di informazione riportare nell'allegato 1 della Direttiva europea 2024/2881

- ALLEGATO II - Soglie di valutazione.

Questo allegato stabilisce le **soglie di valutazione** da utilizzare per la classificazione

delle zone e degli agglomerati dove la misurazione fissa è obbligatoria per determinate sostanze inquinanti.

- **ALLEGATO III - Numero minimo di punti di campionamento** per le misurazioni in siti fissi. Questo allegato determina il numero minimo di punti di campionamento in siti fissi necessari per garantire una valutazione rappresentativa della qualità dell'aria, basandosi sul numero di abitanti e sulle concentrazioni annuali medie degli inquinanti.

- **ALLEGATO IV - Valutazione della qualità dell'aria ambiente e ubicazione dei punti di campionamento.**

Questo allegato stabilisce i requisiti generali per la valutazione della qualità dell'aria ambiente, inclusa la combinazione di misurazioni fisse, modellizzazione e altre tecniche. Delinea anche i criteri per l'ubicazione dei punti di campionamento sia a macro scala sia a micro scala.

Vengono specificati quali sono i siti in cui non è opportuno valutare la qualità dell'aria in base alle disposizioni della presente Direttiva. Ad esempio sono esclusi i seguenti siti di monitoraggio: interno di stabilimenti o impianti industriali (soggetti alla normativa sulla sicurezza nei luoghi di lavoro), strade e luoghi in cui il pubblico non ha libero accesso.

- **ALLEGATO V - Obiettivi di qualità dei dati.**

Questo allegato definisce gli obiettivi di qualità dei dati per le misurazioni fisse e per le applicazioni di modellizzazione, specificando i requisiti di incertezza, completezza dei dati e tempo di funzionamento dei punti di campionamento.

- **ALLEGATO VI - Metodi di riferimento per la valutazione delle concentrazioni nell'aria ambiente e dei tassi di deposizione.**

Questo allegato specifica i metodi di riferimento per il campionamento e l'analisi di diversi inquinanti (ad esempio, spettrometria di fluorescenza ultravioletta per il biossido di zolfo, chemiluminescenza per il biossido di azoto) e per la valutazione dei tassi di deposizione.

A seguire viene riportata una sintesi dei metodi di riferimento per la misurazione delle concentrazioni degli inquinanti ⁸ elencati nella normativa:

Sostanza	Metodo di riferimento per la valutazione delle concentrazioni	Norma di riferimento
Biossido di zolfo (SO ₂)	spettrometria di fluorescenza ultravioletta	EN 14212:2012
Biossido di azoto (NO ₂)	chemiluminescenza	EN 14211:2012
PM _{2,5}	filtrazione con pesatura gravimetrica.	EN 12341:2023
PM ₁₀	filtrazione con pesatura gravimetrica.	EN 12341:2023
Ozono (O ₃)	fotometria ultravioletta	EN 14625:2012
Benzene	gascromatografia con rilevamento a ionizzazione di fiamma	EN 14662-1:2005 EN 14662-2:2005 EN 14662-3:2016
Monossido di carbonio (CO)	spettrometria a infrarossi non dispersiva	EN 14626:2012
Piombo (Pb)	spettrometria di assorbimento atomico, spettrometria di emissione atomica al plasma induttivamente accoppiato o spettrometria di massa al plasma induttivamente accoppiato	EN 14902:2005

Arsenico (As) Cadmio (Cd) Nichel (Ni)	spettrometria di emissione atomica al plasma induttivamente accoppiato o spettrometria di massa al plasma induttivamente accoppiato o spettrometria di assorbimento atomico dopo digestione a ultrasuoni	EN 14902:2005
Benzo(a)pirene e altri idrocarburi policiclici aromatici	gascromatografia accoppiata alla spettrometria di massa	EN 15549:2008

Tabella 09: Elenco dei principali metodi di riferimento per le concentrazioni degli inquinanti atmosferici con relativa norma di riferimento

BIOSSIDO DI ZOLFO

Un rivelatore a **spettrometria di fluorescenza ultravioletta (UVF)** misura il biossido di zolfo (SO_2) nell'atmosfera sfruttando la capacità di questa molecola di emettere luce fluorescente dopo essere stata eccitata dalla luce ultravioletta.

Inizialmente un flusso continuo di aria da analizzare viene aspirato e passa attraverso una camera di misurazione. Nella camera di misurazione, il campione d'aria viene irradiato con luce ultravioletta (UV) a una lunghezza d'onda specifica, solitamente intorno ai 214 nm, emessa da una sorgente come una lampada allo xeno. Le molecole di SO_2 assorbono energia e passano a uno stato eccitato (cioè a un livello energetico superiore). Le molecole di SO_2 eccitate sono instabili e, per tornare al loro stato energetico fondamentale, emettono l'energia in eccesso sotto forma di luce fluorescente, a una lunghezza d'onda diversa e più lunga, tipicamente tra 240 nm e 400 nm (visibile).

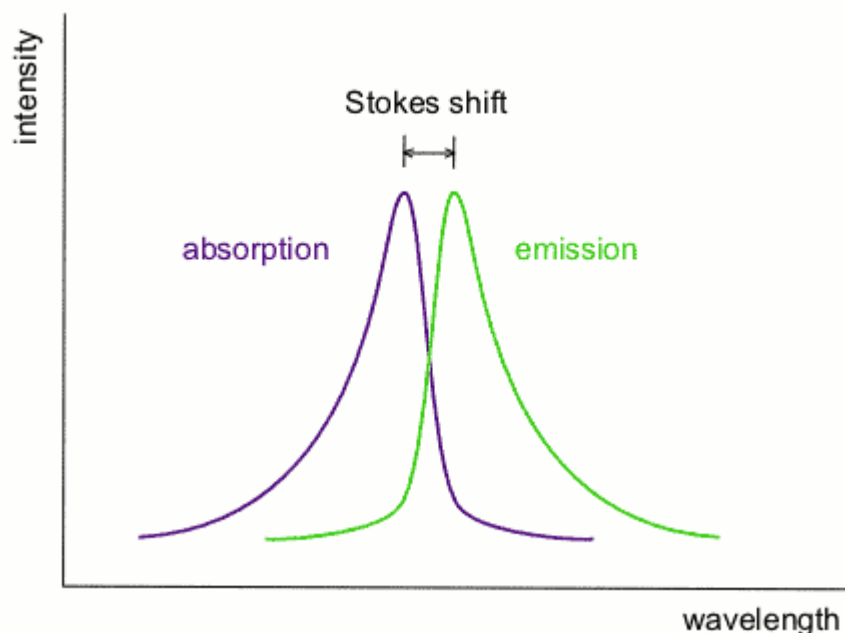


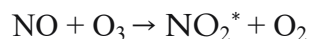
Fig. 03: Grafico di assorbimento/ emissione che evidenzia il fenomeno della fluorescenza ²³

Un rivelatore fotosensibile, posizionato perpendicolarmente rispetto al fascio di luce eccitante per evitare interferenze dirette, misura l'intensità della luce fluorescente emessa. L'intensità della fluorescenza è direttamente proporzionale alla concentrazione di SO₂ nel campione d'aria. Un sistema elettronico elabora il segnale del rivelatore e lo converte in un valore di concentrazione.

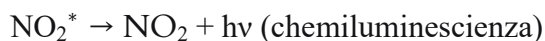
OSSIDI DI AZOTO

Un analizzatore a **chemiluminescenza** misura il biossido di azoto (NO₂) e il monossido di azoto (NO) sfruttando una reazione che produce luce (hν). Il metodo si basa sulla reazione tra il monossido di azoto e l'ozono.

Il monossido di azoto reagisce con l'ozono per formare biossido di azoto eccitato (NO₂^{*}).



Questa molecola eccitata torna al suo stato fondamentale emettendo luce in una gamma di lunghezze d'onda vicina all'infrarosso (tra 600 nm e 3000 nm).



L'intensità della luce emessa è proporzionale alla concentrazione di NO nel campione.

L'aria campionata viene filtrata e inviata a una camera di reazione dove viene miscelata con ozono in eccesso. La luce prodotta dalla reazione viene misurata da un fotomoltiplicatore o un fotodiodo, che la converte in un segnale elettrico proporzionale alla concentrazione di NO. Per determinare la concentrazione di NO₂, il campione d'aria viene fatto passare attraverso un converter (riduttore al molibdeno) che trasforma tutto l'NO₂ in NO. A questo punto, lo strumento misura la concentrazione totale degli ossidi di azoto (NO + NO₂). La concentrazione di NO₂ viene poi calcolata per sottrazione: si sottrae la concentrazione di NO (misurata direttamente) dalla concentrazione totale di ossidi di azoto.

PARTICOLATO FINE

La misura del particolato atmosferico PM₁₀ e PM_{2,5} in aria ambiente si basa sul sistema gravimetrico. Funziona aspirando un volume noto d'aria attraverso un filtro, che cattura le particelle, e misurando l'aumento di peso del filtro stesso. Un campionatore aspira l'aria atmosferica a una portata costante e controllata per un periodo di tempo specifico (tipicamente 24 ore). Prima che l'aria raggiunga il filtro, passa attraverso una testa di campionamento che seleziona le particelle in base al loro diametro. Per il PM₁₀, vengono trattenute solo le particelle con un diametro inferiore a 10 µm, mentre per il PM_{2,5} quelle inferiori a 2,5 µm. Un filtro in materiale inerte (come fibra di vetro o teflon) viene pesato preventivamente in laboratorio, in condizioni di temperatura e umidità controllate, utilizzando una bilancia di alta precisione. L'aria filtrata passa attraverso il filtro, dove le particelle selezionate (PM₁₀ o PM_{2,5}) rimangono intrappolate sulla sua superficie. Dopo il campionamento, il filtro viene riportato in laboratorio, ricondizionato nelle stesse condizioni ambientali della pre-pesata e pesato nuovamente. La differenza tra il peso finale e quello iniziale del filtro rappresenta la massa totale del particolato raccolto. La concentrazione di PM₁₀ o PM_{2,5} si calcola dividendo questa massa per il volume totale di aria che è stato campionato esprimendo la concentrazione in µg/m³. Questo metodo è considerato affidabile perché fornisce una misurazione diretta della massa del particolato, ma non consente una misurazione in continuo.

Esistono misuratori automatici di particolato PM₁₀ e PM_{2,5} che si basano su vari principi fisici e consentono di ottenere misurazioni continue e in tempo reale della concentrazione di massa del particolato atmosferico. A differenza del metodo gravimetrico, che è il metodo di riferimento, questi analizzatori non richiedono il prelievo manuale dei filtri e la successiva pesata in laboratorio.



Fig. 04. Filtro utilizzato per la determinazione della concentrazione di particolato fine con metodo gravimetrico ²⁴

Il metodo a attenuazione di raggi β (radiometrico) è il metodo automatico più diffuso e consiste nel misurare l'assorbimento di raggi β da parte delle particelle raccolte su un filtro. Un nastro di filtro, che si sposta a intervalli regolari, raccoglie il particolato atmosferico aspirato dal campionatore. Prima e dopo il campionamento, una sorgente radioattiva emette raggi β che attraversano il nastro del filtro. Un rivelatore misura l'intensità dei raggi β che passano attraverso il filtro. Le particelle di PM_{10} o $PM_{2,5}$ intrappolate nel filtro assorbono una parte di questa radiazione. L'intensità dei raggi β che raggiungono il rivelatore è inversamente proporzionale alla massa del particolato sul filtro. Lo strumento calcola la massa del particolato dalla differenza nell'assorbimento dei raggi β , dividendo poi per il volume d'aria campionato per ottenere la concentrazione in $\mu g/m^3$.

Il metodo a microbilancia ad oscillazione (TEOM) misura direttamente la massa del particolato in tempo reale usando un principio di oscillazione. L'aria viene aspirata attraverso un filtro montato su un tubo conico cavo, che è fissato a un elemento piezoelettrico che lo fa oscillare. La frequenza di oscillazione del tubo conico è direttamente correlata alla sua massa. Le particelle di PM_{10} o $PM_{2,5}$ si depositano sul filtro, aumentando la massa dell'intero sistema. Con l'aumento della massa, la frequenza di oscillazione diminuisce. L'analizzatore misura questo cambiamento di frequenza. La variazione della frequenza è direttamente proporzionale alla massa delle particelle depositate sul filtro. Lo strumento calcola automaticamente la concentrazione in base a questa variazione e al volume d'aria campionato.

Esiste anche il metodo a diffusione della luce (Light Scattering) che è meno preciso dei precedenti ma offre misurazioni istantanee. L'aria viene aspirata in una camera di misura. Un fascio laser illumina le particelle di particolato che passano attraverso la camera. Le particelle diffondono la luce laser in diverse direzioni. Un rivelatore, posizionato a un angolo specifico, misura l'intensità della luce diffusa. L'intensità della luce diffusa è proporzionale al numero e alla dimensione delle particelle. L'analizzatore converte il segnale ottico in una stima della concentrazione di massa. Questo metodo richiede però una calibrazione accurata utilizzando il metodo gravimetrico per garantire l'accuratezza dei dati.

OZONO

La misura dell'ozono si basa sulla capacità di questa molecola di assorbire le radiazioni ultraviolette (UV) ad una precisa lunghezza d'onda. La misurazione dell'intensità luminosa è direttamente correlata alla concentrazione di O_3 ed è eseguita da un apposito rilevatore.

Il processo di misurazione si svolge in un ciclo continuo e controllato. Un flusso di aria atmosferica viene aspirato all'interno dello strumento e suddiviso in due percorsi separati. Per prima cosa, l'aria passa attraverso una camera di misurazione dove viene irradiata da una sorgente luminosa a UV. Una lampada a mercurio a bassa pressione produce luce UV. Un filtro ottico isola la lunghezza d'onda specifica di 254 nm, che è quella che l'ozono (O_3) assorbe più intensamente. Il fascio di luce UV attraversa la camera di misurazione. Il rivelatore misura l'intensità di questa luce dopo che ha attraversato il campione d'aria. La quantità di luce assorbita è direttamente proporzionale alla concentrazione di ozono presente. Nel secondo percorso, lo stesso campione di aria viene fatto passare attraverso un catalizzatore che elimina selettivamente l'ozono. Quest'aria priva di ozono viene poi immessa nella stessa camera di misurazione. Il rivelatore misura nuovamente l'intensità della luce UV. Questa seconda misurazione serve come riferimento, poiché rappresenta l'intensità della luce in assenza di ozono. La concentrazione di ozono viene calcolata confrontando l'intensità della luce misurata nel campione d'aria (con O_3) con l'intensità misurata nel campione di riferimento (senza O_3). La differenza tra le due letture, secondo la legge di Beer-Lambert, permette di calcolare la concentrazione di ozono. La concentrazione di ozono è espressa in microgrammi al metro cubo ($\mu g/m^3$).

BENZENE

Il benzene viene monitorato mediante analizzatori che eseguono la gascromatografia in continuo. Un rivelatore a gascromatografia (GC) misura il benzene atmosferico separandolo

da altri composti organici volatili (VOC) presenti nell'aria e quantificando la sua concentrazione. È un metodo di analisi molto preciso e può essere utilizzato per misurare inquinanti atmosferici specifici a basse concentrazioni.

Il funzionamento si articola in tre fasi principali: campionamento, separazione e rivelazione. Il primo passo consiste nel raccogliere un campione di aria. Questo può avvenire in diversi modi, ma il più comune per il benzene è tramite un adsorbimento attivo o passivo. In un campionamento attivo, una pompa aspira un volume d'aria noto attraverso un tubo che contiene un materiale adsorbente (come il carbone attivo). In un campionamento passivo, il tubo è esposto all'aria per un periodo di tempo prolungato, e le molecole di benzene si diffondono sulla superficie del materiale. Una volta raccolto, il campione viene iniettato nel gascromatografo. Qui, il campione viene vaporizzato e trasportato da un gas inerte (detto "gas di trasporto" o "fase mobile", solitamente elio, azoto o idrogeno) attraverso una lunga e sottile colonna capillare, detta fase stazionaria. All'interno della colonna, il benzene e gli altri VOC presenti nel campione interagiscono in modo diverso con il materiale della fase stazionaria. A causa delle loro diverse proprietà chimico-fisiche, le molecole di ogni composto si muovono a velocità diverse. Il benzene, per esempio, impiega un tempo specifico per percorrere l'intera colonna. Questo tempo, chiamato tempo di ritenzione, è una caratteristica distintiva del composto in quelle specifiche condizioni operative. Quando ogni composto separato esce dalla colonna, raggiunge un rivelatore. Il rivelatore, ad esempio un rivelatore a ionizzazione di fiamma (FID) o uno spettrometro di massa (MS), genera un segnale elettrico proporzionale alla quantità di composto che lo attraversa. Nel caso del FID il campione entra nel rivelatore insieme al gas portatore e brucia nella fiamma di idrogeno. I composti contenenti carbonio si decompongono nella fiamma ad alta temperatura, formando particelle cariche, ioni ed elettroni. Le cariche si muovono in un campo elettrico applicato tra due elettrodi, generando una piccola corrente. Il sistema di amplificazione elettronica converte questa corrente in picchi cromatografici, in cui l'area di picco è proporzionale alla concentrazione di composti organici nel campione. Per il benzene, il segnale viene misurato in un preciso momento (corrispondente al suo tempo di ritenzione). Il risultato dell'analisi è un cromatogramma, un grafico che mostra l'intensità del segnale in funzione del tempo. Analizzando l'area del picco corrispondente al tempo di ritenzione del benzene, è possibile determinarne la concentrazione nel campione originale.

MONOSSIDO DI CARBONIO

La rilevazione del monossido di carbonio (CO) è legata alla proprietà che possiede tale gas di assorbire Radiazioni Infrarosse (IR) a determinate lunghezze d'onda: l'intensità di radiazione infrarossa misurata è proporzionale alla concentrazione del gas. Per tale motivo il metodo più comune per la misurazione del CO atmosferico è la spettroscopia a infrarossi non dispersiva (NDIR). Il funzionamento prevede che una sorgente luminosa emetta un fascio di luce infrarossa che attraversi un campione di aria da analizzare. Il fascio di luce infrarossa, dopo aver attraversato il campione di gas, raggiunge un rilevatore. A monte del rilevatore viene posto un filtro ottico che seleziona solo la lunghezza d'onda specifica ($4.67\text{ }\mu\text{m}$) che il CO assorbe. La quantità di luce che raggiunge il rilevatore è inversamente proporzionale alla concentrazione di CO nel campione: maggiore è la concentrazione di CO, minore è la luce che raggiunge il sensore. I sensori più precisi utilizzano due fasci di luce: un fascio di misura che attraversa il gas da analizzare e un fascio di riferimento a una lunghezza d'onda che non viene assorbita dal CO. Il rilevatore converte l'intensità della luce infrarossa in un segnale elettrico, che viene poi elaborato per fornire una lettura della concentrazione di CO espressa in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Il fenomeno è spiegabile grazie alla legge di Beer-Lambert, che stabilisce una relazione diretta tra la quantità di luce assorbita e la concentrazione del gas.

PIOMBO ARSENICO CADMIO NICHEL

La concentrazione di piombo, arsenico, cadmio e nichel nell'aria può essere rilevata in modo diversi: si utilizzano principalmente la spettrometria di assorbimento atomico (AAS), la spettrometria di emissione atomica al plasma accoppiato induttivamente (ICP-OES) e la spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS).

Preliminarmente è necessario campionare l'aria per raccogliere il particolato atmosferico (PM_{10}), poiché i metalli pesanti si legano a queste polveri sottili. Il campionamento viene eseguito con campionatori volumetrici ad alto volume, che aspirano un flusso d'aria costante per 24 ore attraverso un filtro specifico (solitamente in fibra di quarzo o teflon). La geometria della testa di prelievo del campionatore garantisce che vengano raccolte solo le particelle con un diametro inferiore a $10\text{ }\mu\text{m}$. Dopo il campionamento, il filtro viene recuperato e inviato a un laboratorio. Qui, i metalli pesanti vengono separati dal particolato attraverso un processo di digestione acida. Il filtro viene trattato con una miscela di acidi forti, come acido nitrico e acido cloridrico, a una temperatura elevata. Questo processo dissolve il materiale particolato, trasferendo i metalli in una soluzione liquida pronta per l'analisi.

Un rivelatore a spettrometria di assorbimento atomico (AAS) misura l'elemento presente in atmosfera quantificando la sua capacità di assorbire la luce a una lunghezza d'onda specifica dopo essere stato atomizzato. È un metodo molto sensibile e il processo di misurazione si articola in tre fasi principali: campionamento, atomizzazione e misurazione dell'assorbimento. L'aria atmosferica viene aspirata e fatta passare attraverso un filtro (solitamente in fibra di vetro o cellulosa) che cattura le particelle di metallo (aerosol) presenti. Questo filtro viene poi trattato con un acido forte (ad es. acido nitrico) per dissolvere il metallo e convertirlo in una soluzione acquosa. La soluzione contenente il metallo viene aspirata in un nebulizzatore che la trasforma in un fine aerosol. Questo aerosol viene poi introdotto in una sorgente di calore ad alta temperatura, come una fiamma di aria-acetilene o un forno a grafite. Il calore rompe i legami chimici delle molecole, trasformando gli ioni di metallo in atomi neutri di piombo, arsenico cadmio o nichel nello stato fondamentale. Una lampada a catodo cavo, il cui catodo, emette un fascio di luce a una lunghezza d'onda specifica (diversa per ogni atomo come si vede dalla tabella) che solo gli atomi di quel metallo possono assorbire.

Metallo	Lunghezza d'onda a cui assorbe
Piombo	283,3 nm (linea principale)
	217,0 nm (linea alternativa)
Arsenico	193,7 nm
Cadmio	228,8 nm
Nichel	232,0 nm
	341,5 nm

Tabella 10: Lunghezze d'onda di assorbimento caratteristiche dei vari metalli.

Questo fascio di luce attraversa la fiamma o il forno a grafite, dove si trovano gli atomi dei metalli. Un rivelatore misura l'intensità della luce prima e dopo che ha attraversato la zona di atomizzazione. La differenza tra le due intensità, secondo la legge di Beer-Lambert, è proporzionale alla concentrazione dello specifico metallo in aria. Maggiore è la

concentrazione nel campione, maggiore sarà la luce assorbita. Il segnale del rivelatore viene convertito in un valore di concentrazione. Lo strumento viene calibrato usando soluzioni standard di piombo, arsenico cadmio o nichel a concentrazioni note, creando una curva di calibrazione che permette di correlare l'assorbimento misurato con la concentrazione nel campione atmosferico originale.

Un rivelatore a **spettrometria di emissione atomica al plasma accoppiato induttivamente (ICP-OES)** misura la concentrazione del metallo in atmosfera quantificando la luce emessa dagli atomi del metallo dopo che sono stati eccitati da un plasma ad alta temperatura. A differenza dell'AAS che misura la **luce assorbita**, l'ICP-OES misura la **luce emessa** dagli atomi eccitati per questo è un metodo di analisi in grado di rilevare più elementi contemporaneamente. L'aria atmosferica viene aspirata e fatta passare attraverso un filtro che raccoglie il particolato e come spiegato precedentemente il filtro viene poi trattato con acidi per disciogliere i vari metalli e convertirli in una soluzione liquida. La soluzione liquida viene introdotta nello strumento, dove un nebulizzatore la trasforma in un fine aerosol. Questo aerosol viene trasportato da un flusso di gas inerte (solitamente argon) in una torcia al plasma. All'interno della torcia, un campo magnetico a radiofrequenza genera un plasma d'argon ad altissima temperatura (6.000-10.000 K). Il calore intenso del plasma vaporizza e atomizza le molecole dei metalli. Gli atomi così ottenuti assorbono l'energia del plasma e vengono portati a uno stato eccitato. Quando gli atomi eccitati ritornano al loro stato fondamentale (meno energetico), emettono l'energia in eccesso sotto forma di **luce con lunghezze d'onda specifiche** e caratteristiche per ogni metallo. Le lunghezze d'onda caratteristiche sono il "segno distintivo" di ogni elemento. Di seguito sono riportate le lunghezze d'onda più comunemente utilizzate per l'analisi di piombo, arsenico, cadmio e nichel, espresse in nanometri (nm).

Metallo	Lunghezza d'onda a cui emette
Piombo	220,353 nm
	283,306 nm
Arsenico	189,042 nm

	193,696 nm
Cadmio	214,438 nm
	226,502 nm
Nichel	231,604 nm
	341,476 nm

Tabella 11: Lunghezze d'onda caratteristiche emesse dai vari metalli.

È importante notare che ogni elemento ha molteplici righe di emissione e la scelta della lunghezza d'onda da utilizzare per un'analisi specifica dipende da diversi fattori, tra cui la sensibilità richiesta e la presenza di possibili interferenze spettrali da parte di altri elementi nel campione. Poiché l'intensità della luce emessa è direttamente proporzionale alla concentrazione di metallo nel campione, lo strumento può calcolare la quantità originariamente presente nell'aria.

Un rivelatore a **spettrometria di massa al plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS)** misura i metalli pesanti presenti in atmosfera offrendo una sensibilità superiore rispetto ai metodi citati in precedenza e inoltre la possibilità di analizzare la composizione isotopica. In questo processo l'aria viene campionata come descritto in precedenza per creare una soluzione liquida omogenea. La soluzione liquida viene introdotta nello strumento, dove un nebulizzatore la trasforma in un aerosol. Questo aerosol viene trasportato in un plasma d'argon ad altissima temperatura (6.000-10.000 K). Nel plasma, il metallo viene prima vaporizzato e poi ionizzato, cioè i suoi atomi perdono uno o più elettroni, trasformandosi in ioni con carica positiva. Gli ioni positivi vengono estratti dal plasma e convogliati in un sistema di vuoto ad alta pressione. Nel vuoto, gli ioni passano attraverso un analizzatore di massa che li separa in base al loro rapporto massa/carica (m/z). Gli ioni dei vari metalli, a causa della loro massa specifica, seguiranno una traiettoria unica e selezionata.

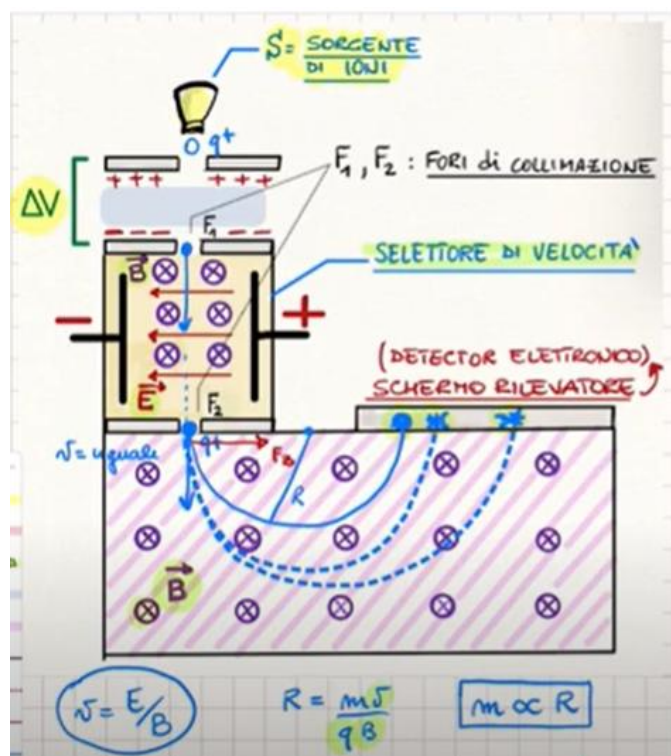


Fig. 05: Immagine schematica di uno spettrometro di massa come viene presentata comunemente ad un livello di scuola media secondaria di secondo grado²⁵

L'ICP-MS è in grado di distinguere i più abbondanti isotopi, che hanno la stessa carica ma masse leggermente diverse. Il rapporto massa/carica (m/z) per ciascuno di essi, assumendo una carica ionica di +1, corrisponde al numero di massa dell'isotopo come riportato in tabella.

Isotopo di Piombo	m/z	Abbondanza naturale
Piombo-206 (206Pb)	206	24,1%
Piombo-207 (207Pb)	207	22,1%
Piombo-208 (208Pb)	208	52,4%

Tabella 12: Ripartizione in natura dei vari isotopi del piombo

Isotopo di Arsenico	m/z	Abbondanza naturale
Arsenico-75 (75As)	75	100 %

Tabella 13: Ripartizione in natura dei vari isotopi dell'Arsenico

Isotopo di Cadmio	m/z	Abbondanza naturale
Cadmio-110 (110Cd)	110	12,49%
Cadmio-111 (111Cd)	111	12,80%
Cadmio-112 (112Cd)	112	24,13%
Cadmio-114 (114Cd)	114	28,73%

Tabella 14: Ripartizione in natura dei vari isotopi del Cadmio

Isotopo di Nichel	m/z	Abbondanza naturale
Nichel-58 (58Ni)	58	68,08%
Nichel-60 (60Ni)	60	26,22%

Tabella 15: Ripartizione in natura dei vari isotopi del Nichel

Un **rivelatore** misura il numero di ioni per ogni massa specifica che lo colpiscono in un dato intervallo di tempo. La quantità di ioni rilevati è **direttamente proporzionale** alla concentrazione di piombo nel campione originale.

- **ALLEGATO VII - Misurazioni nei supersiti di monitoraggio e misurazioni della concentrazione di massa, della composizione chimica del PM_{2,5}, dei precursori dell'ozono e del particolato ultrafine.**

In questo allegato vengono stabiliti i requisiti per le misurazioni nei supersiti di monitoraggio, focalizzandosi sulla concentrazione di massa e sulla composizione chimica del PM_{2,5}, sui precursori dell'ozono e sul particolato ultrafine. Include inoltre la frequenza minima di campionamento.

- **ALLEGATO VIII - Informazioni da includere nei piani per la qualità dell'aria e nelle tabelle di marcia per la qualità dell'aria per il miglioramento della qualità dell'aria ambiente.**

In questo allegato vengono elencate le informazioni dettagliate che devono essere incluse nei piani e nelle tabelle di marcia per la qualità dell'aria. Queste comprendono l'individuazione e la descrizione dei superamenti, le informazioni generali sulla zona,

le autorità competenti, le cause dell'inquinamento, le misure da adottare e i relativi impatti.

- **ALLEGATO IX - Provvedimenti di emergenza da valutare ai fini della loro inclusione nei piani d'azione a breve termine.**

In questo allegato si suggerisce un elenco di provvedimenti di emergenza che gli Stati membri possono valutare di includere nei loro piani d'azione a breve termine. Tra questi rientrano restrizioni alla circolazione dei veicoli, incentivi per i trasporti pubblici, sospensione di attività dei cantieri e altre misure urgenti.

- **ALLEGATO X - Informazione del pubblico.**

In questo allegato vengono definiti i requisiti per l'informazione del pubblico sulla qualità dell'aria. Vengono specificate inoltre le informazioni che devono essere aggiornate regolarmente, trasmesse in modo completo e facilmente accessibili. Tali informazioni devono includere dati sulle concentrazioni di inquinanti, sugli effetti sulla salute, sulle precauzioni raccomandate e sui piani d'azione.

- **ALLEGATO XI - Direttive abrogate ed elenco delle modifiche successive.**

In questo allegato viene fornito l'elenco delle direttive precedenti (2004/107/CE e 2008/50/CE) che vengono abrogate dalla presente direttiva.

- **ALLEGATO XII - Tavola di concordanza**

In questo allegato viene presentata una tabella di concordanza che mostra la corrispondenza tra le disposizioni della presente direttiva e quelle delle direttive abrogate, facilitando la transizione e la comprensione delle nuove norme.

4.2 Confronto tra le direttive 2008/50/CE e (UE) 2024/2881

Le direttive 2008/50/CE e (UE) 2024/2881 rappresentano i due pilastri della legislazione europea sulla qualità dell'aria, con la seconda che funge da rifusione e aggiornamento della prima. Sebbene condividano l'obiettivo fondamentale di migliorare la qualità dell'aria e proteggere la salute umana e l'ambiente, presentano alcune importanti differenze in termini di maggiore ambizione, portata più ampia e rafforzamento dei meccanismi di attuazione.

Per quanto concerne gli aspetti comuni, entrambe le direttive, all'articolo 1, definiscono obiettivi di qualità dell'aria finalizzati a prevenire, ridurre e, ove possibile, eliminare gli effetti negativi dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana e sugli ecosistemi.

Nella lotta alle fonti di inquinamento atmosferico, entrambe sottolineano l'importanza della riduzione delle emissioni a livello locale, nazionale e comunitario. In particolare, la direttiva 2024/2881 introduce soglie più stringenti per alcuni inquinanti chiave, in linea con le nuove evidenze scientifiche e le raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità. Al fine di monitorare e valutare la qualità dell'aria, risulta imprescindibile l'azione coordinata degli Stati membri, che devono predisporre piani di miglioramento e azioni correttive nei casi di superamento dei valori limite fissati dalle direttive, con termini temporali più vincolanti nella nuova direttiva rispetto alla precedente.

Entrambe le direttive riportano inoltre specifiche disposizioni per informare il pubblico sulla qualità dell'aria, rispettivamente all'articolo 26 della direttiva 2008/50 e all'articolo 22 della 2024/2881, con quest'ultima che impone modalità di comunicazione più tempestive, trasparenti e accessibili, anche tramite strumenti digitali e in formati comprensibili al grande pubblico.

Infine in entrambe le Direttive vengono individuati degli inquinanti chiave sono il particolato (PM_{10} , $PM_{2,5}$), il biossido di azoto (NO_2), il biossido di zolfo (SO_2), monossido di carbonio (CO) e ozono (O_3). Queste sostanze non erano state prese in considerazione nella precedente Direttiva europea del 2004.

Sebbene sussistano alcune similitudini tra le due direttive, dall'analisi dei testi emergono chiare differenze su diversi aspetti. Partendo dallo scopo principale, la direttiva (UE) 2024/2881 introduce modifiche sostanziali per allinearsi alle più recenti raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) e per inserirsi in un quadro strategico più ampio volto al conseguimento dell'obiettivo "inquinamento zero" fissato per il 2050,

nell'ambito del Green Deal europeo, con una scadenza intermedia al 2030 per il raggiungimento di traguardi progressivi di miglioramento della qualità dell'aria.

La nuova normativa stabilisce degli standard più rigorosi da perseguire entro il 2030 e soprattutto degli obiettivi a lungo termine, assenti nella Direttiva 2008/50.

Nella seguente tabella vengono riportati i valori limite per le sostanze che hanno un impatto diretto e rilevante sulla salute umana.

SOSTANZA	VALORE LIMITE Direttiva 50/2008 (allegato XI)	VALORE LIMITE Direttiva 2881/2024 (allegato I)	RIDUZIONE PERCENTUALE	NOTE
biossido di zolfo (SO ₂)	125 µg/m ³ (non più di 3 volte l'anno)	50 µg/m ³ (non più di 18 volte l'anno)	-60%	periodo di campionamento: 24 ore
biossido di azoto (NO ₂)	40 µg/m ³	20 µg/m ³	-50%	periodo di campionamento: 1 anno
particolato fine (PM ₁₀)	40 µg/m ³	20 µg/m ³	-50%	periodo di campionamento: 1 anno
particolato fine (PM ₁₀)	50 µg/m ³	45 µg/m ³	-10%	periodo di campionamento: 24 ore
particolato fine (PM _{2,5})	25 µg/m ³	10 µg/m ³	-60%	periodo di campionamento: 1

				anno
benzene	5 µg/m ³	3,4 µg/m ³	-32%	periodo di campiona mento: 1 anno
monossido di carbonio (CO)	10 mg/m ³	10 µg/m ³	0%	periodo di campiona mento: 8 ore
piombo (Pb)	0,5 µg/m ³	0,5 µg/m ³	0%	periodo di campiona mento: 1 anno
ozono (O ₃)	120 µg/m ³ (non più di 25 volte l'anno)	120 µg/m ³ (non più di 18 volte l'anno)	0%	periodo di campiona mento: 1 anno

*Tabella 16: Riduzione percentuale calcolata con: (“valore direttiva 2008” - “valore direttiva 2024”) / (“valore direttiva 2008”) * 100*

Analizzando i valori limite riportati in tabella, emerge chiaramente che la direttiva (UE) 2024/2881 risulti complessivamente più restrittiva rispetto alla 2008/50/CE. Infatti, su un totale di otto sostanze considerate, per ben cinque di esse i valori di riferimento risultano inferiori. Ciò è particolarmente evidente per il biossido di azoto e il PM_{2,5}, con riduzioni rispettivamente del 60%.

Anche per il PM₁₀, considerando il periodo di campionamento annuale, si osserva una riduzione significativa del 50%, sebbene l'intervento risulti meno stringente sul valore limite riferito alle 24 ore. Questa apparente discrepanza può essere giustificata dal fatto che, su intervalli temporali brevi, eventi puntuali di origine naturale o antropica possono influenzare

in modo significativo le concentrazioni misurate, rendendo meno affidabile un limite troppo severo nel breve periodo.

Sono invece sostanzialmente confermati i valori limite per altre sostanze: monossido di carbonio, piombo e ozono. Per quanto riguarda l'ozono, tuttavia, la direttiva stabilisce un obiettivo di lungo termine da raggiungere entro il 2050, che prevede una riduzione del valore obiettivo del 17%.

La direttiva (UE) 2024/2881 pone maggiore enfasi sull'incremento e sul miglioramento della rete di monitoraggio, in particolare in caso di picchi di inquinamento, anche quando non vengono superati i limiti di legge, e introduce il concetto innovativo di “supersiti di monitoraggio”, cui è dedicato l'articolo 10. Con “supersiti di monitoraggio” si definiscono siti, sia rurali che urbani, in cui vengono combinati più punti di campionamento per diversi inquinanti e su periodi temporali estesi, al fine di ottenere dati più completi e rappresentativi.

Una differenza significativa introdotta dalla direttiva (UE) 2024/2881 è il riconoscimento, all'articolo 28, del diritto per i cittadini di chiedere un risarcimento quando la loro salute sia stata danneggiata a causa della violazione delle norme sulla qualità dell'aria da parte di uno Stato membro. Questo diritto non era esplicitamente previsto nella direttiva precedente e rappresenta un rafforzamento della tutela giuridica dei cittadini.

Inoltre, la nuova normativa menziona esplicitamente la necessità di monitorare anche l'ammoniaca, il metano e il particolato ultrafine, pur senza fissare per il momento valori limite o obiettivi specifici di riduzione per tali inquinanti, in attesa di ulteriori studi e raccomandazioni scientifiche.

In sintesi, la Direttiva (UE) 2024/2881 rappresenta un'evoluzione significativa rispetto alla 2008/50/CE, con obiettivi più ambiziosi, standard più stringenti e un focus rafforzato sui diritti dei cittadini e sull'allineamento con le raccomandazioni scientifiche più recenti dell'OMS.

4.3. La normativa italiana

Il nostro paese ha recepito la Direttiva 2008/50/CE con diversi atti normativi. Il più importante e pertanto di riferimento è il Decreto Legislativo n° 155 del 2010. Tale decreto è ora superato dalla Direttiva (UE) 2024/2881 e pertanto attende di essere abrogato.

4.2.1. Decreto Legislativo n° 155 del 2010

Il Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155 ²⁶, rappresenta la concretizzazione nel panorama giuridico italiano della Direttiva 2008/50/CE. Questo decreto non solo attua la suddetta direttiva, ma procede anche a abrogare e sostituire le precedenti disposizioni che davano attuazione alla Direttiva 2004/107/CE, consolidando così la legislazione in materia.

L'Articolo 1 del decreto si configura come la sua pietra angolare, definendo i principi guida e le finalità che ne informano l'intera struttura. Il suo scopo primario è l'istituzione di chiari obiettivi per la qualità dell'aria, essenziali per prevenire o attenuare gli impatti negativi dell'inquinamento sia sulla salute umana che sull'equilibrio degli ecosistemi. Parallelamente, il decreto impone la valutazione sistematica della qualità dell'aria su tutto il territorio nazionale, assicurando l'applicazione di metodi e criteri comuni per garantire omogeneità e affidabilità dei dati. Un obiettivo importante del Decreto Legislativo n° 155 del 2010 consiste nella raccolta e nella diffusione delle informazioni sulla qualità dell'aria. Si tratta di strumenti fondamentali per informare la cittadinanza sulle strategie di contrasto all'inquinamento, monitorare le variazioni nel tempo e valutare l'efficacia delle misure adottate. Si persegue l'obiettivo di preservare la buona qualità dell'aria laddove già presente e, contestualmente, di migliorarla nelle aree che ne necessitano. Fondamentale è anche l'impegno a garantire la piena accessibilità delle informazioni sulla qualità dell'aria al pubblico e a incentivare una più stretta cooperazione tra gli Stati membri dell'Unione Europea nella lotta all'inquinamento atmosferico. Per raggiungere queste ambiziose finalità, il decreto stabilisce con precisione i valori limite per le concentrazioni di inquinanti chiave come biossido di zolfo, biossido di azoto, benzene, monossido di carbonio, piombo e PM₁₀ nell'aria ambiente. Definisce inoltre i livelli critici per il biossido di zolfo e gli ossidi di azoto, oltre alle soglie di allarme per biossido di zolfo e biossido di azoto. Per il PM_{2,5}, introduce un valore limite, un valore obiettivo, l'obbligo di concentrazione dell'esposizione e un obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione, a testimonianza della crescente attenzione verso questa specifica frazione del

particolato. Vengono inoltre fissati valori obiettivo per arsenico, cadmio, nichel e benzo(a)pirene, e per l'ozono si prevedono valori obiettivo, obiettivi a lungo termine, soglie di allarme e soglie di informazione. L'intero impianto normativo si basa su principi cardine quali l'uniformità degli standard qualitativi nella valutazione e gestione dell'aria, la tempestività nell'acquisizione e diffusione dei dati, l'organizzazione del territorio nazionale in zone per una gestione mirata della qualità dell'aria e l'adozione di piani e misure efficaci per affrontare e superare i limiti, agendo direttamente sulle principali fonti di emissione.

L'Articolo 2 è dedicato alle definizioni, fondamentali per garantire una corretta comprensione di tutti i termini riportati nel testo del decreto. Chiarisce che per "aria ambiente" si intende l'aria esterna nella troposfera, escludendo specificamente quella presente negli ambienti di lavoro. Un "inquinante" è definito come qualsiasi sostanza presente nell'aria ambiente che, in virtù della sua natura o concentrazione, può esercitare effetti deleteri sulla salute umana o sull'ambiente. Il "livello" si riferisce sia alla concentrazione di un inquinante nell'aria che alla sua deposizione su una superficie in un intervallo di tempo specifico. La "valutazione" comprende l'insieme dei metodi impiegati per misurare, calcolare, stimare o prevedere i livelli degli inquinanti. Il territorio nazionale è segmentato in "zone", ossia porzioni delimitate per finalità di valutazione e gestione della qualità dell'aria, e "agglomerati", che identificano aree urbane con specifiche soglie demografiche o di densità. Un' "area di superamento" è identificata come una porzione all'interno di una zona o agglomerato dove i valori limite o obiettivo sono stati ecceduti. Il "valore limite" è un parametro stabilito scientificamente per prevenire effetti nocivi, da rispettare entro un termine. Il "livello critico" indica una soglia oltre la quale possono manifestarsi effetti negativi diretti su piante o ecosistemi naturali, escludendo gli esseri umani. Vengono definiti anche il "margine di tolleranza", il "valore obiettivo", la "soglia di allarme" e la "soglia di informazione", quest'ultime fondamentali per la gestione delle emergenze e la comunicazione al pubblico. Il "valore a lungo termine" è inteso come un livello da perseguire nel lungo periodo per una protezione complessiva. Sono specificate le definizioni per l'IEM (indicatore di esposizione media), il PM_{10} e il $PM_{2,5}$, basate sulle loro caratteristiche dimensionali e di penetrazione. Gli "ossidi di azoto" sono la somma delle concentrazioni di monossido e biossido di azoto. Viene chiarito il "contributo di fonti naturali" come emissioni non legate direttamente o indirettamente ad attività umane. L'articolo include inoltre altre definizioni tecniche relative ai metodi di misurazione (siti fissi, misurazioni indicative, tecniche di stima obiettiva), alle soglie di valutazione, alle reti e ai programmi di misura, ai sistemi di garanzia di qualità e ai precursori dell'ozono, fornendo un lessico completo per l'applicazione del decreto.

La normativa procede con la divisione del territorio nazionale in zone e agglomerati ai fini della valutazione della qualità dell'aria ambiente che deve rispettare gli obiettivi di qualità previsti nell'allegato 1. Nei seguenti articoli vengono descritte le caratteristiche dei piani per il raggiungimento dei valori limite e dei livelli critici, per il perseguimento dei valori obiettivo e per il mantenimento del relativo rispetto. Vengono anche descritte le modalità di attuazione di tali piani in modo particolare vengono riportati gli ambiti di intervento su cui gli enti locali dovranno concentrarsi: limiti all'utilizzo di alcuni combustibili, le emissioni dovute ai cantieri, quelle dovute alle navi ormeggiate, quelle dovute a pratiche agricole (concimazione), le combustioni all'aperto e la circolazione dei veicoli a motore. Come richiesto dalla direttiva europea 50/2008 si pone particolare attenzione alla riduzione all'esposizione di $PM_{2,5}$ e ai valori obiettivo per quanto riguarda l'ozono.

Negli allegati 1, 2 e 3 sono presenti gli obiettivi di qualità dei dati, le soglie di valutazione, le definizioni, la descrizione dei siti su macroscala e microscala. Nell'allegato 6 invece sono riportati i metodi di riferimento per la misurazioni dei diversi inquinanti come precedentemente descritti.

Capitolo 5 — Proposta didattica: un modulo interdisciplinare per le scuole secondarie

5.1. Obiettivi formativi del modulo

Come evidenziato nei paragrafi precedenti, la Direttiva (UE) 2024/2881 prevede, nell'Allegato X, misure specifiche per informare il pubblico riguardo alle concentrazioni degli inquinanti atmosferici e ai potenziali impatti sulla salute umana e sugli ecosistemi. Tuttavia, a causa della complessità tecnica e terminologica delle normative, queste risultano spesso difficili da comprendere per i non addetti ai lavori. Per sensibilizzare l'opinione pubblica sull'importanza del controllo della qualità dell'aria e sul significato dei limiti di legge, è fondamentale intervenire a livello scolastico, specialmente nelle scuole secondarie di secondo grado vista la complessità dell'argomento, lavorando con le nuove generazioni attraverso attività teoriche, pratiche ed esperienziali. Tali percorsi educativi consentono non solo di approfondire la conoscenza degli inquinanti atmosferici, ma anche di far conoscere le figure professionali e gli enti che si occupano del monitoraggio della qualità dell'aria, come ARPA, Università, Politecnico, Associazione Meteorologica Italiana, e altri.

Il modulo si inserisce pienamente nel quadro dell'Educazione Civica, che tra i suoi tre pilastri prevede l'educazione alla sostenibilità ambientale. Ha inoltre una funzione di orientamento in uscita, risultando particolarmente utile per gli studenti interessati alle discipline STEM e ai percorsi universitari e professionali ad esse collegati.

Il tema della sostenibilità ambientale è spesso trattato nelle scuole con l'obiettivo di sensibilizzare le nuove generazioni di fronte alle sfide globali presenti e future. L'Agenda 2030, sottoscritta il 25 settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri delle Nazioni Unite e approvata dall'Assemblea Generale dell'ONU, rappresenta una solida base di riferimento da cui partire per costruire un mondo diverso e garantire a tutti la possibilità di vivere in modo sostenibile dal punto di vista ambientale, sociale ed economico.

Tra i 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile (Goal), il numero 3 riguarda "Salute e benessere" e mira a ridurre in modo significativo il numero di decessi e malattie derivanti da sostanze chimiche pericolose, nonché dall'inquinamento e dalla contaminazione di aria, acqua e suolo. Il Goal 4, invece, tratta dell'istruzione di qualità, fondamentale per fornire a tutti gli studenti le conoscenze e le competenze necessarie a promuovere lo sviluppo sostenibile attraverso, tra l'altro, l'educazione per la sostenibilità ambientale e stili di vita sostenibili, il rispetto dei diritti umani, l'uguaglianza di genere, la promozione di una cultura di pace e non violenza, la

cittadinanza globale e la valorizzazione della diversità culturale e del contributo della cultura allo sviluppo sostenibile.

5.2. Destinatari e competenze in uscita

L'attività è destinata a studenti di quarta liceo scientifico. La scelta è motivata dal fatto che gli studenti possiedono già le competenze necessarie per affrontare in modo proficuo la tematica e, inoltre, nel programma di scienze di questo anno scolastico si studia l'anatomia umana, affrontando tra i vari apparati anche quello respiratorio e le patologie a esso associate.

Dal modulo didattico, che verrà descritto successivamente, ci si aspetta che, al termine del percorso, gli studenti sviluppino una maggiore consapevolezza sugli impatti dell'inquinamento dell'aria sulla salute e sull'ambiente. Tale consapevolezza costituirà il punto di partenza per una partecipazione attiva e responsabile alla vita sociale, finalizzata alla costruzione di una società più sostenibile e rispettosa dell'ambiente.

La proposta didattica consentirà inoltre di potenziare alcune competenze chiave per l'apprendimento permanente, secondo la Raccomandazione del 2006 del Parlamento Europeo e del Consiglio ²⁷. In particolare le competenze maggiormente coinvolte sono: competenza alfabetica funzionale; competenza matematica e competenza di base in scienze e tecnologie; competenza digitale; competenza personale, sociale e capacità di imparare ad imparare; competenza sociale e civica in materia di cittadinanza.

5.3. Struttura del modulo

L'itinerario didattico proposto prevede una serie di moduli. Si inizia con una lezione frontale introduttiva finalizzata ad inquadrare il tema coinvolto nel progetto. Successivamente verranno previste delle uscite sul territorio per approfondire l'azione di ricerca di alcuni enti impegnati nel monitoraggio della qualità dell'aria e nella diffusione dei dati. Infine, gli studenti saranno coinvolti in attività pratiche che li vedranno protagonisti attivi del processo di apprendimento. Tali attività prevederanno alcuni laboratori sui principi fisico-chimici riguardanti la diffusione di inquinanti in atmosfera e la realizzazione di un articolato progetto sulla costruzione di uno strumento di monitoraggio del particolato fine mediante l'ausilio della scheda ARDUINO.

A seguire vengono descritti nel dettaglio i moduli proposti

5.3.1. Lezione frontale introduttiva

Il modulo si apre con una lezione frontale sul tema dell'inquinamento dell'aria, con un approfondimento specifico sul caso della Pianura Padana, area fortemente interessata dal fenomeno e di diretto interesse per gli studenti, dato il contesto territoriale di Torino. Particolare enfasi sarà posta sulle polveri sottili (PM_{2,5} e PM₁₀) e sull'ozono troposferico, illustrandone le fonti, gli effetti sulla salute e le implicazioni ambientali.

La lezione sarà progettata e condotta congiuntamente da tutti gli insegnanti coinvolti, al fine di garantire un approccio multidisciplinare.

Dal punto di vista metodologico, la lezione frontale tradizionale tende a ridurre la partecipazione attiva degli studenti; pertanto, sarà fondamentale introdurre strategie per attivarne la curiosità e stimolare l'interazione. In apertura, si potrà ricorrere a domande stimolo formulate in modo provocatorio, ad esempio: «Secondo voi, è più inquinata l'aria in aula o quella fuori dalla finestra?».

Per catturare l'attenzione e sottolineare la rilevanza del tema, saranno presentati dati reali estrapolati dal sito di ARPA Piemonte sulla concentrazione di PM₁₀ a Torino. Seguirà un breve sondaggio interattivo, realizzato con strumenti digitali gratuiti e accessibili (Mentimeter, Google Form, Kahoot) e fruibile tramite smartphone o tablet, per raccogliere percezioni, preconetti e conoscenze pregresse degli studenti.

Terminata questa fase di innesco, i docenti proporranno spiegazioni brevi (10–15 minuti) intervallate da discussioni in piccoli gruppi per favorire il confronto e lo scambio di idee. Le idee emerse saranno raccolte su una lavagna collaborativa virtuale, così da valorizzare i contributi di tutti. Durante la lezione, saranno effettuati continui riferimenti alla vita reale, con esempi vicini all'esperienza diretta degli studenti. Essi potranno verificare in tempo reale, tramite app o siti specializzati, la concentrazione degli inquinanti in città e confrontarla con i limiti previsti dalla normativa vigente.

A conclusione della lezione frontale partecipata, ciascun gruppo elaborerà:

- Una mappa concettuale degli argomenti trattati;
- Un breve post informativo per i canali social della scuola, con l'obiettivo di sensibilizzare l'opinione pubblica sul tema dell'inquinamento e della qualità dell'aria;

- Una domanda di approfondimento da utilizzare come spunto per una successiva lezione o dibattito.

A seguire viene riportata una tabella riassuntiva con le tematiche affrontate e le tempistiche delle varie attività proposte nella lezione frontale introduttiva:

Argomento	Tempistiche	Metodologia utilizzata
Domanda stimolo	5 minuti	Discussione guidata in plenaria
Lettura e interpretazione delle concentrazioni di inquinanti rilevate da ARPA Piemonte	10 minuti	Analisi dati reali e confronto con i limiti normativi
La struttura verticale dell'atmosfera	10 minuti	Spiegazione breve con supporto di immagini e schemi
I principali inquinanti troposferici	15 minuti	Lezione frontale con esempi e riferimenti al contesto locale
Normativa europea di riferimento e obiettivi "inquinamento zero"	10 minuti	Presentazione con slide e richiami alla Direttiva (UE) 2024/2881
Confronto in piccoli gruppi	15 minuti	Discussione collaborativa con raccolta idee su lavagna virtuale
Conclusione dell'attività (mappa concettuale, post e domanda di approfondimento)	15 minuti	Lavoro di gruppo e restituzione in plenaria

Tabella 17: Tematiche, tempistiche e modalità didattiche dei contenuti della lezione frontale

5.3.2. Escursioni e visite guidate presso enti di ricerca e di monitoraggio

Dopo aver affrontato in aula i temi generali relativi all'inquinamento atmosferico e ai suoi effetti sull'ambiente e sulla salute umana, la proposta didattica prevede uscite sul territorio per

incontrare i professionisti che, ogni giorno, si occupano di monitoraggio e analisi dei dati ambientali. Questi momenti costituiscono per gli studenti del triennio un'importante occasione di orientamento, sia in vista di percorsi accademici futuri, sia per esplorare possibili sbocchi professionali.

L'opportunità di osservare direttamente la strumentazione e la rete di monitoraggio permette di cogliere la complessità e la capillarità delle operazioni necessarie per garantire una corretta rilevazione dei dati. Tali esperienze sono pensate per stimolare domande, riflessioni e curiosità che vadano oltre la lezione frontale.

Tra le istituzioni coinvolte, l'Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale (ARPA)²⁸ svolge un ruolo di primo piano nella misurazione della qualità dell'aria. In Piemonte, il Sistema Regionale di Rilevamento della Qualità dell'Aria (SRRQA) è costituito da 56 stazioni fisse, di cui quattro di proprietà privata, collocate in prossimità di impianti industriali (tra cui un termovalorizzatore, una centrale termoelettrica a metano e un'azienda chimica) per valutarne l'impatto locale. Le stazioni ospitano sia analizzatori automatici, che forniscono dati in continuo (generalmente con cadenza oraria), sia campionatori. Per il particolato PM₁₀ e PM_{2,5} vengono utilizzati entrambi: gli analizzatori forniscono dati orari o giornalieri, mentre i campionatori forniscono dati giornalieri. I valori relativi a IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e metalli, determinati in laboratorio sui filtri di particolato PM₁₀ giornalieri, sono invece disponibili con cadenza mensile. La visita a una stazione di monitoraggio permetterà agli studenti di osservare da vicino le apparecchiature utilizzate per la misura del particolato, comprendendo così il primo passaggio di un processo che culmina nella pubblicazione, sul sito di ARPA Piemonte, dei bollettini con le concentrazioni degli inquinanti.

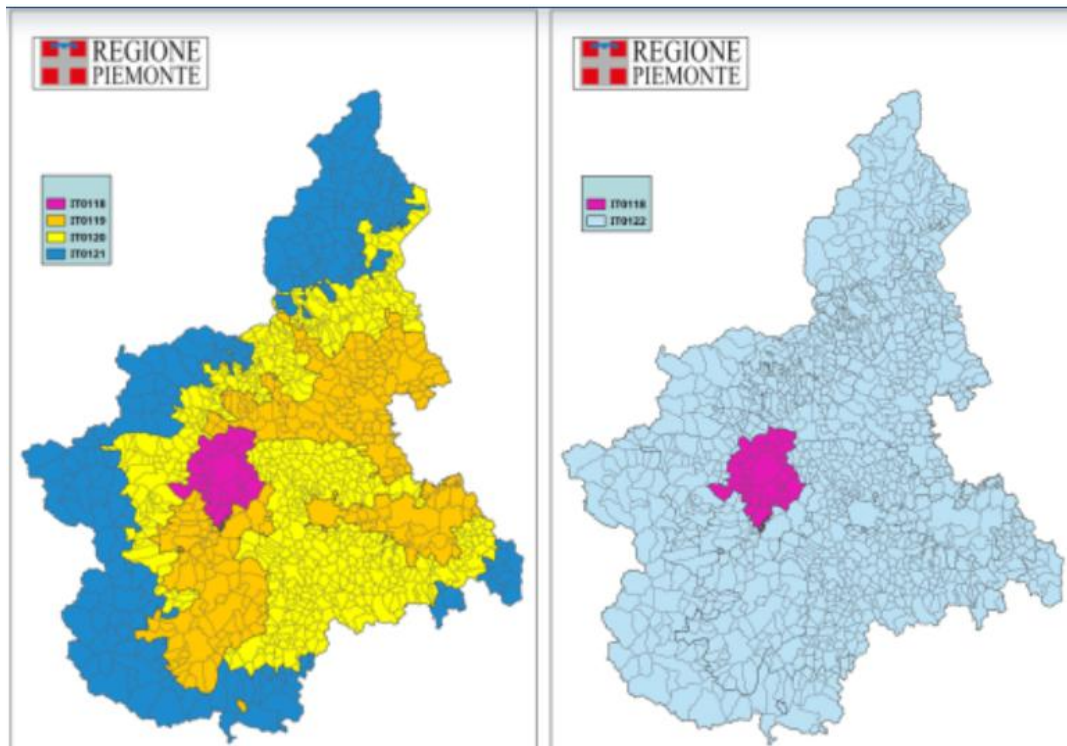


Fig. 06: Rappresentazione grafica della zonizzazione riferita agli obiettivi di protezione della salute umana, in riferimento agli inquinanti NO_2 , SO_2 , C_6H_6 , CO , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, Pb , As , Cd , Ni , B(a)P a sinistra e in riferimento all'ozono sulla destra ²⁹

Oltre alla visita presso ARPA Piemonte, una seconda uscita sarà dedicata alla comprensione di come si sviluppa la ricerca scientifica nel campo del monitoraggio e dello studio della qualità dell'aria. A livello regionale e nazionale, il Politecnico di Torino riveste un ruolo di rilievo grazie alle attività condotte dal Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), impegnato in progetti di ricerca e iniziative di *Citizen Science* che coinvolgono cittadini, scuole ed enti locali. Tra i progetti più significativi si colloca ARIA P@LIT@, volto a rendere più visibili e comprensibili le dinamiche ambientali che influenzano la vita quotidiana ³⁰.

Le attività di ricerca del DIATI in questo ambito spaziano su diversi fronti ³¹:

- modellazione numerica della dispersione di inquinanti a scala urbana;
- misurazioni della qualità dell'aria;
- studi sperimentali sulla dispersione di inquinanti in viali alberati;
- analisi dell'isola di calore urbana;
- valutazione della ventilazione naturale degli edifici;

- studio della dispersione di inquinanti da siti industriali;
- progetti di *Citizen Science* per il monitoraggio ambientale.

Particolarmente rilevante per gli studenti sarà l'incontro con i ricercatori del progetto Misure e qualità dell'aria, durante il quale potranno osservare in funzione la stazione di misura mobile CC-Moving-Lab ³², costituita da un van denominato TrAIRer (TRailer for AIR and Environmental Research). Questa strumentazione consente di effettuare rilievi in diverse aree urbane e industriali, offrendo un esempio concreto di ricerca applicata e flessibile, capace di raccogliere dati direttamente sul campo.

Come ultima proposta, il percorso prevede un'uscita presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRiM) di Torino, ente pubblico nazionale che svolge e promuove attività di ricerca nel campo della Metrologia ³³. L'INRiM ha il compito di realizzare e mantenere i campioni nazionali delle unità di misura, garantendo la riferibilità e il valore legale delle misurazioni utilizzate in diversi settori, dalla ricerca scientifica alla tutela della salute e dell'ambiente ³⁴.

Questa visita permetterà agli studenti di comprendere in profondità la complessità legata alla progettazione, calibrazione e utilizzo degli strumenti di misura impiegati nei monitoraggi ambientali. L'incontro diretto con i ricercatori offrirà l'opportunità di vedere come la precisione metrologica sia alla base di ogni dato affidabile, costituendo un passaggio fondamentale per l'interpretazione scientifica e la definizione di politiche ambientali efficaci. Anche se non direttamente visitabile verrà proposta anche la consultazione on line del database messo a disposizione dalla regione Piemonte sulla qualità dell'aria di modo che ogni studente possa prendere atto del materiale di facile accesso già presente in rete ^{35, 36}.

5.3.3 Laboratori pratici nelle singole discipline

Nell'ambito didattico, l'ascolto passivo dei contenuti proposti dal docente non è sufficiente a garantire una piena interiorizzazione degli argomenti. È quindi fondamentale offrire agli studenti esperienze dirette, capaci di stimolare la curiosità, consolidare le conoscenze acquisite e favorire un apprendimento duraturo.

I laboratori didattici, realizzati in spazi attrezzati come il laboratorio di chimica o l'aula di fisica, costituiscono un contesto privilegiato per questo scopo. In tali ambienti gli studenti

hanno l'opportunità di svolgere semplici esperimenti che favoriscono lo sviluppo del pensiero critico e delle capacità di *problem solving*, attraverso l'applicazione concreta del metodo scientifico sperimentale.

Seguendo le fasi caratteristiche della ricerca, i laboratori sono stati progettati per guidare gli studenti in un percorso che va dalla raccolta dei dati, alla loro analisi critica, fino alla comunicazione dei risultati. La maggior parte delle attività verrà svolta in piccoli gruppi (4–5 studenti), secondo i principi del *cooperative learning*, così da garantire il coinvolgimento diretto di ciascun partecipante.

È importante sottolineare che i laboratori non devono configurarsi come semplici dimostrazioni condotte dal docente, che rischierebbero di rendere gli studenti spettatori passivi, bensì come occasioni di partecipazione attiva ed esperienziale. Questo approccio innovativo si rivela particolarmente utile per affrontare contenuti complessi e talvolta ostici, come quelli relativi alla normativa europea in materia ambientale.

Per ciascun esperimento verranno predisposti due strumenti operativi:

- una guida per l'insegnante, utile a strutturare e gestire l'attività in modo chiaro ed efficace;
- una scheda di laboratorio semplificata per lo studente, che accompagnerà i ragazzi nello svolgimento dell'esperimento e nella raccolta dei dati.

Nella seguente tabella vengono descritti i singoli paragrafi che costituiscono la guida per l'insegnante.

Paragrafo	Descrizione
Argomento	Indicare i principi chimici e fisici coinvolti nell'esperimento, chiarendo i concetti teorici che si intende approfondire.
Titolo	Inserire un titolo accattivante e stimolante, in grado di incuriosire gli studenti e anticipare il contenuto dell'attività.
Obiettivi di apprendimento	Specificare le competenze e le conoscenze che gli studenti dovranno acquisire al termine dell'esperienza, evidenziando anche il percorso

	metodologico seguito (collegamento con il curricolo, competenze chiave, ecc.).
Risultati attesi	Definire le ipotesi che si prevede possano emergere e ciò che ci si aspetta dall'esperimento, in coerenza con il metodo scientifico (osservazione → ipotesi → sperimentazione → analisi → conclusioni).
Metodologie	Approccio di lavoro che viene proposto dall'insegnante per guidare gli studenti durante l'esperienza laboratoriale.
Materiali	Elencare i materiali di uso comune e la strumentazione necessaria per l'attività, con eventuali alternative in caso di indisponibilità.
Procedura	Fornire un protocollo dettagliato, chiaro e sequenziale, che permetta di svolgere l'esperimento in sicurezza ed efficacia. Indicare eventuali varianti o suggerimenti per adattare l'attività ai diversi livelli di competenza degli studenti.
Conclusioni	Saper ricondurre le osservazioni fatte a leggi e principi chimico-fisici noti

Tabella 18: Elementi della scheda di laboratorio comuni a tutte le esperienze

Gli esperimenti verranno proposti in funzione di quattro fasi didatticamente rilevanti. Nella prima serie di esperienze si cercherà di approfondire alcuni principi chimico-fisici che stanno alla base della diffusione degli inquinanti atmosferici e della loro misurazione. Successivamente si focalizzerà l'attenzione sulle tecniche di monitoraggio degli inquinanti mediante semplici attività che prevedono la realizzazione di modelli di strumenti di misurazione, coinvolgendo la manualità e creatività degli studenti.

Per quanto concerne l'analisi dei dati verranno proposte delle attività laboratoriali a partire da misurazioni effettuate da ARPA e da altri enti di ricerca al fine di studiare eventuali correlazioni e causalità tra variabili considerate (concentrazione inquinanti, temperatura, precipitazioni, stagionalità, intensità del vento, ecc.). Tali attività coinvolgeranno competenze matematiche e logiche. Infine è previsto un laboratorio per sottolineare l'importanza di una comunicazione efficace dei risultati, basata su di un approccio scientifico, scevra da pregiudizi e preconcetti.

Le metodologie didattiche prevalenti saranno il *Cooperative Learning* e la *Didattica Laboratoriale*. Nel primo gli studenti lavorano in piccoli gruppi su obiettivi comuni. Ognuno ha un ruolo specifico e contribuisce al risultato finale, favorendo l'interdipendenza positiva e la responsabilità individuale. Con la *didattica laboratoriale* l'apprendimento avviene attraverso l'esperienza diretta. Gli studenti "imparano facendo", mettendo in pratica teorie e concetti in un contesto operativo. Si applica sia in laboratori scientifici che in quelli umanistici o artistici.

Laboratorio n° 1

Argomento: dipendenza della diffusione dalla temperatura del fluido

Titolo: Diffusione al ritmo di Kelvin

Obiettivi di apprendimento: rendere gli studenti coscienti della dipendenza che c'è tra la velocità di diffusione e temperatura del fluido

Risultati attesi: verificare con misure di distanze e tempo che la velocità di diffusione è maggiore quando il fluido si trova ad una temperatura maggiore

Metodologie: laboratorio a gruppi di 4 studenti

Materiali: due contenitori trasparenti aventi stessa forma e stesso volume, acqua, inchiostro, due pipette, termometro, videocamera dello smartphone.

Procedura:

- mettere una certa quantità di acqua a temperatura ambiente in un contenitore;
- riscaldare altra acqua e metterne la stessa quantità nell'altro contenitore;
- misurare le temperature del fluido nei due contenitori;
- immettere contemporaneamente la stessa quantità di inchiostro, utilizzando le pipette, nei due contenitori appaiati filmando il tutto con lo smartphone;
- qualitativamente l'osservazione dei due contenitori fornisce un'indicazione della dipendenza tra il fenomeno della diffusione e la temperatura a cui esso avviene.

Il video permette di svolgere delle misure quantitative a intervalli regolari di tempo per stabilire la velocità con cui il colorante raggiunge alcuni punti fissati del contenitore nei due casi.

Conclusioni: Qualitativamente l'osservazione dei due contenitori fornisce un'indicazione dell'influenza della temperatura sulla diffusione. Il video permette di svolgere delle misure quantitative a intervalli regolari di tempo per stabilire la velocità con cui il colorante raggiunge alcuni punti fissati del contenitore, nelle due condizioni sperimentali.

Laboratorio n° 2

Argomento: dipendenza della diffusione dalla massa molecolare della sostanza (legge di Graham)

Titolo: Pesi piuma e pesi massimi: questione di urti e masse

Obiettivi di apprendimento: rendere gli studenti coscienti della dipendenza che c'è tra la velocità di diffusione e la massa molecolare della sostanza che diffonde. Verificare la legge di Graham.

Risultati attesi: verificare con misure di distanze e tempo che la velocità di diffusione è maggiore quando la massa molecolare della sostanza che diffonde è minore. I vapori di ammoniaca (NH_3) e di acido cloridrico (HCl) diffondono all'interno del tubo e reagiscono, quando si raggiungono, formando cloruro di ammonio (NH_4Cl) un solido bianco che si manifesta nel tubo sotto forma di una nebbiolina bianca.

Metodologie: esperimento condotto dal docente con osservazione a piccoli gruppi di 4 elementi

Materiali: tubo di vetro trasparente aperto da entrambi i lati, due tappi, sostegno per il tubo, cotone idrofilo, due contagocce, cronometro, righello, pennarello cancellabile, soluzione concentrata di ammoniaca, soluzione concentrata di acido cloridrico.

Procedura:

Attenzione: L'esperimento deve essere condotto sotto cappa aspirante

- fissare mediante il sostegno il tubo in posizione orizzontale;
- inumidire uno dei batuffoli di cotone idrofilo, precedentemente adattati al diametro del tubo, con alcune gocce di soluzione concentrata di acido cloridrico (HCl) e l'altro batuffolo con alcune gocce di una soluzione concentrata di ammoniaca (NH₃);
- inserire velocemente i due batuffoli nelle estremità opposte del tubo e tappare ermeticamente con i tappi; azionare il cronometro e annotare il tempo impiegato affinché in un certo punto del tubo si formi una nebbiolina bianca di gas; segnare sul tubo con il pennarello il punto esatto in cui si è formata la nebbiolina;
- utilizzando la riga millimetrata misurare la distanza del punto-nebbia dal batuffolo di NH₃ e da quello di HCl, questo permetterà di calcolare la velocità con cui i due gas hanno diffuso all'interno del tubo.

Conclusioni: si osserva qualitativamente che il punto di formazione del NH₄Cl si trova più lontano dall'ammoniaca, questo permette di dedurre che ad una minore massa molecolare, del NH₃ rispetto all'HCl, corrisponde una velocità di diffusione maggiore. Quantitativamente si calcola, ipotizzando un moto uniforme, la velocità per ciascun vapore come spazio percorso in rapporto al tempo trascorso. Si potrà verificare che la velocità è maggiore per la sostanza con massa molecolare minore.

(Massa Molecolare NH₃ = 17,034 u) < (Massa Molecolare HCl = 36,458 u)

Laboratorio n° 3

Argomento: irraggiamento e convezione

Titolo: Chi scalda l'aria e come

Obiettivi di apprendimento: comprendere il ruolo che ha la propagazione del calore mediante irraggiamento nel regolare la temperatura dell'atmosfera.

Risultati attesi: osservare che la colorazione della superficie irradiata ne influenza la temperatura e di conseguenza la capacità di irradiare a sua volta nell'infrarosso

Metodologie: laboratorio a gruppi di 4 studenti

Materiali: due vaschette di plastica con coperchio, quattro tubicini, due piume molto leggere, terriccio o sabbia (sufficiente per riempire le vaschette), un foglio di cartoncino o tessuto scuro, un foglio di cartoncino o tessuto chiaro, due termometri, una fonte di luce e calore (come una lampada a incandescenza da 100-150W).

Procedura:

- nel primo contenitore inserire il terriccio e coprirlo con il cartoncino nero;
- nel secondo contenitore inserire la stessa quantità di terriccio e coprirlo con il cartoncino bianco;
- assicurarsi che i termometri siano posizionati con il bulbo appena sopra la superficie della terra, ma senza toccarla;
- mettere il coperchio trasparente in cui si sono praticati due fori per inserire i tubicini in verticale (due tubicini per ogni coperchio);
- inserire i tubicini in modo tale che uno arrivi fino alla quota in cui è situato il termometro, l'altro arrivi alla parte alta del contenitore e entrambi sbuchino superiormente della stessa altezza;
- fissare le piume ai due tubicini in modo che siano libere di muoversi in caso di passaggio di aria;
- registrare le temperature iniziali di entrambi i termometri;

- posizionare i due contenitori a uguale distanza dalla lampada, in modo che ricevano la stessa quantità di luce;
- accendere la lampada e cronometrare il tempo;
- registrare le temperature ogni 5 minuti per circa 30 minuti;
- registrare i tempi in cui le piume iniziano a muoversi e osservare se ci sono differenze nel moto tra i due tubicini dello stesso contenitore.

Conclusioni: la temperatura dell'aria nel contenitore con la superficie nera aumenterà molto più rapidamente rispetto a quella nel contenitore con la superficie bianca. Anche il tempo in cui inizia a oscillare la piuma sul contenitore nero è minore perché avendo temperatura maggiore innesca più rapidamente il meccanismo di convezione responsabile del flusso di aria che esce dal tubicino sulla sommità. La piuma fissata al tubo che “pesca” aria in prossimità della superficie (bianca o nera) si solleva perché il flusso di aria più “calda” è ascensionale mentre l'altra piuma tende ad essere spinta verso il basso per effetto della corrente più “fredda” che entra nel contenitore.

Laboratorio n° 4

Argomento: inversione termica

Titolo: Densità che fanno la differenza

Obiettivi di apprendimento: osservare e comprendere il fenomeno della convezione in un fluido

Risultati attesi: verificare qualitativamente che un fluido a temperatura maggiore si stratifica al di sopra di un fluido a temperatura inferiore poiché la densità è minore.

Metodologie: laboratorio a gruppi di 4 studenti

Materiali: quattro bicchieri di vetro uguali con il collo largo (si devono poter sovrapporre perfettamente a due a due in modo che le imboccature coincidano), bollitore, due coloranti diversi, termometro, cartoncino sottile rigido.



Fig.07: realizzazione dell'esperimento relativo all'inversione termica. Il contenitore superiore contiene acqua calda (meno densa) e quello inferiore acqua a temperatura ambiente (più densa)

Procedura:

- riempire due bicchieri con acqua a temperatura ambiente due con acqua precedentemente riscaldata con il bollitore a circa 80 °C;
- nei bicchieri di acqua a temperature minori, versare il colorante blu, e nelle altre, il colorante rosso;
- agitare o mescolare per distribuire il colore in modo uniforme;
- posizionare sul tavolo un bicchiere di acqua “calda” e uno di acqua “fredda”;
- prendere il cartoncino e appoggiarlo sull'imboccatura del restante bicchiere di acqua fredda;
- capovolgere il bicchiere, facendo attenzione a non far uscire l'acqua, e appoggiarla sull'imboccatura del bicchiere di acqua calda che si trova sul tavolo;
- allineare i bordi delle due aperture. sfilare il cartoncino tenendo fermi i bicchieri per evitare che cadano e che fuoriesca l'acqua;
- osservare cosa accade;
- ripetere l'operazione, posizionando il bicchiere di acqua calda sopra quella fredda e osservare la differenza.

Conclusioni:

Nel primo esperimento l'acqua calda, meno densa e quindi a parità di volume più leggera, sale verso l'alto. Allo stesso tempo l'acqua fredda, più densa e più pesante, scende prendendo il posto di quella calda. Questo esperimento simula ciò che accade a livello troposferico quando si verificano determinate condizioni. Il fenomeno appena osservato mostra come si manifesta il meccanismo di propagazione del calore per convezione in atmosfera. Nel secondo esperimento si simula il fenomeno che avviene in atmosfera solitamente di notte, quando l'irraggiamento è minore e il suolo si raffredda più velocemente rispetto all'aria sovrastante, creando uno strato di aria fredda che “ristagna” in basso senza possibilità di muoversi. Lo studio del fenomeno dell'inversione termica risulta particolarmente utile per comprendere come determinanti inquinanti ristagnano nella bassa troposfera quando si verificano specifiche condizioni.

Laboratorio n° 5

Argomento: diffusione luminosa attraverso il particolato fine

Titolo: Polvere per vedere i LASER o LASER per vedere le polveri

Obiettivi di apprendimento: comprendere il ruolo che hanno le polveri sottili nella diffusione della luce solare in atmosfera. Comprensione della metodologia di quantificazione strumentale delle polveri sottili disperse in aria (Light Scattering)

Risultati attesi: visualizzare la presenza di particelle sospese in aria

Metodologie: laboratorio a gruppi di 4 studenti

Materiali: un puntatore laser verde, un contenitore trasparente con coperchio, fumo di sigaretta o incenso, un ambiente scuro.

Procedura:

- puntare il laser in un contenitore con aria ambiente e osservare;
- introdurre una piccola quantità di fumo all'interno del contenitore;
- sigillare il contenitore;
- puntare il laser all'interno del contenitore e osservare.

Conclusioni: nel primo esperimento il fascio laser è visibile esclusivamente sulla superficie in ingresso e in uscita dal barattolo e non all'interno poiché la quantità di particelle disperse è trascurabile. Nella seconda prova, caratterizzata dal fumo all'interno del contenitore, sarà possibile osservare il percorso del raggio laser chiaramente visibile, come una linea luminosa che attraversa il contenitore a causa della diffusione della luce da parte delle particelle di fumo o polvere. Nei rilevatori che sfruttano il *Light Scattering* è presente inoltre un sensore che misura la differenza di intensità luminosa in funzione della quantità di polveri sottili.

Laboratorio n° 6

Argomento: fluorescenza UV

Titolo: Con la giusta luce ti conosco meglio

Obiettivi di apprendimento: osservare il fenomeno della fluorescenza in fase gassosa, per la molecola di anidride solforosa (SO_2), e analizzare la relazione tra la lunghezza d'onda della luce di eccitazione e quella della luce emessa.

Risultati attesi: osservare e comprendere quali variabili regolano il fenomeno della fluorescenza nei gas che è alla base delle tecniche di misura di alcuni inquinanti in atmosfera.

Metodologie: esperimento condotto dal docente con osservazione a piccoli gruppi di 4 elementi

Materiali: una lampada UV a bassa pressione (preferibilmente con lunghezza d'onda fissa (es. 254 nm o 365 nm), un semplice reticolo di diffrazione, un contenitore ermetico di vetro speciale (cella di quarzo) con valvole, una fonte di anidride solforosa (SO_2) in bombola (in alternativa la si può produrre in concentrazioni minori attraverso la combustione dello zolfo in aria), una pompa per il vuoto, cappa aspirante.

Procedura: attenzione: L'esperimento deve essere condotto sotto cappa aspirante in quanto l'anidride solforosa è un gas tossico e irritante.

- posizionare la strumentazione (lampada UV e contenitore di vetro) all'interno di una cappa aspirante;
- collegare la cella di quarzo al sistema di vuoto e alla bombola di SO_2 . Introdurre una piccola quantità di SO_2 nella cella fino a raggiungere una pressione definita;
- dopo aver oscurato l'ambiente, posizionare la lampada UV in modo che il fascio di luce attraversi la cella contenente il gas;
- quando il fascio di luce UV colpisce il gas, gli studenti osserveranno una debole luminescenza blu-violetta all'interno della cella. Questo è il segnale della fluorescenza.

Conclusioni: lo spettro di emissione mostrerà una banda larga e continua nella regione del visibile, confermando che l'energia è stata riemessa a una lunghezza d'onda maggiore rispetto a quella di eccitazione. La molecola di SO_2 assorbe fotoni nella regione dell'ultravioletto (UV) e del visibile, passando a uno stato elettronico eccitato. Da questo stato, l'energia in eccesso viene rilasciata attraverso l'emissione di fotoni a una lunghezza d'onda maggiore (luce visibile).

Laboratorio n° 7

Argomento: misura qualitativa con metodo gravimetrico del particolato

Titolo: Il colore della massa

Obiettivi di apprendimento: saper riconoscere la presenza di particolato in aria con un'osservazione su un filtro autorealizzato.

Risultati attesi: osservare il mutamento di colore del filtro dopo un significativo tempo e apprezzare le eventuali differenze tra una zona e l'altra rispetto a cui i filtri sono stati collocati.

Metodologie: costruzione dei filtri a piccoli gruppi, misura personale a casa e comparazione in plenaria

Materiali: tubo in plastica o cartone, faldine in cotone per struccarsi, ventola di raffreddamento per PC 5 V o 12 V, alimentatore per ventola da collegare alla rete, lente o microscopio (stereo microscopio)

Procedura: (prevede due momenti intervallati da alcuni giorni)

- costruire il filtro ponendo una faldina di cotone all'interno del tubo di cartone o plastica (ad una sua estremità) in modo che la superficie della falda sia perpendicolare all'asse del tubo;
- con stesso orientamento fissare la ventola all'altro estremo del tubo in modo tale che generi un flusso d'aria all'interno del tubo (vincolando così il flusso ad attraversare il filtro)
- collegare la ventola al suo alimentatore;
- installare il sistema costruito nei pressi dell'abitazione di un componente del gruppo e dopo aver azionato la ventola lasciarlo acceso per 48 ore;
- rimuovere il filtro e conservarlo in un opportuno sacchetto ermetico;
- annotare luogo e data dell'osservazione;
- ripetere l'installazione per lo stesso periodo di tempo nei pressi delle abitazioni degli altri componenti del gruppo;

- conservare opportunamente i vari filtri tenendo conto di luogo e data delle misure effettuate;
- osservare con il gruppo classe al microscopio i vari filtri producendo descrizioni qualitative e provando a stabilire correlazioni tra luoghi e periodi (può risultare utile svolgere una prima osservazione su un campione di riferimento che non è stato sottoposto al filtraggio)

Conclusioni: gli studenti dovrebbero osservare colorazioni differenti dei filtri in base alla qualità dell'aria della zona in cui vivono. Con uno stereo microscopio non è possibile osservare direttamente le PM_{10} ma solo la differente colorazione del filtro, tuttavia si ha un'immagine d'insieme più chiara che permette di descrivere con maggiore facilità l'alterazione del campione.

I risultati qualitativi ottenuti dagli studenti verranno classificati costruendo una scala cromatica e confrontati con i lavori reali del periodo considerato ottenuti dai monitoraggi di ARPA Piemonte.

Laboratorio n° 8

Argomento: analisi dati ambientali (particolato fine, precipitazioni, temperatura) scaricati da sito ARPA

Titolo: Numeri o dati, le correlazioni emergono

Obiettivi di apprendimento: reperire serie di dati da fonti ufficiali, analizzarli con strumenti di statistica descrittiva, ipotizzare delle connessioni.

Risultati attesi: osservare delle correlazioni tra i dati meteorologici e la concentrazione di particolato fine in atmosfera

Metodologie: laboratorio a gruppi di 2 studenti

Materiali: PC con foglio di calcolo e connessione web per scaricare i dati dal sito dell'ARPA Piemonte

Procedura:

- scegliere un stazione di monitoraggio (es. Torino Rebaudengo)
- scaricare dal sito web dell'ARPA Piemonte i seguenti dati per un periodo di un anno:
 - Particolato fine (Concentrazione di $PM_{2.5}$ in $\mu g/m^3$)
 - Particolato inalabile (Concentrazione di PM_{10} in $\mu g/m^3$)
 - Precipitazioni (Quantità di pioggia in mm)
 - Temperatura media (Temperatura giornaliera in $^{\circ}C$)
- importare i dati in un foglio di calcolo.
- per ogni variabile, calcolare:
 - Media: Il valore medio.
 - Mediana: Il valore centrale.
 - Deviazione standard: La dispersione dei dati attorno alla media.
 - Minimo e massimo: I valori estremi.
- rispondere alle seguenti domande:
 - Qual è la concentrazione media di PM_{10} e $PM_{2.5}$?
 - Superano i limiti giornalieri?
 - Confronta le medie e le deviazioni standard di PM_{10} e $PM_{2.5}$. Quale dei due tipi di particolato mostra una maggiore variabilità?
 - Che frazione del PM_{10} totale è rappresentata dal $PM_{2.5}$ (calcolando il rapporto medio $PM_{2.5}/PM_{10}$)?
- costruisci i grafici a dispersione (sono uno strumento visivo utile ad esplorare la relazione tra due variabili) considerando:
 - PM_{10} vs Precipitazioni
 - $PM_{2.5}$ vs Precipitazioni
 - PM_{10} vs Temperatura
 - $PM_{2.5}$ vs Temperatura
- calcolare il coefficiente di correlazione di Pearson (r), che è utile a confermare l'analisi visiva del grafico a dispersione e fornisce un valore quantitativo per la relazione), per le seguenti coppie di dati:
 - PM_{10} e Precipitazioni
 - $PM_{2.5}$ e Precipitazioni

- PM₁₀ e Temperatura
- PM_{2.5} e Temperatura
- PM₁₀ e PM_{2.5} (per verificare la correlazione tra le due frazioni)
- ipotizzare delle correlazioni a partire dai calcoli eseguiti e dalla teoria vista precedentemente

Conclusioni: gli studenti saranno in grado di osservare la correlazione tra precipitazioni e concentrazione di particolato e la relazione tra temperatura e alle stagioni.

5.3.4 Progetto didattico

Oltre agli otto laboratori descritti nei paragrafi precedenti, il modulo didattico prevede la realizzazione di due progetti che coinvolgono un lasso temporale più ampio (es. quadrimestre) finalizzati alla costruzione, da parte degli studenti, di strumenti capaci di effettuare misurazioni della concentrazione di particolato atmosferico. La metodologia adottata è quella del *Project-Based Learning* (PjBL), che promuove un apprendimento centrato sulla progettazione e realizzazione di un prodotto concreto.

Il progetto diventa così un veicolo per l'acquisizione di conoscenze e competenze specifiche, attraverso un processo che include la pianificazione, la ricerca, la produzione e la presentazione del risultato finale. In questo contesto, il docente assume il ruolo di guida e facilitatore, mentre gli studenti sono chiamati ad assumersi la responsabilità diretta di ogni fase: dall'ideazione alla realizzazione dello strumento, fino alla sua presentazione e utilizzo.

Progettazione e realizzazione del dispositivo

Gli studenti saranno chiamati a sviluppare un progetto per misurare la concentrazione del particolato atmosferico mediante l'ausilio della scheda open-source programmabile ARDUINO³⁷. Prima dell'avvio del progetto il docente guiderà gli studenti con una domanda chiave, ad esempio: “Come possiamo misurare quantitativamente la concentrazione di particolato (PM₁₀ e PM_{2.5}) in modo semplice, senza ricorrere a strumentazioni eccessivamente complesse e costose?”

Nella redazione del progetto, ogni gruppo dovrà presentare una relazione scritta contenente l'elenco dei materiali e delle attrezzature utilizzate, insieme alla descrizione dettagliata della procedura adottata per l'assemblaggio dello strumento.

A titolo esemplificativo, viene riportata una breve relazione allo scopo di chiarire il tipo di prodotto atteso al termine dell'attività e fornire un modello a cui gli studenti possano ispirarsi.

Questo progetto ³⁸ utilizza un Arduino Uno come microcontrollore e una serie di sensori specifici per misurare i vari parametri.

Il microcontrollore Arduino Uno è la "centralina" del progetto. Gestisce la lettura dei dati dai sensori, li elabora e li salva sulla scheda SD. È una piattaforma robusta ideale per scopi didattici.



Fig. 08. Microcontrollore Arduino Uno ³⁹

I sensori utilizzati sono:

1. Sensore di Particolato (PM₁₀, PM_{2.5}) (Nome: SDS011) è un sensore a dispersione laser che aspira l'aria e conta le particelle di polvere, fornendo una misurazione accurata della loro concentrazione in $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Non misura l'ozono o l'anidride solforosa, ma è il componente principale per il monitoraggio del particolato.

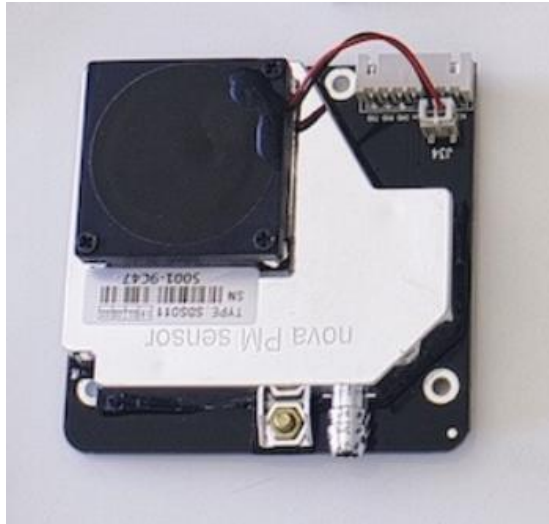


Fig. 09. Sensore di Particolato (PM_{10} , $PM_{2.5}$)⁴⁰

2. Sensore di Gas (MiCS-6814 per NO_2) e (MQ-131 per O_3) sono sensori a ossido di metallo (M_{OX}) che misurano vari gas utilizzando una cella riducente. I sensori a ossido di metallo sono economici e forniscono misurazioni qualitative, indicando la presenza dei gas piuttosto che una concentrazione precisa.

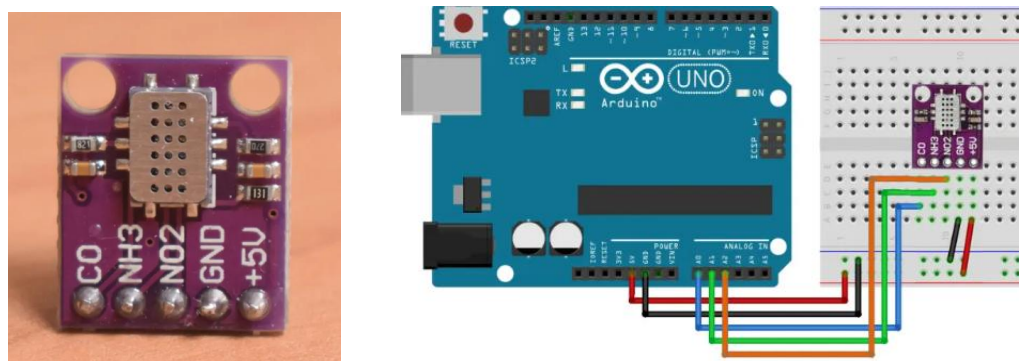


Fig. 10. Sensore di gas NO_2 con collegamenti⁴¹



Fig. 11: Sensore di gas ozono (O_3) ⁴²

3. Sensore di temperatura e umidità (DHT11) che è un sensore digitale che misura la temperatura e l'umidità.

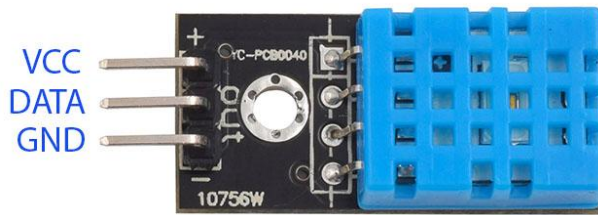


Fig. 12: Sensore di temperatura e umidità ⁴³

Sono inoltre necessari alcuni componenti di supporto come il *modulo scheda SD*, che permette ad Arduino di comunicare con una scheda microSD attraverso il protocollo SPI (Serial Peripheral Interface), un modulo Ethernet Shield (per connettività Wi-Fi), una breadboard e dei cavi jumper.

Di seguito viene descritto un possibile assemblaggio specificando i collegamenti dei vari pin del microcontrollore con i pin dei sensori. È fondamentale rispettare la polarità (VCC e GND) e la corretta assegnazione dei pin dati.

Il sensore di particolato comunica tramite una porta seriale (UART). L'Arduino Uno ha una sola porta seriale hardware, usata per comunicare con il computer. Pertanto, va utilizzata una porta seriale software (con la libreria *SoftwareSerial*) sui pin 2 e 3 e seguire i sottostanti abbinamenti:

- SDS011 VCC → Arduino 5V
- SDS011 GND → Arduino GND
- SDS011 TX (Trasmissione) → Arduino Pin 2 (Ricezione)
- SDS011 RX (Ricezione) → Arduino Pin 3 (Trasmissione)

Per quanto riguarda i sensori MQ-131 (Ozono) e MiCS-6814 (NO_2), hanno uscite analogiche. Collegare i pin di uscita ai pin analogici dell'Arduino Uno come segue:

- Sensore Gas VCC → Arduino 5V
- Sensore Gas GND → Arduino GND
- MQ-131 (Ozone) AOUT → Arduino A1
- MiCS-6814 (NO_2) AOUT → Arduino A0

Il sensore di temperatura e umidità DHT11 ha un solo pin per i dati, che si connette a un pin digitale dell'Arduino:

- DHT11 VCC → Arduino 5V
- DHT11 GND → Arduino GND
- DHT11 DATA → Arduino Pin 4

Infine il modulo Scheda SD deve essere collegato necessariamente in questo modo perché i pin SPI sull'Arduino Uno sono fissi:

- Modulo SD VCC → Arduino 5V
- Modulo SD GND → Arduino GND
- Modulo SD CS (Chip Select) → Arduino Pin 10
- Modulo SD MOSI (Master Out Slave In) → Arduino Pin 11
- Modulo SD MISO (Master In Slave Out) → Arduino Pin 12
- Modulo SD SCK (Serial Clock) → Arduino Pin 13

Il codice può essere scritto autonomamente, se si hanno conoscenze di programmazione C++, o ricavato integrando opportune librerie ed esempi che si possono facilmente trovare in rete. Le librerie necessarie sono <SoftwareSerial.h>, <SDS011.h>, <DHT.h>, <SPI.h> e <SD.h>.

L'ultimo passaggio per ottenere risultati significativi dai sensori gas è la calibrazione. E' necessario misurare i valori di tensione dei sensori in un ambiente con aria pulita e non inquinata (il più possibile). Questi verranno presi come valori di riferimento, o "baseline". Le misurazioni successive verranno confrontate con questi valori di base per rilevare le variazioni. Confrontare i valori del sensore con quelli di una centralina di monitoraggio ufficiale. Va stabilito infine l'errore col quale i dati verranno comunicati in quanto i sensori economici non sono precisi come quelli professionali.

Se le conoscenze in campo informatico/elettronico degli studenti lo permettono è possibile realizzare un monitoraggio a distanza inserendo un modulo Wi-Fi per la trasmissione dei dati. Un'opzione possibile è l'uso di un ESP8266 configurato come modulo. È sufficiente collegare l'ESP8266 ai pin seriali hardware di Arduino (0 e 1), facendo attenzione alla compatibilità di tensione, e aggiungere il codice per inviare i dati a un servizio esterno. Questo richiede una programmazione maggiormente complessa poiché l'Arduino Uno non ha il Wi-Fi nativo.

Posizionamento del dispositivo e analisi dati

Al termine della progettazione e realizzazione del dispositivo per il monitoraggio del particolato fine verrà collocato nel cortile della scuola, in prossimità di un corso particolarmente trafficato. A livello di micro-scala verrà posizionato a circa due metri dal suolo, in una posizione libera da ostacoli che possono influenzare il flusso d'aria. Verrà predisposta una copertura per proteggere il dispositivo ma che non interferirà con il flusso d'aria e quindi con la misurazione.

I dati rilevati verranno scaricati dagli studenti con una frequenza giornaliera e successivamente analizzati in classe con un foglio di calcolo. Sfruttando le competenze sviluppate nel laboratorio n° 8 gli studenti, suddivisi in gruppi, cercheranno di individuare delle correlazioni tra le variabili analizzate. Inoltre verrà fatto un confronto con i dati reali registrati dalla centralina ARPA più vicina all'istituto scolastico. Grazie a questo approccio sarà possibile verificare la bontà dei dati raccolti e procedere con un'ulteriore taratura dello strumento.

Comunicazione dei risultati

Il fine ultimo del progetto sarà la comunicazione dei risultati ottenuti. Verrà pertanto redatto dagli studenti un bollettino, in formato digitale e cartaceo, della qualità dell'aria costituito dai valori giornalieri, i valori medi e l'eventuale superamento dei valori soglia. La versione digitale del bollettino verrà trasmesso negli schermi digitali informativi dislocati all'interno dell'istituto scolastico. E' prevista inoltre una campagna di sensibilizzazione nelle scuole secondarie di primo grado presenti nella circoscrizione che prevede un incontro gestito dagli studenti liceali per sensibilizzare i più giovani.

5.4.Valutazione degli apprendimenti

Durante le varie fasi del modulo didattico (lezione frontale, visite tecniche, laboratori, progetto) sono previste valutazioni in itinere sulle competenze e sulle conoscenze apprese.

Nella lezione frontale verrà fatto un questionario che ha come obiettivo la constatazione delle conoscenze pregresse degli studenti sull'argomento. Al termine del percorso verrà somministrato un questionario di autovalutazione che mira a raccogliere le conoscenze e

competenze acquisite in modo da valutare la validità del percorso proposto. L'obiettivo non è valutare i ragazzi con un approccio numerico classificatorio.

Per quanto riguarda le visite tecniche verrà richiesta una relazione correlata con immagini che contenga l'intervista dei professionisti incontrati. L'intervista deve includere quesiti riguardanti gli aspetti tecnici della professione e quesiti sul percorso di formazione degli stessi così da avere alcuni spunti per l'orientamento futuro degli studenti.

Le attività di laboratorio prevederanno la produzione di brevi video divulgativi che a partire dalla scheda di laboratorio illustrino i materiali, i metodi, la procedura adottata, i risultati attesi e le conclusioni a cui sono giunti.

A seguire vengono riportate le schede di valutazione per ciascuna fase del modulo didattico:

5.4.1. Lezione introduttiva

Obiettivi: verificare le conoscenze pregresse, le capacità di fare collegamenti tra la normativa e i concetti scientifici, creare un dialogo costruttivo con il docente durante la lezione.

Strumenti: questionario iniziale e finale, osservazione e partecipazione degli allievi durante la lezione, mappa concettuale per valutare la comprensione degli allievi.

Livello	Descrittori di competenza
Eccellente (10-9)	Comprende e collega con precisione concetti scientifici e normativi; partecipa in modo attivo propositivo, portando esempi pertinenti al tema trattato.
Buono (8-7)	Comprende i concetti principali e partecipa con interventi coerenti e costruttivi.
Base (6)	Comprende solamente in parte i contenuti; partecipa in modo discontinuo o passivo. Spesso si distrae durante la lezione.
In via di acquisizione (<6)	Mostra difficoltà di comprensione; partecipazione scarsa o nulla durante l'attività didattica. Si distrae e distrae i compagni.

5.4.2. Escursioni e visite tecniche

Obiettivi: osservare strumenti e metodi reali di monitoraggio ambientale; dialogare con i professionisti che si occupano di monitoraggio della qualità dell'aria.

Strumenti: relazione tecnico-scientifica elaborata in forma scritta, intervista ai professionisti, osservazione in itinere.

Livello	Descrittori di competenza
Eccellente (10-9)	Relazione dettagliata, ben organizzata e ben impaginata; domande pertinenti e coerenti arricchite con riflessioni personali; numerosi collegamenti con le conoscenze teoriche apprese.
Buono (8-7)	Relazione corretta dal punto di vista tecnico-scientifico e coerente; domande coerenti ma semplici e osservazioni personali adeguate.
Base (6)	Relazione sintetica ma corretta nel suo insieme e comprensibile; rielaborazione parziale dell'esperienza svolta.
In via di acquisizione (<6)	Relazione incompleta e con errori dal punto di vista tecnico-scientifico; scarsa comprensione dell'esperienza; domande dell'intervista inadeguate.

5.4.3. Laboratori pratici

Obiettivi: applicare il metodo scientifico-sperimentale, raccogliere e analizzare dati ottenuti, comunicare i risultati in modo chiaro ed efficace.

Strumenti: scheda di laboratorio abbinata ad un'osservazione diretta del lavoro di gruppo. Video divulgativo finale pubblicato sui canali social della scuola.

Livello	Descrittori di competenza
Eccellente (10-9)	Applica in autonomia il metodo scientifico-sperimentale; elabora dati in modo chiaro e rigoroso utilizzando le metodologie adeguate della statistica descrittiva; comunica i risultati con chiarezza, serietà

	ed efficacia comunicativa.
Buono (8-7)	Applica correttamente il metodo scientifico-sperimentale con supporto da parte del docente; presenta risultati corretti, coerenti e ben documentati.
Base (6)	Applica parzialmente il metodo scientifico-sperimentale; comunicazione poco efficace, talvolta con errori o incompleta.
In via di acquisizione (<6)	Mostra significative difficoltà dal punto di vista operativo; scheda incompleta o errata; comunicazione poco chiara e a tratti confusa.

5.4.4. Project-Based Learning (realizzazione del dispositivo di monitoraggio della qualità dell'aria)

Obiettivi: integrare conoscenze e competenze apprese per progettare e realizzare un dispositivo per il monitoraggio della qualità dell'aria.

Strumenti: osservazione del lavoro di gruppo, relazione tecnico-scientifica, presentazione dei risultati.

Livello	Descrittori di competenza
Eccellente (10-9)	Progetta, realizza e analizza autonomamente; elabora correlazioni corrette e riflessioni critiche sui dati.
Buono (8-7)	Realizza il progetto con alcune indicazioni fornite dal docente; documentazione chiara e coerente.
Base (6)	Segue le istruzioni passo-passo; analisi dei dati non sempre completa o superficiale.
In via di acquisizione (<6)	Difficoltà nella realizzazione del progetto e nell'analisi dei dati; progetto incompleto o non funzionante.

5.4.5. Valutazione finale e autovalutazione

Obiettivi: riflettere sugli apprendimenti appresi riguardanti la normativa e l'inquinamento dell'aria, sviluppare una piena consapevolezza delle competenze acquisite.

Strumenti: questionario di autovalutazione e discussione metacognitiva.

Livello	Descrittori di competenza
Eccellente (10-9)	Riflessione approfondita, chiara e pienamente consapevole; individua punti di forza del modulo didattico e spunti per eventuali sviluppi futuri.
Buono (8-7)	Mostra consapevolezza dei risultati ottenuti e dei processi di apprendimento. Riesce ad intravedere potenziali sviluppi futuri con il sostegno dell'insegnante.
Base (6)	Riflessione generica o descrittiva; riconosce solo alcuni aspetti del percorso intrapreso. Non riesce a ipotizzare eventuali sviluppi futuri.
In via di acquisizione (<6)	Riflette in modo superficiale sul percorso didattico intrapreso o non è in grado di collegare esperienze e competenze.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi ha approfondito un tema di estrema importanza, ovvero come divulgare in modo semplice e comprensibile i contenuti della normativa europea relativa alla qualità dell'aria. In base a quanto evidenziato nei capitoli precedenti il linguaggio tecnico-giuridico della normativa non agevola l'immediata comprensione da parte di un pubblico non specializzato. Per diffondere la conoscenza della problematica è importante focalizzare l'attenzione sui termini specifici e sulla comprensione dei dati derivanti dai monitoraggi ambientali.

In questo lavoro di tesi, per raggiungere il suddetto obiettivo, si è deciso di proporre un progetto didattico interdisciplinare destinato agli studenti di un liceo scientifico, strutturato in una serie di esperienze teoriche e pratiche. L'approccio laboratoriale consente di sviluppare le conoscenze e le competenze adeguate per comprendere il fenomeno. L'incontro ipotizzato con ricercatori e professionisti che si occupano di monitoraggio ambientale rappresenta inoltre un'opportunità unica di confronto e orientamento per il futuro degli studenti.

Per quanto concerne le prospettive future si segnala inoltre che gli studenti della scuola secondaria di secondo grado, formati grazie al progetto didattico, potranno a loro volta organizzare delle attività destinate ai ragazzi della scuola secondaria di primo grado e primaria per sensibilizzare gli studenti più giovani sul tema dell'inquinamento atmosferico, in un'ottica di peer education.

BIBLIOGRAFIA

1. Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The lancet*, 360 (9341), 1233-1242.
2. Da Rold C. (2019). La più inquinata d'Europa. *Le Scienze*, (612), 52–61
3. Nowroz, F., Hasanuzzaman, M., Siddika, A., Parvin, K., Garcia Caparros, P., & Prasad, P. V. V. (2024). Elevated tropospheric ozone and crop production: potential negative effects and plant defense mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1244515.
4. Drew, L. (2025). Air pollution and brain damage: what the science says. *Nature*, 637(8046), 536-538.
5. Formisano, F. (2018). Metodologia di Misurazioni Indicative della qualità dell'aria: analisi della strumentazione di valutazione dei gas e confronto sperimentale della strumentazione in moving lab (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
6. Gialluisi, A., Costanzo, S., De Bartolo, M. I., Veronesi, G., Renzi, M., Cembalo, A., ... & Iacoviello, L. (2025). Prominent role of PM10 in the link between air pollution and incident Parkinson's Disease. *npj Parkinson's Disease*, 11(1), 101.
7. Manisalidis, I., Stavropoulou, E., Stavropoulos, A., & Bezirtzoglou, E. (2020). Environmental and health impacts of air pollution: a review. *Frontiers in public health*, 8, 14.
8. Restelli G., & Zanderighi G. (2001). Chimica dell'atmosfera e dell'inquinamento atmosferico. Unicopli.
9. Robinson J. W., Frame E. M. S. & Frame II G. M. (2021). Instrumental analytical chemistry: an introduction. CRC Press.

SITOGRAFIA

10. World Health Organization. (2022, April). WHO's fifth WHO air quality database of over 6000 cities. Retrieved from <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/who-s-fifth-who-air-quality-database-of-over-6000-cities-updated-april-2022>
11. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/sources-and-emissions-of-air>
12. https://www.ceip.at/fileadmin/inhalte/ceip/00_pdf_other/2023/dp192.pdf
13. International Agency for Research on Cancer (IARC). (2023). Agents classified by the IARC Monographs, Volumes 1–135. Lyon, France: IARC. Retrieved from <https://monographs.iarc.who.int/agents-classified-by-the-iarc/>
14. <https://www.certifico.com/sicurezza-lavoro/documenti-sicurezza/documenti-riservati-sicurezza/il-rischio-esposizione-occupazionale-benzene>
15. Wilbur S, Williams M, Williams R, et al. Toxicological Profile for Carbon Monoxide. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US); 2012 Jun. 2, RELEVANCE TO PUBLIC HEALTH. Available from: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK153692/?utm_source=chatgpt.com
16. <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-energy-and-health/health-impacts>
17. <https://www.consilium.europa.eu/it/infographics/air-pollution-in-the-eu/#health>
18. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/air-pollution>
19. https://www.lifeprepare.eu/wp-content/uploads/2020/06/COVIDQA-Prepair-19Giugno2020_final.pdf
20. <https://www.geopop.it/smog-in-pianura-padana-e-caldo-record-in-ottobre-la-spiegazione-meteorologica/>
21. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0050-20150918>
22. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202402881
23. https://it.wikipedia.org/wiki/Spostamento_di_Stokes
24. https://www.mt.com/it/it/home/applications/Laboratory_weighing/emissions-testing-particulate-matter.html
25. <https://www.youtube.com/watch?v=QjriEmEi3DY>

26. <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria/file-e-allegati/normativa/qualita-dellaria/nazionale/dlgs-155-del-13-08-2010.pdf/@@display-file/file>
27. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/HTML/?uri=CELEX:32006H0962>
28. <https://www.arpa.piemonte.it/>
29. [pag56https://www.arpa.piemonte.it/scheda-informativa/sistema-regionale-rilevamento-della-qualita-dellaria](https://www.arpa.piemonte.it/scheda-informativa/sistema-regionale-rilevamento-della-qualita-dellaria)
30. <https://www.diati.polito.it/focus/aria>
31. <https://www.diati.polito.it/focus/scuole>
32. https://www.diati.polito.it/en/focus/schools/movinglab_school_tour
33. <https://www.inrim.it/it/ricerca/settori-scientifici/scienze-e-tecnologie-biomediche/laboratori>
34. <https://www.inrim.it/it/ricerca/campioni-primari/la-mole>
35. <https://servizi.regione.piemonte.it/catalogo/qualita-dellaria-piemonte>
36. <https://aria.ambiente.piemonte.it/>
37. <https://www.arduino.cc/>
38. <https://www.maffucci.it/2022/09/14/costruire-un-sistema-per-la-rilevazione-del-particolato-pm2-5-pm10-a-bassissimo-cost/>
39. https://en.wikipedia.org/wiki/Arduino_Uno
40. <https://sensor.community/it>
41. <https://www.fattelodasolo.it>
42. <https://www.theengineeringprojects.com>
43. <https://www.robotdazero.it/>