

**ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA    CAMPUS  
DI CESENA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA DELL'ENERGIA ELETTRICA E  
DELL'INFORMAZIONE "GUGLIELMO MARCONI"**

**CORSO DI LAUREA IN  
INGEGNERIA BIOMEDICA**

**"TECNICHE DI CAMPIONAMENTO E DI  
MONITORAGGIO DEGLI ODORI IN  
ATMOSFERA"**

Elaborato in:

**Fondamenti Chimici e Fisici di Inquinanti Atmosferici e Radioattivi: Sensori  
per il Rilevamento e il Monitoraggio**

**Relatore:**

**Prof. Massimo Andretta**

**Presentata da:**

**Giorgia Fariselli**

**Anno Accademico 2023/2024**



# INDICE

<b>Introduzione</b>	pag III
<b>Cap. 1. L'ODORE E LA SUA PERCEZIONE</b>	
1.1 Cenni sul meccanismo fisiologico di percezione dell'odore	pag 1
1.2 Proprietà Distintive dell'Olfatto	pag 4
1.3 La Molestia e il Disturbo Olfattivo	pag 9
<b>Cap. 2. METODOLOGIE DI MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI ODORIGENE</b>	
2.1 Fasi principali del campionamento	pag 12
2.2 Tecniche di Campionamento e Analisi	pag 19
2.3 Gascromatografia	pag 22
2.4 Spettrometria di Massa	pag 26
2.5 Olfattometria Dinamica	pag 30
<b>Cap. 3. MODELLI DI DISPERSIONE PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO OLFATTIVO</b>	
3.1 L'Approccio "Peak to Mean Ratio"	pag 36
3.2 Approcci integrati per la valutazione delle Molestie Olfattive	pag 36
<b>Cap. 4. METODOLOGIE DI ABBATTIMENTO DEGLI ODORI</b>	
4.1 Controllo degli Odori alla sorgente	pag 38
4.1.1 Captazione ed Estrazione	pag 38
4.1.2 Adsorbimento	pag 39
4.1.3 Scrubbing Umido	pag 40
4.1.4 Sistemi Biologici di Abbattimento degli Odori	pag 41
<b>Cap. 5. CONCLUSIONI</b>	
5.1 Impatto tossicologico dipendente dal tipo di materiale	pag 48
5.2 Valutazione del Rischio Sanitario	pag 49
5.3 Rilevamento del COVID-19 dal Respiro Espirato	pag 51
<b>Bibliografia</b>	pag 56



## **Introduzione**

L'obiettivo posto in questo elaborato è quello di trattare in modo approfondito il tema della percezione degli odori, le metodologie di monitoraggio delle emissioni odorigene, i modelli di dispersione per la valutazione dell'impatto olfattivo e le tecniche di abbattimento degli odori.

Si inizia esplorando il complesso meccanismo fisiologico della percezione degli odori, spiegando come il sistema olfattivo sia composto da diverse componenti, tra cui l'epitelio olfattivo, il bulbo olfattivo e la corteccia olfattiva. La percezione olfattiva è una sensazione soggettiva che varia da individuo a individuo e non è solo determinata dalle caratteristiche chimiche delle molecole odorose, ma anche dalle esperienze e dalla sfera psicologica personale. Vengono approfondite le proprietà distintive dell'olfatto, come la percettibilità, l'intensità, il tono edonico e la qualità dell'odore, insieme alla natura chimico-fisica delle sostanze responsabili.

Un altro tema affrontato riguarda la molestia e il disturbo olfattivo, con particolare attenzione all'effetto degli odori sul benessere delle persone. Gli odori possono provocare reazioni emotive e fisiche, influenzando negativamente la qualità della vita, soprattutto quando l'esposizione è prolungata o ripetuta nel tempo.

L'elaborato prosegue illustrando le principali metodologie di monitoraggio delle emissioni odorigene, capitolo principale di questa tesi, evidenziando come la combinazione di diverse tecniche, come l'olfattometria dinamica, la gascromatografia e la spettrometria di massa, sia fondamentale per una corretta caratterizzazione degli odori. Queste tecniche sono essenziali per identificare le sostanze responsabili degli odori e valutare il loro impatto sull'ambiente circostante. Per capire meglio questi concetti sono state organizzate anche visite alla SECAM di Ravenna e ai laboratori LAV di Rimini osservando dal vivo sia diversi campionamenti che laboratori di Cromatografia.

Viene anche descritto l'utilizzo dei nasi elettronici, dispositivi che simulano il processo olfattivo umano per quantificare e distinguere le sorgenti odorose.

Successivamente, il documento analizza i modelli di dispersione utilizzati per valutare l'impatto degli odori, come l'approccio "Peak to Mean Ratio", che aiutano a comprendere come gli odori si diffondono nell'ambiente e quali siano le condizioni atmosferiche che influenzano maggiormente la loro dispersione.

Un altro argomento chiave è rappresentato dalle metodologie di abbattimento degli odori, che si concentrano su diverse tecniche per ridurre le emissioni, come l'adsorbimento, lo scrubbing umido e l'uso di sistemi biologici. Queste metodologie sono cruciali per il controllo degli odori alla sorgente, riducendo significativamente l'impatto ambientale.

Infine, l'elaborato si conclude con una riflessione sugli impatti tossicologici degli odori, sulla valutazione del rischio sanitario e sulle nuove tecnologie, come il rilevamento del COVID-19 dal respiro espirato, utilizzando spettrometria di massa e algoritmi di machine learning. Nella parte finale del lavoro viene sottolineata, tramite un esempio recente di applicazione dello studio degli odori in diagnostica medica, l'importanza di considerare non solo il disturbo olfattivo in sé, ma anche le potenziali implicazioni che le più moderne tecniche di analisi olfattometrica possono portare anche nel campo della diagnostica medica.



# 1. L'ODORE E LA SUA PERCEZIONE

Con il termine "odore" ci si riferisce alla sensazione generata dall'interazione di alcuni composti chimici, presenti in una miscela gassosa e caratterizzati da sufficiente volatilità, con i recettori del sistema olfattivo.

## 1.1. Cenni sul meccanismo fisiologico di percezione dell'odore

L'odore è una sensazione complessa che non corrisponde a una grandezza fisica definita come la lunghezza d'onda per la vista o la frequenza per l'udito. L'odore non coincide con l'odorante che lo produce, né è una caratteristica intrinseca delle molecole, ma rappresenta piuttosto la sensazione che una sostanza provoca dopo essere stata interpretata dal sistema olfattivo. Questa sensazione è il risultato della combinazione di molteplici fattori: le proprietà chimiche delle molecole, gli effetti psicofisici prodotti quando vengono rilevate dall'olfatto, e la sfera soggettiva dell'individuo.

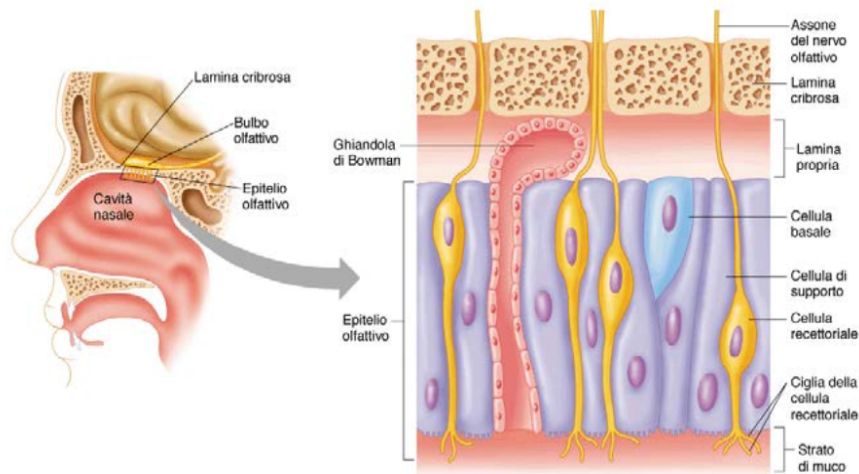
Il meccanismo che porta alla percezione olfattiva inizia nel naso, precisamente nell'epitelio olfattivo, dove le cellule sensoriali (neuroni) interagiscono con le molecole odorogene. Questo processo si sviluppa attraverso una serie di trasduzioni, trasmissioni ed elaborazioni dell'informazione olfattiva, che viene poi inviata al cervello per una risposta cognitiva ed emozionale.<sup>1</sup>

## Anatomia del sistema olfattivo

Il sistema olfattivo è composto da tre componenti principali:

1. **Epitelio olfattivo:** Localizzato nelle cavità nasali, contiene cellule neurosensoriali (recettori olfattivi) dotate di espansioni ciliari che ospitano le proteine recettrici di membrana. L'epitelio olfattivo è costituito da tre tipi di cellule:
  - **Cellule basali:** Staminali che danno origine ai neuroni olfattivi sensoriali, le uniche cellule nervose che si rigenerano continuamente con un ciclo di circa 60-90 giorni.
  - **Cellule di sostegno:** Dotate di microvilli, producono il muco che ricopre l'epitelio.
  - **Neuroni olfattivi sensoriali:** Neuroni bipolari con ciglia specializzate per la trasduzione degli stimoli odorogeni. Il legame delle molecole odorogene ai recettori sulla membrana ciliare attiva una cascata enzimatica che influisce sui canali ionici. Si presume che esistano da 100 a 300 classi di recettori, con ogni cellula sensibile a vari odoranti, permettendo una grande varietà di combinazioni.
2. **Bulbo olfattivo:** Situato all'interno della scatola cranica, è composto da diversi strati distinti e specializzazioni sinaptiche. Qui convergono i prolungamenti dei neuroni, e avviene una prima elaborazione dell'informazione olfattiva in una forma percepibile dai centri cerebrali.
3. **Corteccia olfattiva (sistema olfattivo centrale):** Riceve il segnale parzialmente processato dal bulbo e lo trasmette alle aree coinvolte nell'elaborazione finale della risposta allo stimolo olfattivo. La trasmissione può avvenire in due modi:
  - **Sistema limbico e ippocampo:** Coinvolti nelle componenti emozionali e nella memoria olfattiva.

- **Talamo e corteccia frontale:** Responsabili dell'interpretazione cognitiva dello stimolo (tipo di odore, intensità, piacevolezza).



*Rappresentazione del sistema olfattivo<sup>ii</sup>*

### Fisiologia della percezione olfattiva

L'olfatto umano è localizzato in due regioni della mucosa nasale, ognuna di circa 3-4 cm<sup>2</sup> di superficie, nella parte superiore della cavità nasale. La maggior parte dell'aria inalata non raggiunge direttamente la regione olfattiva, ma la porzione che vi giunge dipende dalla turbolenza del flusso d'aria, che può essere aumentata annusando intensamente. Questa azione semiriflessa è spesso una risposta a un odore estraneo. Per l'eccitazione delle cellule olfattive è necessario il contatto tra la loro superficie esterna e le molecole odoranti. Questo contatto provoca una parziale depolarizzazione del potenziale statico della membrana cellulare, trasformando lo stimolo in un potenziale d'azione. Questa stimolazione contiene tutte le informazioni codificate dello stimolo e viene trasmessa, tramite i nervi olfattivi, ai centri maggiori del sistema nervoso centrale, dove viene decodificata in percezione olfattiva.

### Condizioni per la percezione olfattiva

L'epitelio olfattivo è coperto di muco e dotato di microvilli che estendono l'area superficiale. La mucosa olfattiva, costituita da diversi tipi di cellule, è il punto di confluenza delle terminazioni nervose che permettono la percezione delle sensazioni olfattive. Le cellule della mucosa olfattiva includono:

- **Cellule basali:** Si impiantano direttamente sul corion, dove si trovano anche ghiandole tubulo-acinose secernenti muco.
- **Cellule di sostegno:** Formano una sorta di cuticola interrotta da piccole aperture che permettono il passaggio delle ciglia olfattorie.
- **Cellule neuro-sensoriali:** Collegate alla mucosa olfattoria (ciglia olfattorie) con i centri nervosi superiori nella corteccia encefalica.

Nella mucosa olfattiva sono presenti terminazioni di fibre dolorifiche del trigemino, che rispondono agli stimoli di sostanze irritanti causando lacrimazione, starnuti e inibizione del



respiro. Gli odoranti devono essere sufficientemente volatili e solubili in acqua per permeare il muco e devono avere una certa solubilità nei grassi per penetrare le membrane cellulari.

### **Trasmissione e elaborazione degli stimoli olfattivi**

Le cellule olfattorie inviano stimoli al cervello tramite 10-25 milioni di fibre nervose raggruppate in fascicoli di nervi (Fila Olfactoria). Questi nervi terminano in noduli olfattivi nel bulbo olfattivo, che, insieme ad altri centri primari olfattivi, inviano informazioni a molte aree subordinate del cervello, inclusi il sistema limbico e altre strutture cerebrali come il talamo, l'ipotalamo, il mesencefalo, il ponte e il midollo spinale. Questa rete di connessioni giustifica le numerose attività riflesse che possono essere prodotte dagli stimoli olfattivi.

In conclusione, l'olfatto è un senso complesso che coinvolge la combinazione di processi chimici, psicofisici e soggettivi per la percezione e l'elaborazione degli odori.

#### **1.2. Proprietà Distintive dell'Olfatto**

La percezione olfattiva si distingue in due fasi fondamentali: la sensazione e la percezione. La sensazione si verifica quando un odore viene rilevato a livello neuronale, mentre la percezione avviene quando diventiamo consapevoli di aver rilevato un odore. Questo processo richiede circa 500 millisecondi per la registrazione dell'odore e un tempo simile per la percezione cosciente.

La percezione sensoriale degli odoranti può essere descritta attraverso le seguenti caratteristiche:

- **Percettibilità**
- **Intensità**
- **Tono edonico**
- **Qualità**
- **Natura chimico-fisica delle sostanze**

#### **Percettibilità**

Un odore diventa percepibile quando la sua concentrazione nell'atmosfera raggiunge una soglia minima, detta "soglia di percettibilità" (Odour Threshold - OT). Questa è definita come la concentrazione minima di una sostanza odorosa percepita dal 50% della popolazione esposta. La soglia di percettibilità rappresenta la concentrazione minima necessaria per avvertire un odore, ma non garantisce la capacità di distinguere e identificare tale sensazione. A questo scopo, esiste la "soglia di riconoscimento", che indica la concentrazione minima che permette non solo la rilevazione, ma anche la descrizione qualitativa dell'odore.

Nelle miscele odorose, le sostanze possono interagire in modi complessi, producendo effetti di additività, sinergia o antagonismo. Questi effetti si possono schematizzare come:

- Additività:  $RAB = RA + RB$
- Sinergia:  $RAB > RA + RB$
- Antagonismo:  $RAB < RA + RB$

dove RA e RB rappresentano la soglia di percettibilità di due sostanze pure, mentre RAB è la soglia di percezione della miscela ottenuta combinando le due sostanze.

### Intensità

L'intensità di un odore esprime la forza dello stimolo olfattivo e si manifesta quando la concentrazione di un odorante supera la soglia di percezione. Mentre la concentrazione misura la quantità di odorante presente, l'intensità rappresenta la grandezza della sensazione generata dallo stimolo, dipendendo sia dall'odorante sia dall'individuo che lo percepisce. Sebbene concentrazione e intensità siano correlate, con concentrazioni più elevate che generalmente producono sensazioni più intense, la relazione tra stimolo e intensità segue una curva logaritmica del tipo  $I = K \log C$  (Fig. 2).

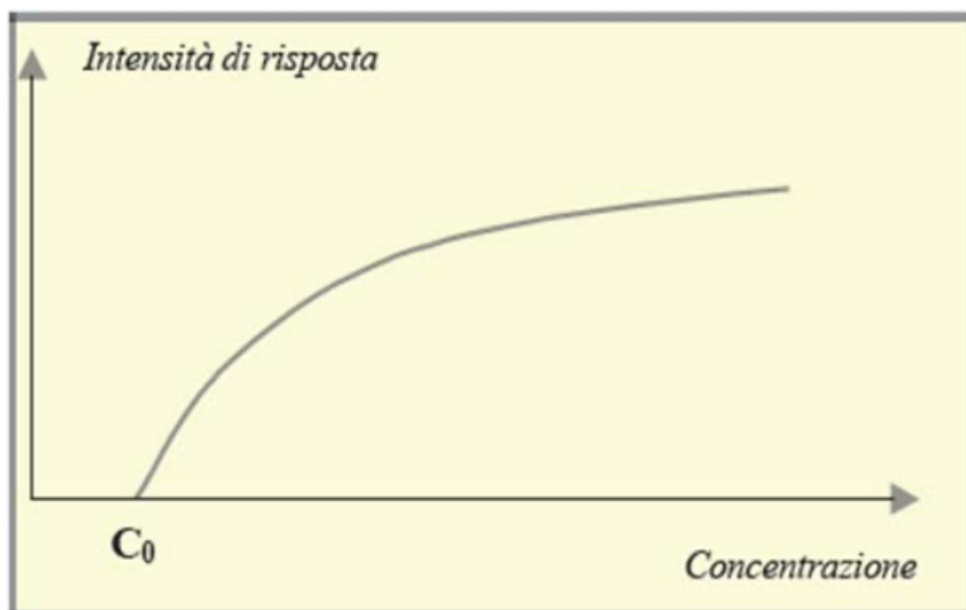


Fig. 2 – Relazione logaritmica tra intensità e concentrazione

dove C è la concentrazione, I l'intensità di odore e K la costante sperimentale che lega le due grandezze. La Fig. 2 rappresenta l'andamento logaritmico della funzione I-C (Intensità- Concentrazione), evidenziando il fatto che, al di sotto della soglia di percezione (C0), l'intensità rimane costantemente nulla. Esistono diverse funzioni matematiche che illustrano questa dipendenza, la scelta di una delle due funzioni illustrate di seguito dipende dalle condizioni considerate

Queste funzioni descrivono come l'intensità cresce in modo non lineare rispetto alla concentrazione, e sono determinate sperimentalmente attraverso misure olfattometriche:

*RELAZIONE DI WEBER-FECHNER:  $I = KW \log (C/CS)$*

dove I è l'intensità di odore, C la concentrazione dell'odorante (in ou/m<sup>3</sup>), CS la concentrazione alla soglia di percezione (1 ou/m<sup>3</sup>), e KW è il coefficiente di Weber-Fechner, caratteristico dell'odorante, da determinare sperimentalmente mediante misure olfattometriche sia di concentrazione sia di intensità.

*RELAZIONE DI STEVENS:  $I = KS (C - CS)^n$*

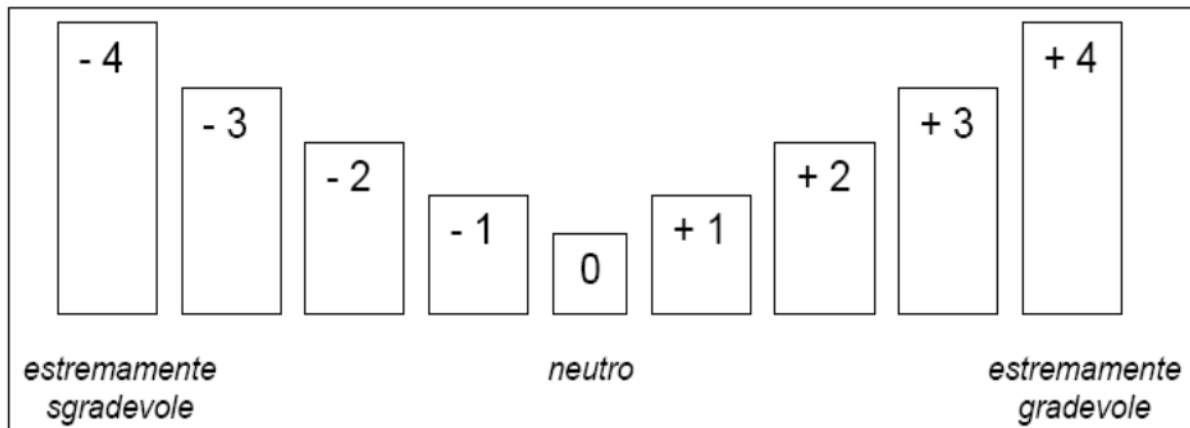
dove KS ed n sono i coefficienti di Stevens, anch'essi determinati sperimentalmente. Generalmente l'intensità si determina per via olfattometrica, con modalità simili a quelle per la misura della concentrazione, ma presentando ad un panel di rino-analisti selezionati concentrazioni dell'odorante superiori alla soglia di percezione. Al panel è richiesto di assegnare, ad ogni livello di diluizione del campione, un valore di intensità, secondo una scala predefinita. L'utilizzo delle scale di categoria (a 4, 5, 6, 7, 11 o più livelli), sintetiche e facilmente riproducibili, consente di esprimere l'intensità di odore in termini quantitativi: ad ogni categoria corrisponde infatti un numero ed una breve descrizione della sensazione odorosa corrispondente a quel livello. Generalmente, si usano scale a sei livelli come quella riportata in Tabella 1, perché un maggior dettaglio nella classificazione porta ad una maggiore indecisione del panel.

LIVELLO DI INTENSITÀ	DESCRIZIONE
0	nessun odore
1	odore appena avvertito
2	odore debole ma riconoscibile
3	odore chiaramente identificabile
4	odore forte
5	odore molto forte

*Tab. 1 – Esempio di scala per la definizione dell'intensità*

## Tono Edonico

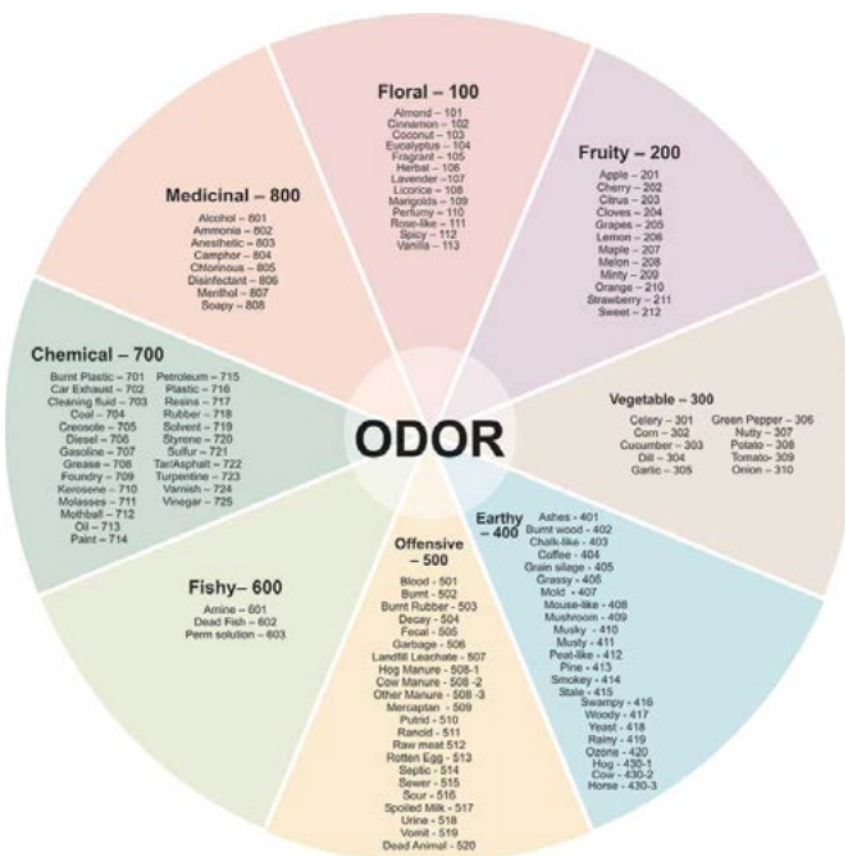
Il tono edonico è la proprietà che associa un odore alla reazione di piacere o repulsione che può provocare, determinando così il suo grado di gradevolezza o sgradevolezza. Questo viene generalmente valutato attraverso una scala a gradini (di solito da 7 o 9 livelli) e può essere determinato olfattometricamente, a concentrazioni superiori alla soglia di riconoscimento, permettendo ai valutatori di percepire e giudicare il grado di sgradevolezza o piacevolezza dell'odore.



Scala di tono edonico a 9 livelli

## Qualità

La qualità è la proprietà che permette di identificare un odore specifico, distinguendolo dagli altri. Il metodo più comune per valutare la qualità olfattiva è il confronto diretto con un set di sostanze di riferimento, utilizzando un vocabolario di descrittori che sintetizzano le caratteristiche sensoriali dell'odorante. I descrittori sono spesso usati in combinazione con tecniche strumentali, come la Gas-Cromatografia/Olfattometria (GC-O), per analizzare e identificare gli odori.



Esempio di descrittori relativi all'odore (Dalton, 2011)

## Natura Chimico-Fisica

La capacità di una sostanza di produrre un odore è legata a caratteristiche intrinseche, come la volatilità e la struttura molecolare. La volatilità di un composto, quantificabile tramite la tensione di vapore, è cruciale per stimare la capacità di una sostanza di causare un odore, poiché un odore è percepito solo quando una molecola gassosa si dissolve nella mucosa olfattiva e si lega a un recettore.

La struttura molecolare influenza le caratteristiche odorogene in base ai gruppi funzionali presenti (ad esempio, aldeidico, carbonilico, carbossilico, amminico, idrossilico, sulfidrilico). Le principali classi di composti odorogeni includono solfuri, acidi grassi volatili, alcoli, aldeidi, chetoni, eteri, esteri, ammine e terpeni, ciascuno con specifiche caratteristiche olfattive e processi di formazione associati.(tab.2)<sup>iii</sup>

Classi di composti	Composti chimici	Odore	Produzione
Composti solforati ridotti	H <sub>2</sub> S	uova marce	scissione di cisteina e metionina in condizioni anaerobiche
	Dimetilsolfuro - dimetildisolfuro	vegetali in decomposizione	degradazione delle proteine in condizioni anaerobiche
	Mercaptani	cavolo in decomposizione	condizioni anaerobiche spinte
Composti azotati	NH <sub>3</sub>	caratteristico acuto e pungente	condizioni anaerobiche
	Ammine primarie, secondarie e terziarie	pungente di pesce	deaminazione degli amminoacidi in condizioni anaerobiche
Terpeni	Limonene, α-pinene	agrumi, aghi di pino e resine	Biodegradazione degli scarti ligneo-cellulosici
Acidi volatili	Acidi grassi a catena breve	rancido e pungente	Incompleta ossidazione dei lipidi in condizioni anaerobiche
Alcoli	Alcoli	classico di alcol	demolizione e fermentazione in condizioni anaerobiche
Altri composti ossigenati	Aldeidi	dolce, pungente di frutti	demolizione e fermentazione in condizioni anaerobiche
	Chetoni	pungente, dolciastro, fortemente sgradevole	demolizione e fermentazione in condizioni anaerobiche
	Eteri	tipico degli eteri	demolizione e fermentazione in condizioni anaerobiche
	Esteri	dolciastro	demolizione e fermentazione in condizioni anaerobiche

Tab. 2 – Principali classi di sostanze odorogene

### 1.3. La Molestia e il Disturbo Olfattivo

La percezione olfattiva può essere descritta come gradevole o sgradevole, producendo reazioni immediate. Gli odori sgradevoli, spesso associati a situazioni nocive o di pericolo, attivano meccanismi di protezione e difesa, mentre gli odori gradevoli inducono meccanismi di attrazione e avvicinamento. Tuttavia, tali reazioni variano tra individui a causa di componenti soggettive legate a esperienze e fattori psicologici.

Il tono edonico da solo non è sufficiente a definire un odore come offensivo; il concetto di molestia olfattiva è legato agli effetti negativi prodotti dall'esposizione prolungata e ripetuta nel tempo (Brancher, 2017). Tutti gli odori, indipendentemente dalla gradevolezza, possono generare molestia a causa di fattori determinanti come durata e frequenza di

esposizione, intensità e contesto in cui l'odore è percepito. Anche un odore piacevole può diventare molesto se percepito frequentemente e ad alta concentrazione.

L'esposizione prolungata a odori indesiderati può influenzare significativamente il benessere degli individui, causando sintomi psico-fisici come ansia, mal di testa, irritazioni oculari, problemi respiratori e nausea (Shiffman, 1998; Sucker, 2008; Aatamila, 2011). Inoltre, può interferire con attività economiche e sociali, riducendo la qualità dell'ambiente, svalutando i beni e creando incertezza sulla sicurezza percepita (Nicell, 2009).

La registrazione di effetti negativi come fastidio, molestia e lamentele presuppone:

- Una sorgente emissiva che introduce l'odore in atmosfera.
- Un percorso di dispersione dell'odore nell'atmosfera, dove:
  - La diluizione e dispersione del pennacchio odorigeno riducono la concentrazione e l'esposizione.
  - Un percorso più lungo aumenta l'effetto di diluizione e dispersione.
- La presenza di recettori che possono lamentare effetti negativi.

Il disturbo olfattivo, dovuto alle emissioni di molecole attive, è principalmente associato a una gestione impropria dello smaltimento dei rifiuti e dell'allevamento di animali. I composti volatili, come aromatici, composti solfidrici organici e inorganici, così come composti azotati e alogenati, sono i principali contributori all'inquinamento odoroso generato dagli impianti di gestione dei rifiuti. Sebbene un composto odoroso possa rappresentare un fastidio piuttosto che un rischio per la salute, l'esposizione a lungo termine a una miscela di composti volatili può rappresentare un rischio per diverse malattie, tra cui asma, dermatite atopica e danni neurologici. I lavoratori e le comunità che vivono vicino a strutture che producono odori sono direttamente esposti a inquinanti aerei irritanti attraverso l'inalazione, motivo per cui è raccomandata la valutazione del rischio sanitario cumulativo.

La definizione di molestia olfattiva coinvolge vari fattori interrelati. In letteratura, il parametro FIDOL (Frequency, Intensity, Duration, Offensiveness, Location) è ampiamente utilizzato per riassumere il contributo dei seguenti fattori (Watts, 1995; Freeman, 2002):

- **Frequency** (frequenza): Numero di volte in cui un odore è rilevato in un intervallo di tempo.
- **Intensity** (intensità): Grandezza della sensazione generata da un odore.
- **Duration** (durata): Intervallo di tempo in cui un individuo è esposto a un odore.
- **Offensiveness** (offensività o tono edonico): Grado di sgradevolezza o gradevolezza di un odore.
- **Location** (ubicazione): Tipologia di uso del suolo e natura delle attività umane nei pressi di una sorgente odorigena.

Le informazioni relative al parametro FIDOL sono applicate negli studi di valutazione di impatto e considerate criteri in alcuni provvedimenti normativi internazionali (Nicell, 2009; Brancher, 2017). La Figura 5 mostra come i diversi elementi concorrono alla determinazione della molestia olfattiva, partendo dal processo di formazione degli odoranti.

Il termine "molestia" si riferisce all'effetto cumulativo prodotto da ripetuti eventi di disturbo in un lungo periodo, che genera un comportamento alterato nel recettore umano. Il "disturbo" invece, riguarda le reazioni umane immediate a un'esposizione a un fattore di

stress ambientale (odore) che porta a una valutazione cognitiva negativa (Van Harreveld, 2001).

Il meccanismo che porta dalla emissione di odoranti alla molestia olfattiva è complesso, coinvolgendo:

- Caratteristiche dell'odore (rilevabilità, intensità, tono edonico).
- Diluizione in atmosfera (turbolenza o stabilità atmosferica, direzione e velocità del vento).
- Esposizione dei recettori (ubicazione, tempo trascorso all'aperto).
- Contesto della percezione (presenza di odori di fondo, situazione ambientale).
- Caratteristiche del recettore (storia dell'esposizione, fattori psicologici, modalità di reazione, percezione dei rischi per la salute).

Gli effetti sulla salute sono correlati alla concentrazione e alla durata dell'esposizione agli odoranti, così come alla loro potenza irritante e/o biotrasformazione in metaboliti pericolosi. Mentre gli effetti sulla salute di una singola sostanza chimica sono ben noti, le interazioni tra molecole con diversi gruppi funzionali devono ancora essere ampiamente studiate.

Le emissioni di odori sono spesso dovute a inquinanti aerei a livelli inferiori alle soglie di tossicità stabilite. La relazione tra odore e tossicità non è sempre diretta e dipende dal tipo specifico di inquinante coinvolto. Alcuni agenti tossici non inducono fastidio olfattivo mentre agenti non tossici possono farlo. Pertanto, la relazione tra tossicità e fastidio olfattivo deve essere analizzata dettagliatamente, valutando le caratteristiche della miscela aerea e il tipo di fonte coinvolta.



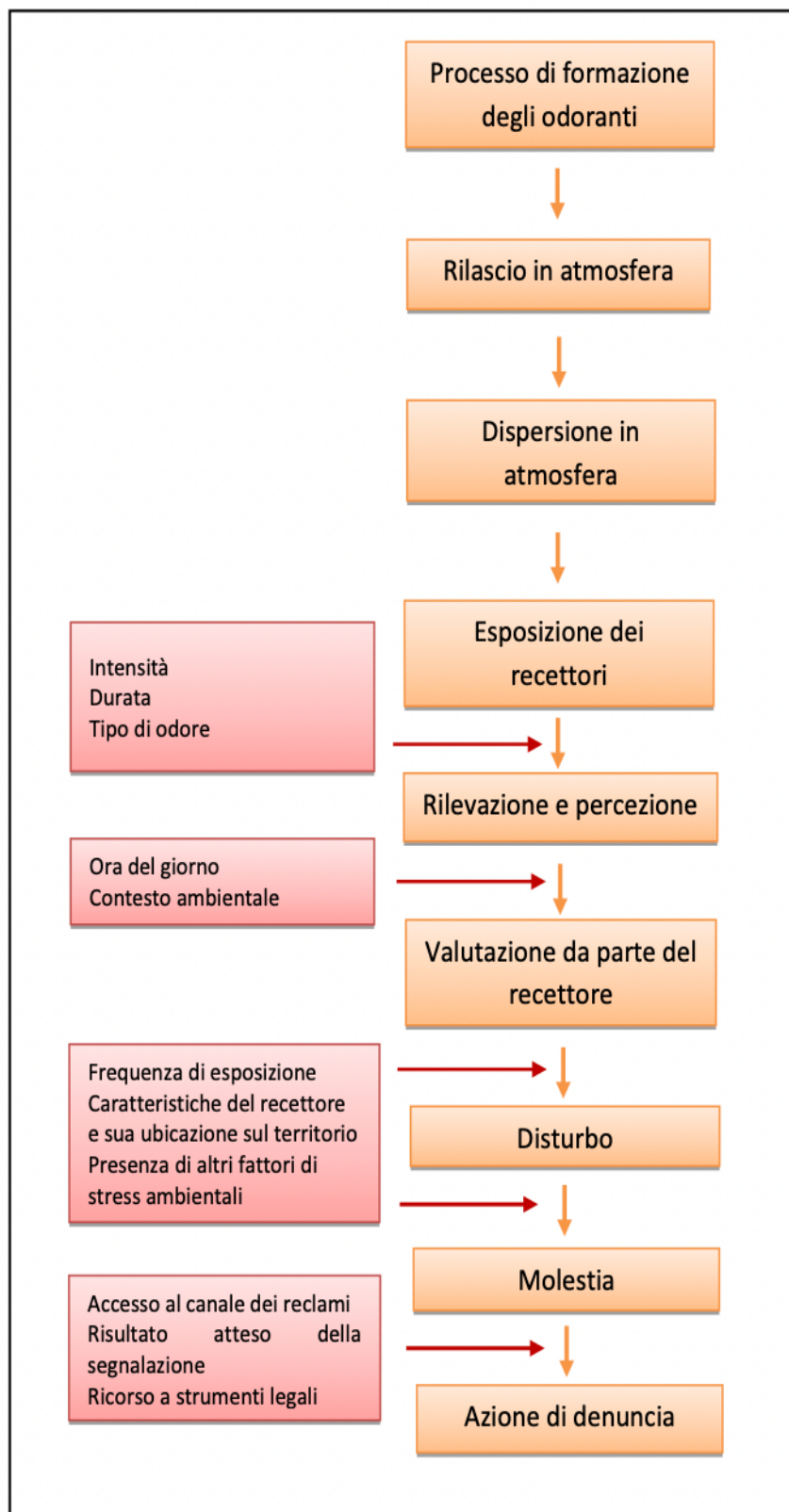


Fig. 5 – Rappresentazione schematica della determinazione della molestia olfattiva

## **2. METODOLOGIE DI MONITORAGGIO DELLE EMISSIONI ODORIGENE**

Il monitoraggio delle emissioni odorigene riguarda le attività necessarie per comprendere e gestire i problemi legati alla presenza di odori in un ambiente. Gli odori, essendo percepiti in modo soggettivo, rendono difficile una misurazione oggettiva, soprattutto quando le miscele sono complesse. Pertanto, non esiste un metodo unico per misurare gli odori, ma è necessario utilizzare una combinazione di tecniche complementari.

Le metodologie di monitoraggio si dividono in due categorie principali:

1. **Caratterizzazione delle fonti di odore:** mira a identificare le fonti emmissive nei contesti produttivi, analizzando i cicli lavorativi e le sostanze responsabili.
2. **Valutazione della risposta della popolazione:** verifica le segnalazioni di odori e cerca di correlare queste con le attività locali, determinando l'estensione geografica e temporale del problema.

Le principali tecniche di monitoraggio includono:

- **Caratterizzazione chimica:** analisi qualitativa e quantitativa delle sostanze che compongono l'odore, sebbene non traduca direttamente l'impatto olfattivo.
- **Olfattometria dinamica:** tecnica sensoriale che misura la concentrazione dell'odore utilizzando il senso dell'olfatto umano. Contrariamente all'analisi chimica, quella olfattometrica non fornisce informazioni sull'identificazione di una sostanza o di un gruppo di sostanze bensì permette di determinare le "unità di odore" della miscela gassosa.
- **Rilevamento della percezione del disturbo da parte della popolazione:** attraverso questionari e panel di esaminatori sul campo.
- **Nasi elettronici:** strumenti che simulano il processo olfattivo umano per discriminare le sorgenti di odore e quantificarne l'intensità.
- **Monitoraggio di parametri surrogati:** utilizza sostanze chimiche correlate agli odori per stimare la concentrazione odorigena.

Il monitoraggio inizia con indagini preliminari per identificare le aree e le attività da esaminare. È importante avere chiari gli obiettivi del monitoraggio per scegliere le tecniche più appropriate, coinvolgendo collaborativamente tutte le parti interessate, dalle amministrazioni locali ai cittadini.

La raccolta, il prelievo e la gestione dei campioni gassosi odorigeni sono cruciali per ottenere dati affidabili nelle indagini sulle emissioni odorigene. La qualità dei risultati dipende dalla rappresentatività dei campioni prelevati, che deve riflettere accuratamente le condizioni della sorgente o dell'ambiente monitorato.

### **2.1. Fasi principali del campionamento:**

#### **1. Preparazione:**

- **Informazioni contestuali:** Raccogliere dati sul contesto territoriale e sulle attività produttive, identificando le sorgenti odorigene principali.
- **Composizione chimica:** Conoscere la composizione chimica delle emissioni e la presenza di composti tossici, utile per le analisi olfattometriche.

- **Punti di campionamento:** Selezionare e valutare i punti di prelievo, considerando la sicurezza e l'accessibilità, e installare eventuali strutture necessarie (es. bocchettoni di prelievo).
2. **Progettazione del campionamento:**
- **Configurazione della sorgente:** Analizzare la geometria della sorgente e le modalità di emissione (convogliata, areale ecc.).
  - **Durata e variabilità:** Valutare se l'emissione è continua o variabile, e se sia necessaria una rappresentazione della condizione emissiva media o estrema.
  - **Condizioni operative:** Effettuare campionamenti durante le normali condizioni operative degli impianti, considerando la variabilità dell'emissione.
3. **Esecuzione del campionamento:**
- **Campionamenti multipli:** Se le condizioni sono variabili, eseguire campionamenti in diverse condizioni per ottenere un set rappresentativo.
  - **Strumentazione:** Utilizzare strumenti come il FID o il PID per misurare il Carbonio Organico Volatile Totale (COT) in modo continuativo, per garantire la rappresentatività dei campioni.
4. **Utilizzo dei dati:**
- **Modelli di ricaduta:** I dati olfattometrici devono essere rappresentativi del periodo di tempo utilizzato nei modelli matematici di dispersione, che solitamente si basano su dati meteorologici orari.

In sintesi, un campionamento accurato richiede una pianificazione attenta e un'analisi dettagliata delle condizioni di emissione, al fine di garantire dati affidabili e utili per la gestione e il controllo delle emissioni odorigene.

Il campionamento dei gas per analisi olfattometriche e chimiche può essere effettuato tramite diverse metodologie e supporti, a seconda del tipo di analisi da eseguire. Ecco un riassunto delle principali metodologie e dei supporti utilizzati:

## 1. Campionamento Olfattometrico

- **Metodo:** Utilizza sacchetti polimerici inerti (bags) per raccogliere il campione gassoso. La raccolta avviene tramite pompe a depressione, che evitano il contatto diretto con il campione e minimizzano il rischio di contaminazione.
- **Analisi:** I campioni raccolti possono essere analizzati direttamente per olfattometria dinamica, analisi chimica o con naso elettronico.

## 2. Campionamento Chimico

- **Metodo:** I campioni gassosi possono essere raccolti utilizzando substrati che fissano gli inquinanti attraverso:
  - **Adsorbimento:** Substrati come carbone attivo adsorbono i composti gassosi mediante interazioni fisiche.
  - **Chemiadsorbimento:** Substrati rivestiti con reagenti specifici trasformano i composti in forme non volatili.
  - **Assorbimento:** Utilizzo di soluzioni acquose per solubilizzare gli inquinanti.
- **Modalità:**
  - **Attiva:** Utilizza pompe per prelevare il campione e forzarlo a contatto con il substrato.
  - **Passiva:** Utilizza dispositivi che assorbono gli inquinanti tramite diffusione, senza pompe.

### 3. Canister



- **Metodo:** Contenitori in acciaio (canister) trattati per prevenire la degradazione dei composti gassosi. Possono essere utilizzati per campionamenti di durata variabile (da pochi minuti a oltre 24 ore).
- **Analisi:** Richiedono dispositivi specifici per l'analisi in laboratorio.

### 4. Prediluizione

- **Scopo:** Evitare la formazione di condensa e alterazioni del campione dovute a temperature elevate o umidità alta. La prediluizione riduce la concentrazione di ossigeno nel campione per ritardare l'ossidazione.
- **Metodo:** Utilizzo di azoto o aria sintetica per diluire il campione. È raccomandato un fattore di prediluizione non superiore a 15.

### 5. Materiali di Campionamento

- **Requisiti:** I materiali devono essere inerti, lisci, neutri (senza odori propri) e con bassa porosità per evitare perdite o diluizioni del campione.
- **Esempi:** Politetrafluoroetilene (PTFE) per tubi e Polietilentereftalato (PET) per sacche da campionamento.

### Considerazioni

La scelta della metodologia e dei materiali dipende dal tipo di analisi e dalle condizioni di campionamento, come la temperatura, l'umidità e la concentrazione degli inquinanti. La progettazione accurata del campionamento è fondamentale per garantire risultati rappresentativi e affidabili.

### Strategia di Campionamento Olfattometrico: Sorgenti Odorigene e Campionamenti Ambientali

Il campionamento olfattometrico mira a prelevare una frazione rappresentativa del campione gassoso per valutare le caratteristiche della sorgente di emissione o dell'aria ambiente. È importante sottolineare che la sola concentrazione di odore non è sufficiente

per una valutazione completa dell'emissione odorigena; è essenziale considerare anche il volume di gas associato alla sorgente. La combinazione di questi due parametri determina la portata di odore (OER – Odour Emission Rate), espressa in unità odorimetriche al secondo (ouE/s). La concentrazione di odore e la portata di odore sono cruciali per descrivere la sorgente emissiva e sono fondamentali per stimare l'impatto olfattivo utilizzando modelli matematici di dispersione.

Esistono diverse tipologie di sorgenti odorigene e, di conseguenza, approcci specifici al campionamento. È importante notare che i metodi descritti sono in linea con le norme tecniche e le linee guida in materia, e che, in assenza di modalità operative uniformi per alcune sorgenti, potrebbero essere necessari aggiustamenti specifici per garantire un campionamento rappresentativo.

### a) Sorgenti Puntuali

Le sorgenti puntuali sono quelle in cui l'emissione gassosa avviene generalmente in modo controllato attraverso un camino di espulsione. Il campionamento consiste nell'estrazione di una porzione di effluente convogliato attraverso un condotto e il trasferimento di questo campione, tal quale o prediluito se necessario, in un sacchetto di campionamento mediante una pompa a depressione. La pompa estrae il campione direttamente nel sacchetto senza contatto con la pompa stessa o altri materiali che potrebbero alterarne le caratteristiche (vedi Fig. 7).

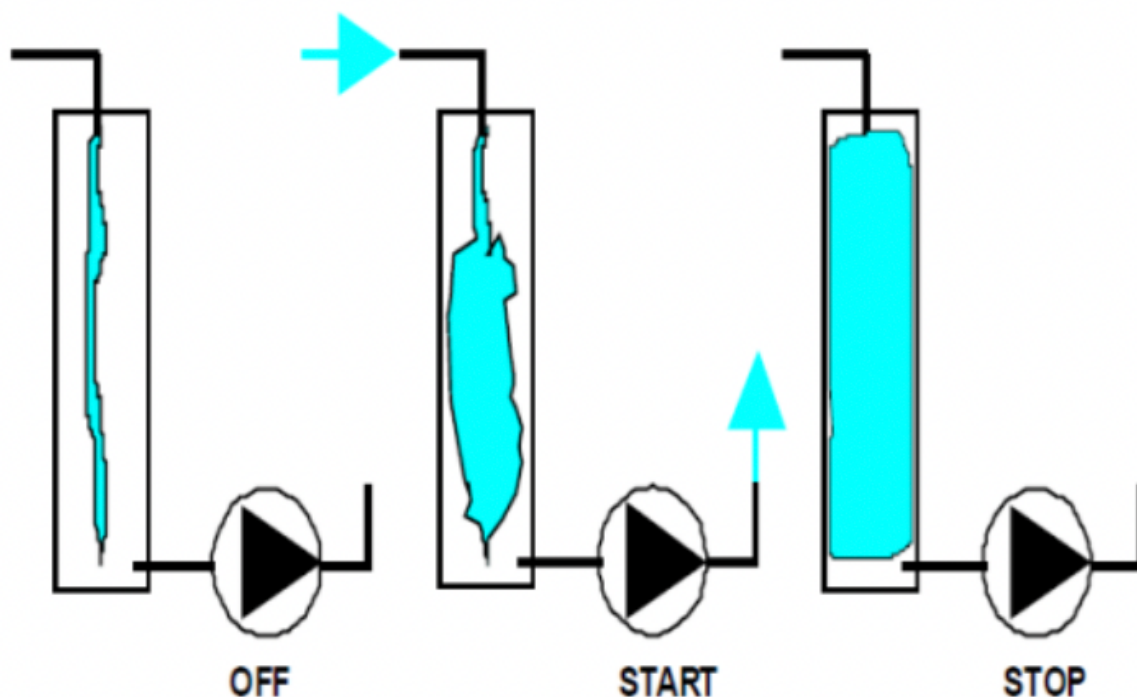


Fig. 7 - Rappresentazione del principio di funzionamento della pompa a depressione

Nel caso di emissioni convogliate, è fondamentale prelevare il campione nel punto di accesso che consenta una misura accurata della portata volumetrica, per garantire la rappresentatività del campione. La presa di campionamento deve essere posizionata in

una sezione del condotto che soddisfi i requisiti di stazionarietà e uniformità del flusso secondo le norme UNI EN 15259 e UNI EN ISO 16911. I sacchetti di campionamento devono essere condizionati secondo la norma UNI EN 13725. A tale scopo, essi vengono riempiti con l'aeriforme da campionare e poi svuotati, prima di eseguire il campionamento vero e proprio. Se l'effluente è espulso in pressione, è possibile campionare semplicemente inserendo il tubo del sacchetto nel condotto; la sovrappressione farà passare il gas nel sacchetto. La durata del campionamento deve tenere conto delle caratteristiche della sorgente e della variabilità della portata odorigena. In generale, si possono distinguere due scenari principali:

- Emissioni con livelli emissivi costanti, sia in termini di portata sia di caratteristiche chimiche e odorigene, richiedono almeno 3 campionamenti singoli distribuiti su un intervallo temporale rappresentativo di almeno 30 minuti. In alternativa, si possono usare pompe a depressione con temporizzatori per riempire un unico sacchetto nello stesso intervallo.
- Emissioni con portata costante ma caratteristiche chimiche variabili necessitano di più campionamenti per rappresentare diverse condizioni emissive. Ogni campione deve essere analizzato separatamente e, se necessario, il campionamento deve essere effettuato durante i momenti di maggiore criticità delle emissioni odorigene.

## b) Sorgenti Areali

Le sorgenti areali emettono odori da superfici solide o liquide estese. Si dividono in:

- **Attive:** sorgenti con flusso d'aria indotto, come i biofiltri.
- **Passive:** sorgenti senza flusso indotto, come discariche e vasche di depurazione.

Il confine tra sorgenti areali attive e passive è convenzionalmente fissato a  $50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}^2$ .

Le sorgenti areali **attive**, come i biofiltri, possono essere trattate come sorgenti puntuali ma con una superficie di emissione più estesa. Per il loro campionamento, si utilizza una cappa "statica" che isola una porzione della superficie emissiva, convogliando il gas emesso in un condotto d'uscita (vedi Fig. 8). Questo metodo evita che l'atmosfera e il vento diluiscano il gas prima della raccolta nel sacchetto. Il campione viene prelevato con le stesse modalità utilizzate per le sorgenti puntuali, e sul condotto d'uscita della cappa è presente un'apertura per il prelievo e la misurazione dei parametri fisici, come temperatura, umidità e velocità dell'aria.

Per ottenere dati rappresentativi, la superficie del biofiltro viene suddivisa in una griglia di sub-aree equivalenti, campionando almeno l'1% della superficie emissiva totale con un minimo di 3 e un massimo di 10 campioni. Prima del campionamento, è essenziale misurare i parametri fisici di ciascuna porzione di superficie isolata, mappando le velocità di emissione per verificare l'omogeneità del flusso.

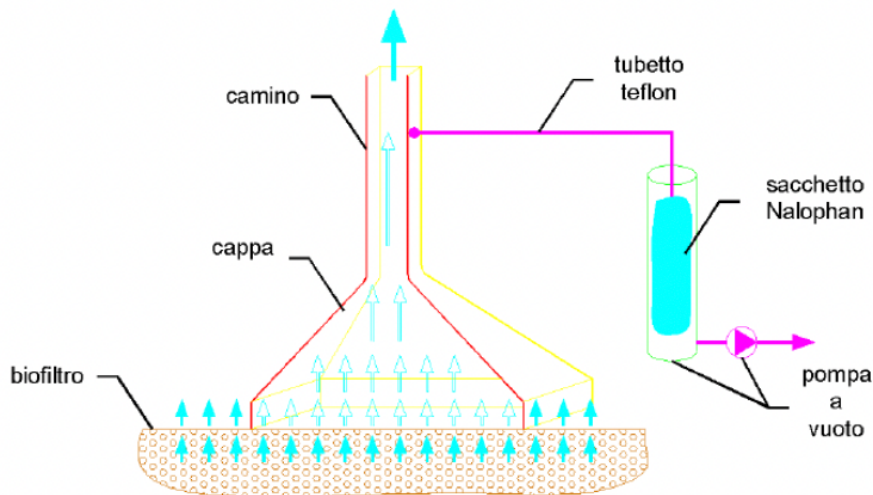


Fig. 8 – Schema di funzionamento della cappa statica

Le sorgenti areali **passive**, come quelle volumetriche, sono più complesse da caratterizzare poiché non hanno un flusso indotto. Per queste sorgenti, si utilizza una cappa ventilata chiamata "Wind Tunnel" (galleria del vento), progettata per simulare un flusso d'aria parallelo (orizzontale) che scorre sulla superficie emissiva, raccogliendo i composti odoriferi volatili e inducendo un'emissione naturale di odore, che viene poi raccolta dalla corrente d'aria (vedi Fig. 9).

Tuttavia, la concentrazione di odore misurata nell'aria in uscita dalla Wind Tunnel diminuisce con l'aumento della velocità del gas immesso. Per superfici poco emissive, il prelievo deve avvenire a basse velocità dell'aria (1-10 cm/s) per mantenere la concentrazione di odore sopra una soglia minima.

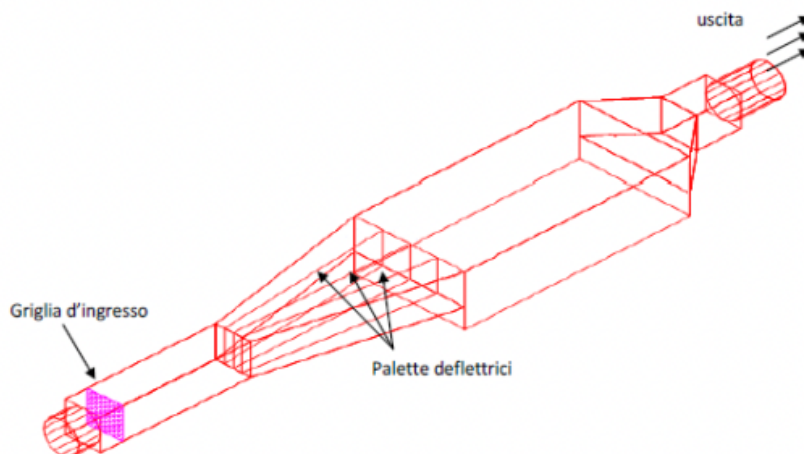


Fig. 9 – esempio di wind tunnel (DGR n. IX/3018 del 15 febbraio 2012)

In entrambe le tecniche, è cruciale considerare alcuni aspetti operativi per ottenere risultati accurati. Ad esempio, poiché le cappe isolano una porzione della superficie emissiva dall'ambiente esterno, potrebbero verificarsi alterazioni locali delle condizioni di emissione, come variazioni di pressione. Pertanto, è necessario lasciare fluire il gas all'interno della cappa per un periodo di stabilizzazione adeguato alle caratteristiche costruttive della

cappa. Inoltre, il numero di campioni da prelevare varia in base all'estensione e alla tipologia della sorgente areale, considerando l'omogeneità della superficie emissiva e la natura della sorgente.

#### c) **Sorgenti Volumetriche**

Le sorgenti volumetriche comprendono edifici da cui fuoriescono odori attraverso aperture naturali o forzate. Il campionamento di queste sorgenti è complesso e, se necessario, si può ricondurre a sorgenti puntuali o areali o stimare la portata gassosa con gas traccianti.

#### d) **Campionamenti Ambientali**

Il campionamento ambientale è cruciale per valutare la qualità dell'aria nelle aree influenzate dagli odori. È spesso necessario anche a distanze significative dai siti produttivi. Oltre ai campionamenti chimici, i campionamenti olfattometrici ambientali possono fornire informazioni utili, soprattutto se effettuati durante episodi di maggiore rilievo delle maleodorazioni. Essi possono aiutare nella caratterizzazione chimica, nell'addestramento dei nasi elettronici e nella quantificazione della concentrazione di odore. I campioni possono essere prelevati con pompa a depressione e possono essere sia istantanei sia mediati su periodi più lunghi. È importante effettuare i campionamenti in tempo reale in risposta a segnalazioni di molestia olfattiva.

#### e) **Campionamento per Addestramento di Nasi Elettronici**

Le tecniche di campionamento olfattometrico descritte sono adeguate anche per l'addestramento di nasi elettronici. Questo processo è fondamentale per il monitoraggio con naso elettronico, che deve essere istruito a riconoscere specifiche impronte olfattive. L'addestramento richiede campioni rappresentativi della sorgente, ma non necessariamente una conoscenza dettagliata della concentrazione e del flusso di odore di ogni campione.

### **Monitoraggio Chimico delle Emissioni Odorigene**

Il monitoraggio chimico delle emissioni odorigene mira a determinare la composizione qualitativa e quantitativa della miscela di sostanze responsabili dell'odore. Questa analisi fornisce informazioni sui composti presenti nel gas, ma non consente di determinare con precisione l'impatto odorigeno, poiché la correlazione tra composizione chimica e percezione dell'odore è complessa. Per valutare l'impatto, si può ricorrere al calcolo dell'Odour Activity Value (OAV), che misura la proporzionalità tra la concentrazione di un composto e la sua soglia di percezione olfattiva (OTC).

$$OAV = \frac{\text{concentrazione (mg/m}^3\text{)}}{OT(\text{mg/m}^3)}$$

Tuttavia, questa tecnica non considera le interazioni tra i diversi composti della miscela, il che può portare a discrepanze significative.



La caratterizzazione chimica è particolarmente utile nei seguenti casi:

- **Individuazione di Molecole Traccianti:** Per identificare le sorgenti responsabili dell'inquinamento odorigene.
- **Screening di Emissioni Odorigene:** Per rilevare la presenza di sostanze irritanti, tossiche o nocive.
- **Verifica dei Modelli di Dispersione:** Valutando la ricaduta di composti in tracce sui recettori.
- **Identificazione delle Sostanze Odorigene:** Per sviluppare e valutare sistemi di abbattimento efficaci.

## **2.2. Tecniche di Campionamento e Analisi**

Le analisi chimiche si concentrano su composti ambientali a bassa soglia olfattiva. Le tecniche di campionamento e analisi variano a seconda dei composti da rilevare e possono essere mirate a singoli composti o a una gamma di sostanze (analisi multiresiduali). I campioni d'aria possono essere raccolti tramite sacchetti di Nalophan o altri materiali adatti, o concentrati su supporti specifici tramite tecniche di adsorbimento, assorbimento o chemiadsorbimento.

I campioni raccolti tramite adsorbimento richiedono successivamente un processo di desorbimento, chimico o termico, per l'analisi. Il desorbimento termico offre in genere una maggiore sensibilità analitica. Le tecniche di campionamento diretto dell'aria richiedono sistemi di preconcentrazione, come la microestrazione in fase solida su fibra (SPME) o sistemi di estrazione diretta per i canister.

Per garantire risultati affidabili, i campioni devono essere analizzati entro 30 ore dalla raccolta, evitando la formazione di condensate. Le tecniche più utilizzate per la caratterizzazione chimica includono la gascromatografia abbinata alla spettrometria di massa (GC-MS) e le recenti tecniche che combinano la GC-MS con l'analisi sensoriale (GC-O-MS). Questi metodi consentono una precisa identificazione e quantificazione dei composti presenti nelle emissioni odorigene.

### **Analisi tramite Gascromatografia/Spettrometria di Massa (GC-MS)**

La gascromatografia accoppiata alla spettrometria di massa (GC-MS) è una tecnica analitica chiave per la determinazione chimica delle emissioni odorigene prodotte da sostanze organiche volatili. Prima di essere analizzato, il campione gassoso viene solitamente preconcentrato e successivamente desorbito termicamente per essere introdotto nel sistema GC-MS. Il metodo TO-15 dell'Environmental Protection Agency (EPA) statunitense è uno dei più comuni per l'analisi dei composti organici volatili (SOV) in campioni gassosi. Questo metodo prevede l'uso di canister di acciaio trattati per raccogliere il campione, che viene poi adsorbito su una fase solida e desorbito termicamente.

### **Applicazioni ai Campioni Odorigeni**

Per l'analisi di campioni con emissioni odorigene, il metodo TO-15 può richiedere alcune modifiche per adattarsi meglio a composti con alta polarità, come ammine alifatiche e acidi carbossilici, noti per avere un odore intenso e soglie di percezione molto basse. In questi casi, il Tenax è spesso utilizzato come materiale adsorbente grazie alle sue proprietà

idrofobiche. Inoltre, poiché la superficie interna dei canister può trattenere molecole polari, si preferisce l'uso di sacche come Nalophan o Tedlar, garantendo che l'analisi venga effettuata entro 30 ore dal campionamento.

### **Acquisizione dei Dati**

L'acquisizione dei dati in modalità "scansione completa" permette di ottenere spettri di massa per tutti i composti presenti nel campione, consentendo così una loro identificazione dettagliata. Per l'analisi quantitativa, il sistema viene calibrato utilizzando soluzioni gassose di riferimento per le sostanze di interesse. In modalità "scansione", la sensibilità è generalmente inferiore a  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , a seconda del volume d'aria analizzato, solitamente variabile tra 2 e 8 litri. In situazioni dove è necessaria una sensibilità maggiore, la modalità SIM (Selected Ion Monitoring) è in grado di rilevare concentrazioni fino a  $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### **Composti Odorigeni di Interesse**

I principali composti odorigeni analizzati mediante GC-MS includono:

- **Composti solforati:** tioli, tioeteri
- **Composti azotati:** ammine alifatiche, indoli
- **Composti ossigenati:** alcoli, aldeidi
- **Idrocarburi aromatici**

Il tracciato cromatografico di un campione tipico rivela una molteplicità di componenti, tra cui è importante identificare quelli che contribuiscono significativamente all'odore complessivo. Questo viene spesso valutato utilizzando l'OAV (Odour Activity Value) e confrontato con l'analisi olfattometrica.

### **Tecniche Complementari**

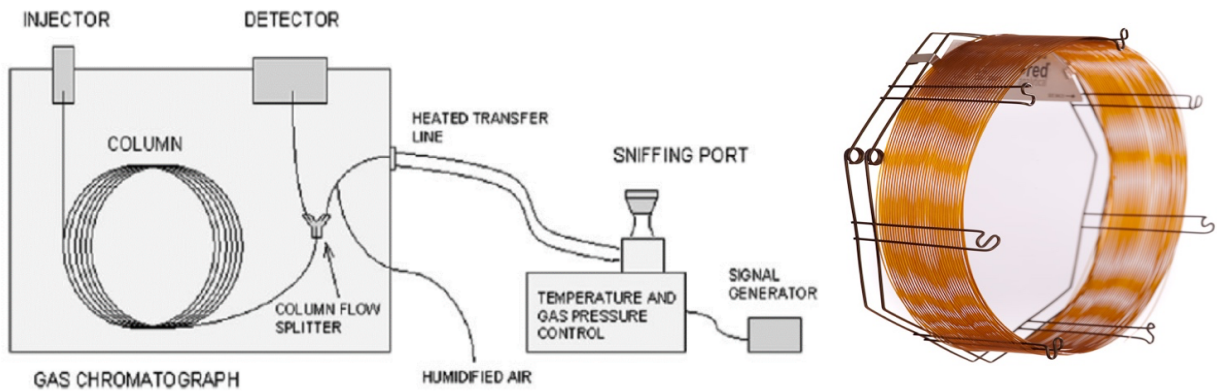
Oltre al metodo TO-15, la microestrazione in fase solida (SPME) è spesso utilizzata per la GC-MS, per via della sua praticità. Tuttavia, per campioni con elevate concentrazioni di composti, la SPME potrebbe non essere appropriata a causa della saturazione della fibra.

### **Gasromatografia/Olfattometria (GC-O)**

La Gasromatografia/Olfattometria (GC-O) è una tecnica che integra la separazione gascromatografica con la percezione olfattiva, eseguita da un panel di valutatori addestrati. Attraverso una porta di annusamento, realizzata in vetro o PTFE e collegata parallelamente agli analizzatori convenzionali, i valutatori sono in grado di identificare e analizzare i vari composti che vengono separati dal GC. La peculiarità di questa tecnica risiede nel fatto che l'eluato proveniente dalla colonna gascromatografica viene diviso, in proporzioni precise, tra un analizzatore convenzionale (di solito FID o MS) e una porta olfattometrica, come mostrato in figura sotto.

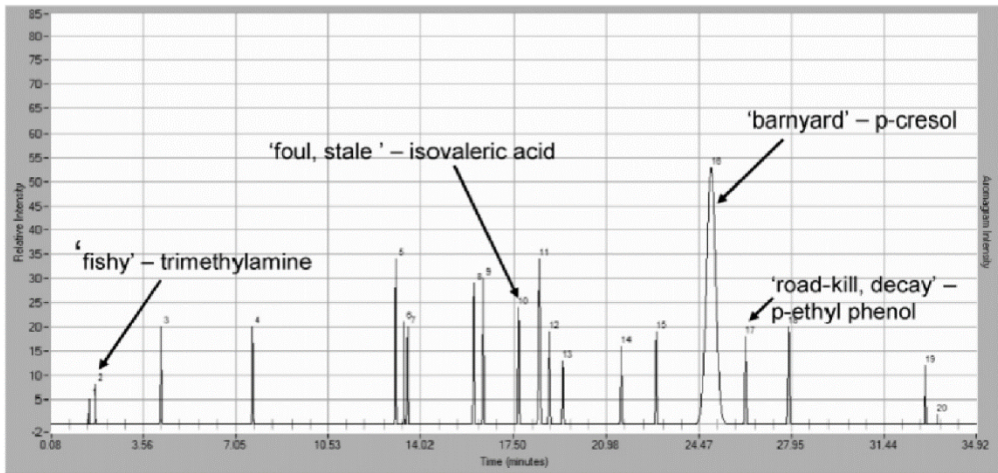
Per evitare la condensazione di analiti semi-volatili all'interno della linea di trasferimento, l'eluato viene condotto alla porta olfattometrica attraverso un sistema riscaldato. Inoltre, per mantenere la sensibilità olfattiva dei valutatori e prevenire la disidratazione delle mucose nasali dovuta al gas carrier, all'eluato viene aggiunta aria umidificata prima di raggiungere il sensore olfattivo umano. Il compito del valutatore è quindi quello di rilevare

eventuali odori, valutare la durata della percezione, descriverne le caratteristiche e quantificarne l'intensità. Le informazioni raccolte vengono registrate e associate ai picchi cromatografici presenti nel cromatogramma, generando quello che viene definito aromagramma, un esempio del quale è riportato nella figura sottostante.



schema di funzionamento dell'apparato strumentale GC-O cromatografica

colonna



esempio di aromagramma ottenuto da analisi condotta mediante GC-O

### Criticità e Sviluppi

Quando l'estratto in esame è sufficientemente concentrato, è possibile dividere il flusso di eluato in più direzioni, indirizzandolo verso diverse porte olfattometriche per permettere la rilevazione simultanea da parte di diversi valutatori. Questo metodo può offrire risultati più accurati, consentendo di ottenere un valore medio dalle diverse valutazioni per ciascuna analisi.

La qualità dei dati prodotti dal GC-O è fortemente condizionata dalle condizioni di separazione della miscela, poiché queste influenzano la qualità dell'eluato disponibile per la percezione e, di conseguenza, la risposta del rivelatore umano. Il comportamento

cromatografico delle sostanze odorose cambia a seconda delle fasi stazionarie della colonna gascromatografica e delle caratteristiche specifiche dei composti, alcuni dei quali possono subire decomposizione durante l'analisi.

Inoltre, il potere odoroso di alcuni composti è fortemente legato alla loro concentrazione; molti composti odorosi sono infatti presenti in concentrazioni estremamente basse all'interno di matrici complesse. Un'ulteriore criticità è data dalla co-eluzione di alcuni composti, che rende più difficile correlare l'aroma percepito al composto specifico. In questo contesto, i recenti sviluppi tecnologici includono la cromatografia bidimensionale (GC × GC), per garantire una separazione e una sensibilità maggiori, che si basa sulla continua raccolta di un effluente da una colonna GC e dalla re-iniezione periodica di piccole porzioni di questo ad una seconda colonna di diversa polarità.

### **Applicazioni e Utilizzo della GC-O**

La GC-O trova applicazione in vari campi, come quello alimentare, medico, profumiero e ambientale, soprattutto per identificare le sostanze responsabili delle molestie olfattive in contesti quali fattorie, discariche e impianti industriali. È anche utilizzata per valutare l'efficacia dei sistemi di trattamento per la riduzione delle emissioni odorose, fornendo indicazioni su quali composti sono più rilevanti per l'odore percepito prima e dopo il trattamento.

### **Conclusioni**

L'analisi mediante GC-MS e GC-O è essenziale per una comprensione approfondita delle emissioni odorigene, offrendo strumenti avanzati per la caratterizzazione chimica e sensoriale, e per il controllo di tali emissioni in diversi contesti ambientali e industriali.

Approfondiamo ora separatamente le tecniche sopracitate.

## **2.3. GASCROMATOGRAFIA**

La gascromatografia è una tecnica analitica di riferimento per la determinazione della concentrazione di composti organici volatili (VOC), utilizzando rilevatori specifici in base alla classe di molecole da analizzare.

### **Principi Chimici e Fisici della Gascromatografia**

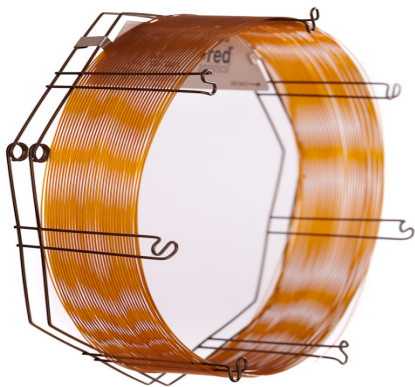
La spettrometria di massa è comunemente impiegata come rilevatore a valle della colonna cromatografica per determinare la concentrazione di VOC, che contribuiscono alla formazione di odori e si trovano in concentrazioni estremamente basse, tipicamente nell'ordine delle parti per milione (ppm).

La gascromatografia si distingue per l'uso di un gas inerte (ad esempio, azoto o elio) come fase mobile. Questo gas vettore trasporta il campione, costituito da una miscela di VOC, attraverso una colonna cromatografica. I VOC sono definiti come composti con una pressione di vapore superiore a 0,001 millibar a condizioni standard (20 °C e 1 atmosfera), il che li rende facilmente evaporabili.

La colonna cromatografica è un capillare lungo, solitamente avvolto su un supporto metallico, la cui superficie interna è rivestita con una fase stazionaria specifica. Questa

fase stazionaria è scelta in base alla sua affinità chimica con i composti da analizzare, determinando così la separazione dei diversi componenti della miscela.

Durante l'analisi, la colonna è riscaldata seguendo un profilo di temperatura predefinito, stabilito dal metodo analitico in uso. La capacità della colonna di separare le molecole si basa sulle interazioni tra la fase stazionaria e i composti analizzati, in confronto alla fase mobile (gas vettore).



esempio di colonna cromatografica

### **Meccanismo di Separazione**

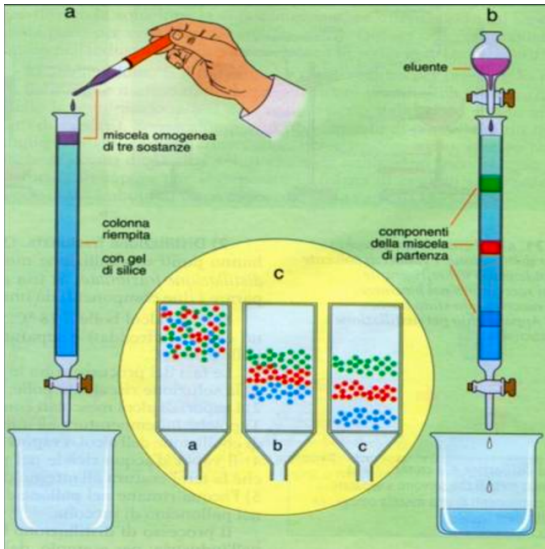
La separazione cromatografica avviene attraverso un processo di equilibrio dinamico tra la fase mobile (il gas vettore) e la fase stazionaria (il rivestimento della colonna). Questo equilibrio è descritto da una costante di ripartizione, che dipende dalla temperatura, dalla natura delle molecole e dalla fase stazionaria. Ad esempio, un rapporto di 5:1 indica che per ogni molecola trattenuta nella fase stazionaria, ce ne sono cinque nella fase mobile.

Il processo di ripartizione tra fase mobile e fase stazionaria si ripete lungo tutta la colonna, permettendo la separazione dei composti in base alle loro proprietà fisico-chimiche.

### **Rilevazione e Quantificazione**

Dopo la separazione, i diversi composti vengono rilevati mediante rilevatori specifici, come la spettrometria di massa. Per quantificare, ad esempio, la concentrazione di benzene o indeno-pirene nel campione, si confronta l'area sotto la curva del segnale ottenuto con l'area prodotta da una concentrazione nota dello stesso composto.

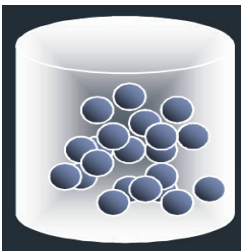
Questa tecnica consente di ottenere misurazioni accurate della concentrazione di VOC in campioni complessi, fornendo dati fondamentali per l'analisi chimica degli odori e per altre applicazioni.



Il termine cromatografia, è dovuto al fatto che le prime separazioni venivano effettuate su composti colorati (alcuni coloranti naturali tra cui la clorofilla), e che le sostanze, una volta separate, venivano identificate attraverso il loro colore. In alcune semplici tecniche cromatografiche, i metodi di rilevazione sono ancora basati sull'esame del colore delle sostanze separate o, per le sostanze incolori, sulla formazione di sostanze colorate, mediante l'impiego di opportuni reattivi chimici. Fra i primi ricercatori che si dedicarono a questo tipo di analisi occupa un posto di assoluta preminenza Tsweet, botanico russo, che formulò l'interpretazione corretta del fenomeno ed ebbe la chiara intuizione dei suoi sviluppi futuri.

### Meccanismo di base

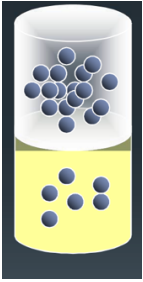
Supponiamo di avere una singola sostanza sciolta in una data quantità di un determinato solvente.



Se a questa soluzione viene affacciato un uguale volume di un altro solvente, immiscibile nel primo, .....



...la sostanza si distribuirà tra i due solventi arrivando a concentrazioni che dipendono dalle caratteristiche dei solventi e della sostanza.



Le concentrazioni di equilibrio rimangono costanti, pur essendo le molecole in continuo passaggio da una fase all'altra. Si tratta di un equilibrio dinamico caratterizzato dalla relazione

$$K_{rip} = [A]_{mob} / [A]_{sta}$$

$$K_c = [A]_{sta} / [A]_{mob}$$

Se ora entrambe le porzioni sono affiancate a nuovi volumi di solvente differente tenendo cioè fissa la posizione della porzione sottostante (fase stazionaria), e spostando quella superiore (fase mobile) in ciascuna coppia ottenuta la sostanza si ridistribuirà secondo lo stesso rapporto che era stato rispettato nella prima equilibrizzazione.

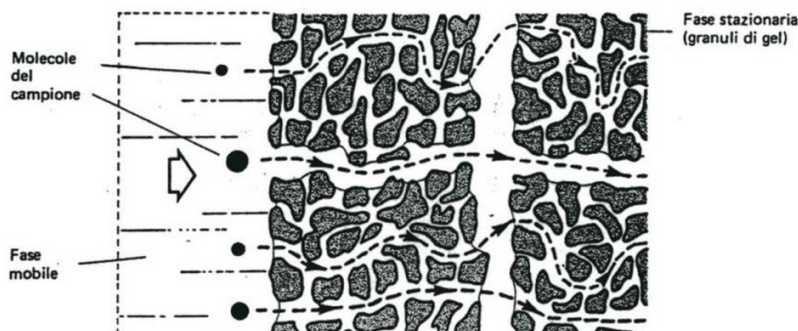
Ripetendo ora il processo di affacciamento con volumi puliti degli stessi solventi mantenendo sempre fissa la fase stazionaria e spostando la fase mobile in ciascuna coppia ottenuta la sostanza si distribuirà secondo lo stesso rapporto già osservato nella prima equilibrizzazione.

Ripetendo ora più e più volte il processo di affacciamento con volumi freschi di fase stazionaria e fase mobile, in ciascuna coppia ottenuta la sostanza si distribuirà secondo il solito rapporto.

Dopo molti affiancamenti/equilibrizzazioni, le distribuzioni che si instaurano mostrano che la sostanza:

- si sposta seguendo la direzione della fase mobile
- si accumula preferenzialmente nelle porzioni centrali.

Le concentrazioni che si realizzano in ciascuna porzione dipendono ovviamente da quale è la preferenza che la sostanza mostra per le due fasi.



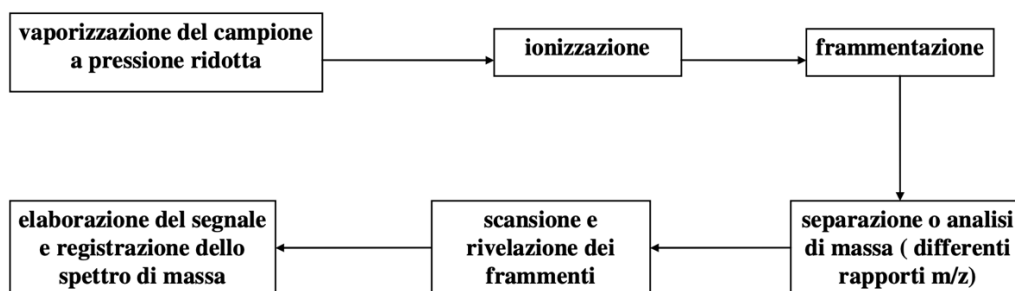
## 2.4. SPETTROMETRIA DI MASSA

La spettrometria di massa è una tecnica analitica avanzata utilizzata per identificare e quantificare molecole, basata sulla ionizzazione e frammentazione delle stesse. Le molecole vengono vaporizzate e ionizzate, generalmente tramite urto elettronico, in un ambiente a vuoto. Questo processo trasforma le molecole neutre in ioni positivi, che possono subire ulteriori frammentazioni.

I frammenti ionici così generati differiscono nei rapporti massa/carica ( $m/z$ ) e possono essere separati utilizzando campi elettrici o magnetici. Il risultato è uno spettro di massa, che rappresenta l'abbondanza relativa dei vari frammenti in funzione dei rispettivi rapporti  $m/z$ . Poiché la frammentazione è specifica per ogni composto, lo spettro di massa risultante è una sorta di "impronta digitale" che permette l'identificazione del composto.

### Processo

1. **Vaporizzazione:** Il campione viene vaporizzato a pressione ridotta in una camera riscaldata.
2. **Ionizzazione:** Le molecole vaporizzate vengono ionizzate, spesso mediante urto elettronico.
3. **Frammentazione:** Gli ioni formati possono subire frammentazioni che generano ulteriori ioni di massa inferiore.
4. **Separazione:** Gli ioni vengono separati in base al loro rapporto  $m/z$  tramite analizzatori come campi elettromagnetici, TOF (tempo di volo) o quadrupolo.
5. **Rivelazione:** I segnali prodotti dagli ioni vengono rilevati e registrati per formare lo spettro di massa.
6. **Elaborazione:** Lo spettro viene analizzato per identificare e quantificare i composti.

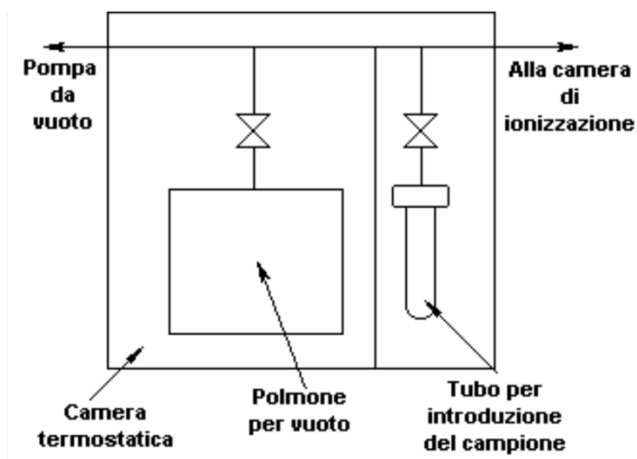


### Strumentazione e Introduzione dei Campioni

**a. Introduzione dei Campioni nello Spettrometro:** I campioni devono essere vaporizzati prima dell'analisi, anche se sono solidi o liquidi con bassa volatilità. Per farlo, si utilizza una camera di vaporizzazione a bassa pressione ( $10^{-4}$ - $10^{-7}$  mm/Hg) riscaldata fino a 250-300°C. I sistemi di introduzione variano in base alla natura del campione: gas, liquidi o solidi volatili utilizzano un sistema di introduzione discontinuo, mentre i composti poco volatili vengono direttamente inseriti nella camera di ionizzazione.

In caso di bassa volatilità, i campioni possono essere derivatizzati per migliorarne la volatilità, seguendo tecniche simili a quelle utilizzate nella cromatografia a gas (GC).





**b. Sorgente di Ioni:** La sorgente di ioni trasforma le molecole neutre in ioni primari, che successivamente si frammentano. Il tipo di ionizzazione (e.g., urto elettronico, EI) determina il numero e la varietà dei frammenti prodotti. Sistemi di ionizzazione più blandi, come la ionizzazione chimica (CI), producono spettri meno complessi. Tecniche come l'urto elettronico (EI) sono comuni per ionizzare quasi tutte le molecole organiche, mentre metodi come il bombardamento con atomi veloci (FAB) sono usati per macromolecole.

- **ionizzazione per urto elettronico EI (Electronic Impact):** questo sistema di ionizzazione si basa sugli urti che avvengono tra molecole del campione in entrata nella camera di ionizzazione, con elettroni emessi da un filamento di W portato all'incandescenza ed accelerati da un campo elettrico (cannone elettronico). Questi elettroni aventi elevata energia, sono in grado di provocare la ionizzazione di quasi tutte le molecole organiche.

Il campione si ionizza dando:

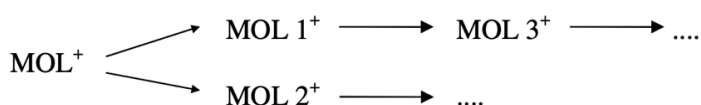


MOL = molecola dell'analita

MOL<sup>+</sup> = ione molecolare primario (parent ion)

Lo ione primario MOL<sup>+</sup> può trovarsi, a seconda dell'energia che ha ricevuto nell'impatto con l'elettrone, in stati energetici diversi caratterizzati da diversi contenuti di energia interna (rotazionale, vibrazionale, elettronica).

Questi contenuti elevati di energia interna comportano delle frammentazioni successive dello ione primario verso forme a minore contenuto energetico:



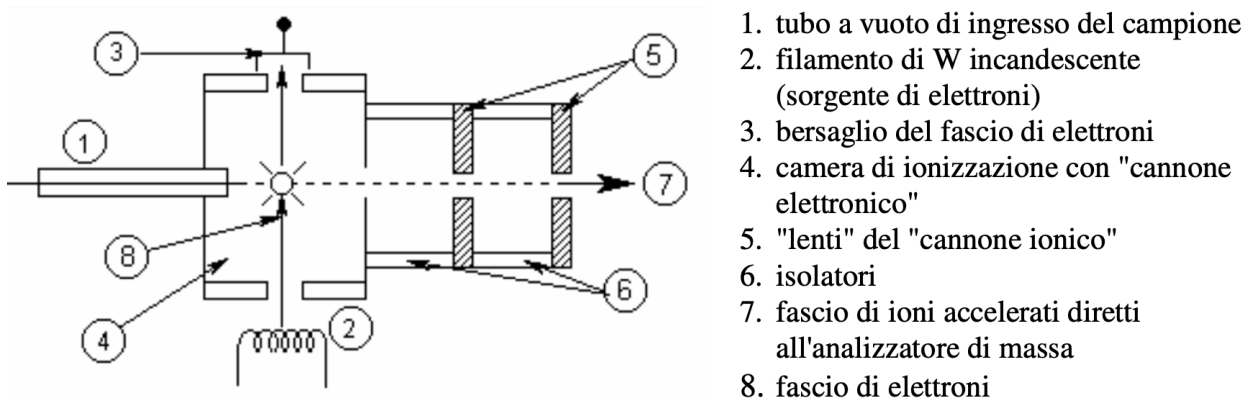
Le frammentazioni possono avvenire in seguito a scissioni omolitiche o eterolitiche di legami cui possono seguire anche riarrangiamenti tra le particelle formatesi (ioni, radicali,

ecc.) con formazione di ioni di diverso tipo.

Altri ioni primari invece, che hanno minore contenuto di energia interna, rimangono stabili e non subiscono frammentazioni. Nello spettro di massa, perciò, comparirà un picco in corrispondenza della massa molecolare di MOL.

La sorgente di ioni è completata poi da un "cannone ionico", cioè da un sistema che accelera e indirizza gli ioni primari e i frammenti ionici, verso un'altra zona dello strumento dove avviene l'analisi di massa.

Uno schema del processo di ionizzazione per urto elettronico è riportato in Fig.sotto.



**c. Analizzatori di Massa:** La valutazione delle prestazioni di uno spettrometro di massa si fanno in base alle sue capacità di risoluzione R:

$$R = m / \Delta m$$

dove m è la massa di un certo ione e  $\Delta m$  è la differenza minima di massa che deve esserci tra due ioni perché le rispettive righe consecutive risultino separate.

Gli apparati preposti alla separazione dei diversi ioni in base ai loro rapporti massa/carica si dicono **analizzatori di massa**. I più importanti di essi sono:

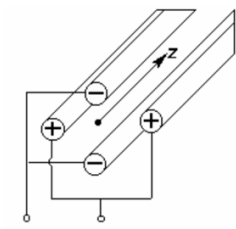
- **Campi elettromagnetici:** separano gli ioni in un tubo curvo sottovuoto.
- **Tempo di volo (TOF):** separa gli ioni in base alla velocità nel tubo di volo.

$$t = \frac{L}{v} \quad \text{con} \quad v = \sqrt{\frac{2Vz}{m}}$$

e Il tubo di volo in questo caso è lineare ed ha una lunghezza maggiore.

La tensione di accelerazione in questo tipo di analizzatori non è fornita con continuità ma a impulsi per evitare che dando ai diversi ioni un'accelerazione continua, essi possano uscire quasi nello stesso tempo non riuscendo a separarsi. La miscela di ioni aventi masse diverse entra nel tubo di volo e qui gli ioni si distanziano tra loro: gli ioni aventi masse minori giungeranno prima al rivelatore.

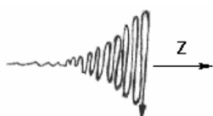
- **Quadrupolo:** usato spesso nei sistemi GC-MS, separa gli ioni usando campi elettromagnetici dinamici. E' l'analizzatore più usato nei sistemi accoppiati GC-MS (gas massa) ad elevata risoluzione; in esso si usano campi elettromagnetici non statici ma dinamici. Il quadrupolo è un sistema costituito da quattro barrette cilindriche (Fig. sotto)



collegate tra loro elettricamente a due a due. Gli ioni provenienti dal cannone ionico percorrono la parte centrale del quadrupolo lungo l'asse longitudinale. Alcuni ioni hanno

un percorso stabile di tipo 

e arrivano fino al rivelatore mentre altri assumono un cammino instabile del tipo



e cadono sulle barrette.

Ai quattro poli si applicano una tensione continua e una a radiofrequenza; il cambio di polarità è sfasato di 180°. Facendo variare i valori delle due tensioni applicate (la continua e quella a RF), i diversi ioni assumeranno in modo sequenziale il percorso stabile e arriveranno separati al rivelatore.

- **Trappola ionica:** intrappola e rilascia gli ioni in base alla variazione di tensione applicata.

**d. Rivelatore:** Il rilevamento avviene tramite moltiplicatori elettronici, simili ai fotomoltiplicatori, ma adattati per rispondere agli ioni piuttosto che alla luce.

### Cenni di analisi qualitativa e quantitativa in MS

#### **a. Analisi Qualitativa:**

Utilizzando una ionizzazione blanda, il picco principale sarà lo ione primario  $MOL^+$  (parent ion), utile per determinare il peso molecolare. Con l'impatto elettronico, invece, si ottengono numerosi frammenti. L'analisi qualitativa si basa sulle posizioni e abbondanze relative dei picchi ( $m/z$ ) per identificare la sostanza. Attualmente, il riconoscimento avviene confrontando lo spettro con quelli presenti in un database tramite un sistema automatico, che restituisce possibili corrispondenze con gradi di probabilità.

### **b. Analisi Quantitativa:**

Per l'analisi quantitativa, si seleziona una riga dello spettro che sia stabile e riproducibile. La concentrazione della sostanza è determinata confrontando l'altezza di questa riga con quelle ottenute da standard conosciuti. Curve di taratura vengono usate per assicurare accuratezza, specialmente per tracce. Tuttavia, è importante che la riga analitica non si sovrapponga a frammenti di altre sostanze con lo stesso rapporto m/z.

## **2.5. OLFATTOMETRIA DINAMICA**

L'olfattometria dinamica è una tecnica analitica utilizzata per quantificare l'intensità di un odore, espressa in unità di odore ( $OU_E/m^3$ ), attraverso la diluizione di un campione gassoso con aria pulita fino a quando l'odore non è più percepibile da un panel di valutatori umani. Questa tecnica è ampiamente utilizzata per valutare le emissioni odorigene da sorgenti industriali, impianti di trattamento dei rifiuti e altre attività che possono generare odori molesti.

### *Analisi Olfattometrica*

La norma tecnica UNI EN 13725/2022 descrive le procedure per condurre analisi olfattometriche, che possono essere realizzate con diverse metodologie a seconda della strumentazione disponibile. Queste metodologie sono finalizzate alla determinazione della soglia individuale di percezione e alla presentazione degli odoranti.

### *Modalità "si/no"*

In questa modalità, ai valutatori (panelisti) viene richiesto di indicare se percepiscono o meno un odore ("sì" o "no") quando un campione gassoso viene presentato attraverso una specifica apertura. Il panelista è consapevole che dalla stessa apertura potrebbe essere erogato un campione di riferimento (aria pulita) o il campione odorigeno da valutare.

### *Modalità di "scelta forzata"*

Qui, ai valutatori vengono presentate due o più aperture, una delle quali eroga il campione odorigeno mentre le altre rilasciano gas neutro. La scelta della porta che emette l'odore è casuale, e al panelista viene richiesto di identificare "forzatamente" da quale apertura proviene lo stimolo. Anche in caso di incertezza, il panelista deve effettuare una scelta, e successivamente classificare la propria decisione come azzardata, sospettosa o sicura. Le risposte vengono poi analizzate in base al livello di certezza indicato per determinarne la correttezza.

### *Selezione del Panel*

I valutatori vengono selezionati utilizzando il n-butanolo come odorante di riferimento. La selezione richiede la raccolta di almeno 10 stime di soglia individuale (ITE) su un periodo di almeno 3 sessioni in giorni diversi. Per diventare membri effettivi del gruppo di prova, i panelisti devono dimostrare una sensibilità olfattiva che rientri in un range definito. I dati raccolti durante i test di selezione devono rispettare i seguenti criteri:

- L'antilogaritmo dello scarto tipo (SITE) delle stime di soglia individuali deve essere inferiore a 2,3.
- La media geometrica delle stime di soglia individuali deve rientrare tra 0,5 e 2 volte il valore di riferimento accettato per il n-butanolo (62-246  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

### *Requisiti del Panel*

Per garantire l'affidabilità nel tempo, ogni membro del panel deve essere sottoposto a un controllo periodico della propria sensibilità olfattiva, determinando la stima di soglia individuale almeno una volta ogni dodici misurazioni regolari. Se un panelista non rispetta i criteri di selezione dopo la raccolta di 10-20 stime recenti, deve essere escluso dal gruppo fino al ripristino della conformità.

### *Numero e Ordine delle Presentazioni*

Le presentazioni agli esaminatori possono seguire un ordine crescente o casuale. Il fattore di incremento tra le diluizioni (Fs) deve essere compreso tra 1,4 e 2,4, e deve rimanere costante durante la misurazione. Una serie di diluizioni è considerata valida se soddisfa tre criteri principali:

1. Fornisce una stima della soglia individuale (ITE).
2. Contiene almeno due risposte corrette consecutive per le presentazioni con la concentrazione di odorante più alta.
3. Se oltre il 20% delle risposte ai bianchi (aria) sono positive, il panelista viene escluso dal calcolo.

### *Cicli di Misurazione*

Per determinare una soglia di gruppo valida, devono essere eseguiti almeno 2 cicli di misurazione. L'ideale è condurre 3 cicli, scartando il primo, con 5 panelisti. I panelisti che mostrano comportamenti anomali devono essere esclusi seguendo una procedura di vaglio retrospettivo, in cui lo scarto tra una stima di soglia individuale e la media geometrica di tutte le stime non deve superare un rapporto di 5 in positivo o in negativo. Se, dopo l'esclusione dei panelisti non conformi, il numero di panelisti rimanenti è inferiore a 4, la misurazione non è conforme alla norma.

### *Sicurezza del Panel*

Le sessioni olfattometriche devono rispettare le norme di sicurezza per i lavoratori, riducendo al minimo l'esposizione a sostanze potenzialmente tossiche. I panelisti devono essere informati sui rischi e le sostanze devono essere maneggiate con cura, seguendo le indicazioni del Documento di Valutazione del Rischio (DVR).

### *Requisiti di Qualità*

La norma stabilisce requisiti di qualità per le prestazioni complessive del laboratorio, in termini di accuratezza e ripetibilità, così come per la precisione e la stabilità delle diluizioni effettuate dall'attrezzatura. L'incertezza di misura può essere calcolata con diverse metodologie, e la norma fornisce alcuni esempi pratici.

## *Coinvolgimento della Popolazione*

La gestione delle emissioni odorigene spesso richiede il coinvolgimento della popolazione locale. Le segnalazioni di disturbo olfattivo possono essere il primo indicatore di una sorgente odorigena, e devono essere raccolte e validate in modo sistematico. L'uso di segnalazioni della popolazione, integrato con metodologie standardizzate, è riconosciuto come un utile strumento per la caratterizzazione e la gestione del fenomeno odorigeno.

### **Monitoraggio ambientale attraverso un panel addestrato**

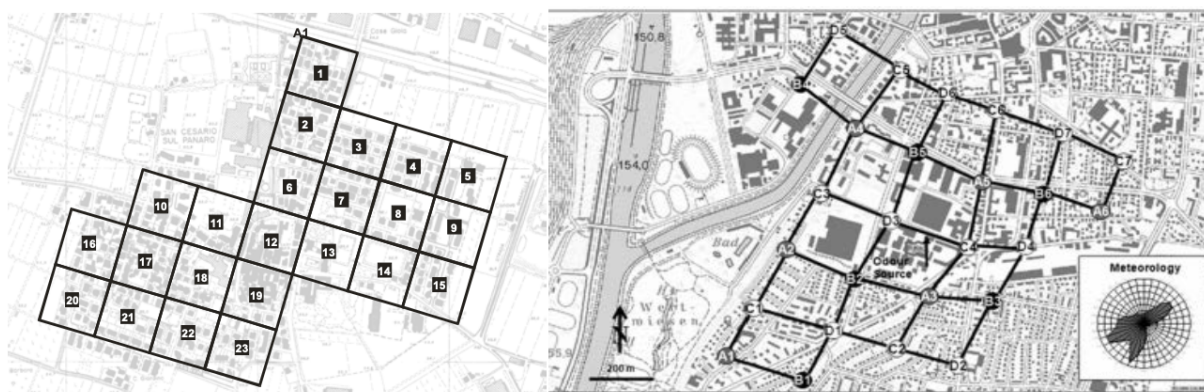
In alcuni paesi, come la Germania, l'uso di esaminatori addestrati è considerato un metodo affidabile per valutare l'impatto olfattivo delle sorgenti industriali sull'aria ambiente. Questo approccio è regolato dalla linea guida tedesca VDI 3940:2006, nota come *Field Inspection*. Tale metodologia è stata adottata anche a livello europeo, con l'inclusione nelle norme UNI EN 16841-1:2017 e UNI EN 16841-2:2017, recepite in Italia nel 2017. La normativa prevede due metodi per l'applicazione della *Field Inspection*: il metodo a griglia e il metodo del pennacchio.

### **Metodo a griglia**

Il metodo a griglia mira a determinare il livello di esposizione agli odori in un'area specifica, calcolando un indice quantitativo chiamato "frequenza di ore-odore". Questo indice viene determinato per ciascuna cella di una griglia virtuale sovrapposta all'area intorno all'impianto oggetto di studio, con i vertici della griglia che fungono da punti di osservazione.

L'area di studio viene stabilita prima dell'inizio delle campagne di monitoraggio, e la griglia virtuale è composta da celle con un lato variabile tra 100 e 300 metri. Ogni vertice della griglia rappresenta un punto di osservazione dove esaminatori qualificati (almeno 10) registrano la presenza e la tipologia dell'odore percepito (secondo una lista predefinita) ogni 10 secondi, per un periodo di 10 minuti, accumulando così 60 osservazioni per sessione. Ogni punto viene monitorato periodicamente per un anno. L'obiettivo è ottenere 104 misurazioni singole per cella (26 per ogni punto di osservazione). Tuttavia, sono ammesse anche campagne di monitoraggio più brevi, non inferiori a 6 mesi, con un minimo di 52 misurazioni per cella (13 per punto). In questi casi, è essenziale che i mesi caldi e freddi siano equamente rappresentati. La pianificazione delle sessioni di monitoraggio deve garantire una distribuzione uniforme tra stagioni, giorni della settimana e orari della giornata, indipendentemente dalle condizioni meteorologiche, inclusa la direzione del vento.

Per ogni vertice della griglia, si calcola il numero di ore-odore, ossia la percentuale di rilevazioni positive sul totale delle misurazioni effettuate. La frequenza degli odori in ogni cella viene quindi calcolata come la media delle segnalazioni di odore ai quattro vertici della griglia, rispetto al totale delle misurazioni. Questo approccio, basato su un'analisi statistica prolungata nel tempo, permette di creare una mappa rappresentativa dell'esposizione a specifici odori nell'area studiata.



*Esempi di grigliati su mappa*

### **Metodo del pennacchio**

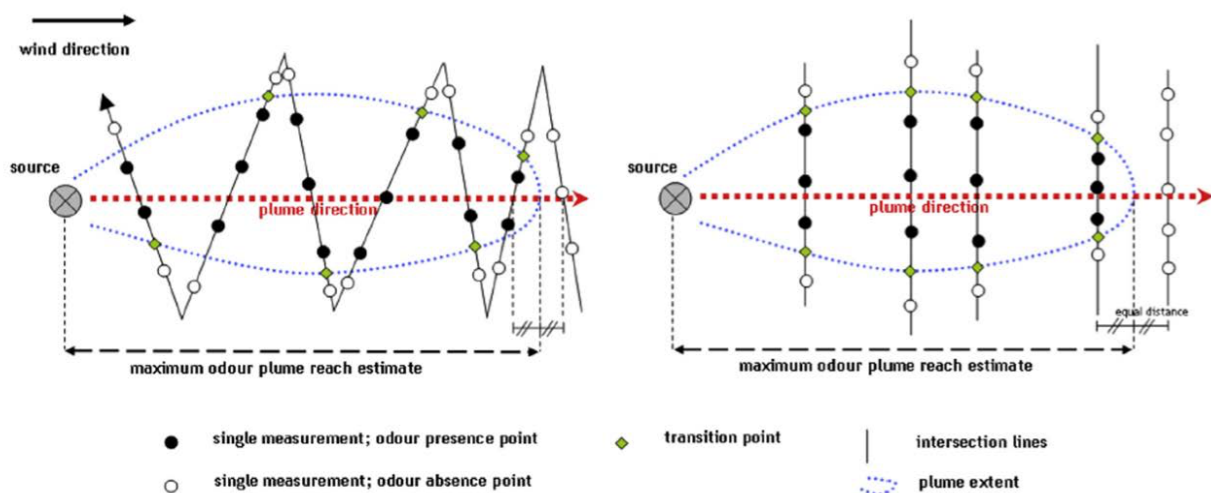
Il metodo del pennacchio è impiegato per valutare l'estensione della nube odorosa originata da una specifica sorgente, considerando le condizioni meteorologiche che influenzano la dispersione degli odori.

L'estensione del pennacchio viene determinata individuando i punti in cui avviene la transizione tra la presenza e l'assenza di odore (SI/NO), attraverso l'osservazione di esaminatori addestrati che si posizionano a valle, seguendo la direzione del vento e a varie distanze dalla sorgente. I dati raccolti permettono di stimare un'estensione plausibile dell'esposizione agli odori o di calcolare il flusso emissivo totale attraverso l'applicazione inversa dei modelli di dispersione (Schauberger, 2011; Van Elst, 2016).

Il metodo si articola in due approcci: stazionario e dinamico.

Nel metodo stazionario, ogni ciclo di misurazione prevede almeno 20 osservazioni singole, distribuite su 4 linee di intersezione, ciascuna con 5 punti di misurazione. Da queste misurazioni devono emergere almeno 6 punti di transizione. Gli esaminatori eseguono le rilevazioni in punti situati su assi perpendicolari rispetto alla direzione del pennacchio. L'estensione massima del pennacchio viene stimata basandosi sulle osservazioni ottenute lungo due linee di intersezione: la prima deve includere almeno un punto in cui è presente l'odore, mentre la seconda deve comprendere solo punti in cui l'odore è assente. La distanza tra la linea con assenza di odore e quella con presenza di odore non deve superare il 20% dell'estensione massima del pennacchio.

Nel metodo dinamico, il ciclo di misurazione viene eseguito da almeno due esaminatori addestrati, i quali contribuiscono in egual misura ai risultati, seguendo un percorso a zig-zag attraverso il pennacchio. Questo ciclo deve includere almeno 40 misurazioni singole, dalle quali devono essere ricavati almeno 20 punti di transizione (assenza di odore). L'estensione massima del pennacchio viene stimata in modo analogo al metodo stazionario, con la distanza tra i punti di transizione che non deve eccedere il 20% dell'estensione massima del pennacchio.



### *Rappresentazione grafica del metodo del pennacchio*

Il Metodo del Pennacchio offre una valutazione sensoriale che può essere correlata alla previsione del modello, basato sulle condizioni di emissione e sui dati meteorologici raccolti durante la prova. In questo contesto, è sufficiente una sola giornata per completare il test.

Il metodo della Field Inspection viene spesso utilizzato insieme ai modelli di dispersione, con l'obiettivo di confrontare e validare i risultati ottenuti.

Va sottolineato che questi metodi non forniscono una valutazione diretta della molestia olfattiva, ma piuttosto un indice di esposizione; la relazione tra esposizione e molestia non è ancora completamente chiarita e continua a essere oggetto di ricerca.



### **3. MODELLI DI DISPERSIONE PER LA VALUTAZIONE DELL'IMPATTO OLFATTIVO**

I modelli matematici di dispersione sono strumenti essenziali per valutare l'impatto olfattivo delle emissioni odorigene, simulando la dispersione di odori nell'atmosfera in diverse condizioni meteorologiche e di emissione. Questi modelli trovano applicazione sia in contesti operativi già esistenti, come impianti attivi, sia in scenari ipotetici, come impianti futuri o in fase di trasformazione.

La regolamentazione delle emissioni odorigene si basa su due approcci principali:

1. **Misura delle emissioni alla sorgente**, espressa come concentrazione dell'intera miscela ( $uo_E/m^3$ ) o di singoli composti chimici ( $mg/Nm^3$ ), confrontata con limiti stabiliti in base agli Odor Threshold (OT) o ai potenziali impatti tossicologici delle sostanze chimiche.
2. **Criteri di accettabilità al recettore**, generalmente espressi come concentrazione media di odore ( $ou_E/m^3$ ) rilevata su un periodo di tempo e considerata insieme alla frequenza di esposizione.

I modelli matematici sono particolarmente utili nel secondo approccio, aiutando a verificare se le emissioni rispettano i criteri di impatto stabiliti, stimando le concentrazioni di odore nel tempo e nello spazio. Questi modelli vengono impiegati per la valutazione dell'impatto olfattivo sia in fase di autorizzazione di nuovi impianti sia nella gestione operativa degli impianti esistenti, nonché per analizzare le segnalazioni di disturbo olfattivo.

Un aspetto fondamentale di questi modelli è il quadro S-P-R (Source-Pathway-Receptor), che illustra la relazione tra la fonte dell'odore, il percorso di dispersione e il recettore finale. La modellazione olfattiva varia in complessità e accuratezza, da valutazioni qualitative a modellazioni quantitative complesse della dispersione atmosferica. Questi modelli, ormai parte integrante delle normative di molti Paesi, vengono utilizzati per confrontare le concentrazioni di odore stimate con i criteri di impatto olfattivo (OIC), un approccio ampiamente diffuso anche in Italia.

Uno dei metodi più comuni per stimare l'impatto olfattivo è basato sulla portata di odore ( $ou_E/s$ ), calcolata moltiplicando la concentrazione dell'odore per il flusso volumetrico della sorgente e utilizzando dati meteorologici e topografici per prevedere la dispersione nell'ambiente. Le stime ottenute vengono confrontate con gli OIC, che includono il percentile di concentrazione e la soglia di percezione, variabili a seconda del contesto normativo di ogni Paese.

Negli ultimi anni, l'uso dei modelli matematici per la valutazione dell'impatto olfattivo è cresciuto significativamente in Italia, in risposta alla crescente sensibilità verso le problematiche legate agli odori e all'evoluzione del quadro normativo. Le ARPA e altre istituzioni hanno sviluppato linee guida specifiche per l'applicazione di questi modelli, delineando requisiti chiari per la preparazione degli input, la scelta e l'uso dei modelli e l'analisi degli output.

I modelli di dispersione per l'impatto olfattivo derivano da quelli utilizzati per la qualità dell'aria, ma presentano peculiarità che richiedono un'attenzione specifica, come l'analisi dei picchi di concentrazione su intervalli temporali brevi, essenziale per valutare correttamente l'impatto olfattivo. A tal proposito, l'approccio "Peak to Mean Ratio" è

spesso utilizzato per calcolare le concentrazioni di picco a partire da quelle medie su periodi più lunghi.

### **3.1. L'Approccio "Peak to Mean Ratio"**

Un aspetto cruciale nella modellazione degli odori è la considerazione dei picchi di concentrazione, che possono superare la soglia di percezione per brevi intervalli di tempo. Per affrontare questa sfida, si utilizza frequentemente l'approccio "Peak to Mean Ratio", che consente di stimare i picchi di concentrazione su intervalli temporali più brevi rispetto a quelli solitamente considerati nei modelli standard. La formula utilizzata è:

$$C_p = C_m \times (t_p/t_m)^a$$

Dove:

- $C_p$  è la concentrazione di picco su un intervallo di tempo breve  $t_p$  (es. secondi o minuti),
- $C_m$  è la concentrazione media calcolata su un intervallo di tempo più lungo  $t_m$  (es. ore),
- $a$  è un esponente che varia in funzione della stabilità atmosferica e della distanza tra sorgente e recettore.

I ricercatori hanno osservato valori dell'esponente "a" variabili tra -1 e 0, con un valore di -0,2 comunemente raccomandato. Tuttavia, una forma semplificata di questa equazione utilizza un unico valore moltiplicativo  $F^1$ , costante per tutte le celle del dominio e le ore di simulazione, per stimare la concentrazione oraria di picco:

$$C_p = F \times C_m$$

Sebbene semplificato, questo metodo consente di ottenere stime realistiche dell'impatto olfattivo, sfruttando i benefici dei modelli di dispersione esistenti.

### **Incertezza nella Simulazione Modellistica**

L'utilizzo di questi modelli, sebbene comporti un certo grado di incertezza dovuto alle limitazioni intrinseche e alla qualità dei dati di input, rappresenta comunque uno degli strumenti predittivi più avanzati e diffusi per la valutazione dell'impatto olfattivo.

### **3.2 APPROCCI INTEGRATI PER LA VALUTAZIONE DELLE MOLESTIE OLFATTIVE**

La gestione delle molestie olfattive rappresenta una sfida complessa, data la soggettività della percezione degli odori e la variabilità delle emissioni odorose. L'odore è una risposta complessa a molteplici sostanze chimiche presenti nell'aria, che interagiscono in modi differenti, rendendo difficile applicare un unico metodo analitico.

L'olfattometria dinamica è uno dei metodi sensoriali standardizzati per quantificare l'intera miscela odorosa, ma non è adatta al monitoraggio continuo delle emissioni. In questi casi,

---

<sup>1</sup> Le norme tecniche italiane prevedono  $F=2.3$

vengono utilizzati metodi senso-strumentali, che permettono di monitorare la variabilità delle emissioni nel tempo.

Gli strumenti di valutazione delle molestie olfattive si dividono in due categorie:

1. **Metodi Predittivi**, che utilizzano modelli per stimare il potenziale impatto di una fonte odorigena.
2. **Metodi Empirici**, basati su osservazioni dirette, come il monitoraggio strumentale o il coinvolgimento della popolazione attraverso questionari e sondaggi.

In conclusione, per una valutazione efficace delle molestie olfattive è essenziale adottare un approccio integrato che combini diversi strumenti di valutazione, adattandosi alle specificità del caso e fornendo informazioni complementari utili alla gestione delle emissioni odorose.

## **4. METODOLOGIE DI ABBATTIMENTO DEGLI ODORI**

La gestione delle emissioni odorigene è complessa e richiede una comprensione approfondita dei processi di produzione e delle fasi che generano le emissioni prima che raggiungano i recettori. Conoscere questi dettagli è essenziale per adottare strategie efficaci di controllo e riduzione degli odori tramite misure gestionali e ingegneristiche. Si può intervenire sia alla sorgente che lungo il percorso di dispersione per ridurre l'esposizione e l'impatto, ad esempio regolando l'altezza del camino per migliorare la diluizione e dispersione delle molecole gassose.

Il metodo più diretto per controllare le emissioni è intervenire alla sorgente, anche se può essere difficile e costoso, specialmente con grandi sorgenti diffuse. Altre strategie includono:

- Prevenire la formazione di sostanze odorose.
- Evitare il passaggio delle emissioni dalla fase liquida a quella gassosa.
- Captare e trattare le emissioni prima che vengano rilasciate in atmosfera.
- Limitare il trasporto delle emissioni dalla sorgente ai recettori.
- Migliorare la qualità dell'odore per ridurre il fastidio.
- Garantire una comunicazione chiara tra chi gestisce la sorgente e i recettori per minimizzare conflitti e stress.

La riduzione degli odori può essere affrontata con tre principali approcci:

1. **Metodi palliativi:** Utilizzo di odori gradevoli o coperture delle sorgenti.
2. **Metodi preventivi:** Riduzione delle emissioni alla sorgente eliminando le sostanze maleodoranti o limitando le condizioni favorevoli alla loro formazione.
3. **Metodi curativi:** Captazione e trattamento delle emissioni già formate.

I primi due approcci possono essere insufficienti o costosi, mentre il terzo impiega tecnologie per rimuovere gli inquinanti dall'aria.

### **4.1. Controllo degli Odori alla Sorgente**

Le tecnologie per il trattamento delle emissioni odorigene si suddividono generalmente in tre categorie, basate sul principio di azione:

- **Fisico:** captazione, diluizione, adsorbimento fisico, mascheramento.
- **Chimico:** assorbimento con reazione chimica, ossidazione, incenerimento.
- **Biologico:** utilizzo di bio-scrubber, biotrickling, bio-filtrazione.

#### **4.1.1. Captazione ed Estrazione**

L'impatto degli odori prodotto da un processo industriale può derivare da emissioni attraverso un camino, potenzialmente trattate da un sistema di abbattimento odori, da

sorgenti diffuse (come vasche o cumuli), o da sorgenti di fuggitive (come perdite da impianti o valvole). Per limitare le emissioni fuggitive, è importante confinare l'ambiente interno dell'edificio e ridurre la concentrazione di odori mediante copertura e captazione delle sorgenti interne, con successiva estrazione verso un impianto di abbattimento odori. Coperture localizzate, combinate con l'estrazione, possono facilitare il controllo delle perdite fuggitive, richiedendo attrezzature di aspirazione e abbattimento più piccole e, quindi, meno costose. La creazione di confinamenti e il trattamento delle arie esauste, quando tecnicamente possibile, sono utili anche per ridurre le emissioni da sorgenti diffuse. La normativa italiana richiede, in caso di fattibilità, la captazione e il convogliamento delle emissioni odorigene.

Convogliando le emissioni verso un camino, si facilita il mescolamento e la dispersione atmosferica, riducendo così la concentrazione degli odori nelle aree circostanti. In alcune applicazioni, un camino alto può essere sufficiente per mitigare gli odori senza necessità di un sistema di abbattimento, mentre, in altri casi, è indispensabile installare un dispositivo di abbattimento, come uno scrubber. Studi hanno dimostrato che le emissioni elevate da una superficie libera possono causare più disagi rispetto a emissioni da una fonte puntuale elevata; pertanto, si raccomanda l'uso di emissioni convogliate per migliorare la dispersione e ridurre l'impatto sui recettori.

#### 4.1.2. Adsorbimento

L'adsorbimento sfrutta la capacità di una superficie solida e porosa di trattenere le sostanze che vi entrano in contatto, rimuovendole dall'effluente. Gli adsorbenti più comuni includono:

- **Carbone attivo:** efficace per gas e vapori organici, alcuni gas inorganici e vapori di metalli, ma deve essere usato in flussi d'aria abbastanza secchi e a temperature inferiori a 40°C.
- **Zeoliti:** agiscono come setacci molecolari, scambiatori di ioni o adsorbitori di VOC idrofobi.
- **Particelle polimeriche macroporose:** utilizzate come granuli o perline, senza alta selettività.
- **Gel di silice e silicati di sodio e alluminio.**

Il carbone attivo è particolarmente adatto per flussi d'aria secchi e temperature moderate. In presenza di polveri o grassi, è necessario un pre-trattamento per evitare l'intasamento del carbone. Il processo di adsorbimento, ai fini della depurazione di un effluente aeriforme, può essere caratterizzato da due distinti parametri:

- *l'efficienza di adsorbimento*

$$E_a = 100 * (VOC_{in} - VOC_{out}) / VOC_{in}$$

- *la capacità operativa*

$$K = (Q_e / W_C) * \int (VOC_{in} - VOC_{out}) dt$$

dove:

$E_a$  = efficienza di adsorbimento (%)

$K$  = capacità operativa (%)

$Q_e$  = portata volumetrica dell'effluente aeriforme ( $\text{Nm}^3/\text{h}$ )

$\text{VOC}_{\text{in}}$  = concentrazione VOC in ingresso al corpo adsorbitore ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )

$\text{VOC}_{\text{out}}$  = concentrazione VOC in uscita dal corpo adsorbitore ( $\text{mg}/\text{Nm}^3$ )

$W_c$  = quantità di carbone attivo presente in fase di adsorbimento (kg)

L'integrale utilizzato per calcolare la capacità operativa copre l'intera durata del ciclo di adsorbimento, il quale si conclude quando il valore si avvicina al limite di emissione. È importante non confondere la capacità operativa con quella di adsorbimento: la capacità operativa è determinata in base al limite di emissione stabilito dalla normativa, mentre la capacità di adsorbimento si riferisce alla condizione di equilibrio in cui la concentrazione della sostanza in uscita dal letto di carboni è uguale a quella in ingresso, raggiungendo così la saturazione.

Durante il processo di adsorbimento, diversi fattori operativi possono influenzarne l'efficienza:

- **Velocità di attraversamento:** l'efficienza di adsorbimento è maggiore a velocità più basse.
- **Tempo di contatto:** un tempo di contatto più lungo aumenta l'efficienza di adsorbimento.
- **Umidità:** un'eccessiva umidità nell'effluente e la condensazione dell'acqua all'interno del letto adsorbente possono ridurre l'efficienza a causa della competizione con i VOC.
- **Temperatura:** un aumento della temperatura dell'effluente può aumentare il desorbimento, per questo si raccomanda di non superare i  $40^\circ\text{C}$ .
- **Presenza di sostanze indesiderate:** polveri, sostanze altobollenti e ossidi, che non riescono a essere desorbite, si accumulano nei carboni, riducendo l'efficienza del sistema.

## Applicazioni

L'adsorbimento è ampiamente utilizzato in industrie chimiche, trattamento delle superfici, fonderie, produzione di ferro e acciaio, industria alimentare e trattamento dei rifiuti. Il carbone attivo richiede sostituzione o rigenerazione periodica del letto filtrante.

### 4.1.3. Scrubbing Umido

Lo scrubbing umido implica il trasferimento di massa tra un gas solubile e un solvente, solitamente acqua. Questa tecnica è efficace per separare e purificare gas con alte concentrazioni di VOC, specialmente composti solubili in acqua come alcoli e formaldeide, o gas inorganici come ammoniaca e acido solfidrico. Il solvente deve essere adatto, con alta solubilità per il gas, bassa pressione di vapore e bassa viscosità. I liquidi di lavaggio comuni includono:

- **Acqua:** per rimuovere solventi e gas come alogenuri di idrogeno.
- **Soluzioni alcaline:** per rimuovere componenti acidi.
- **Soluzioni di ossidazione alcalina:** per soluzioni alcaline con ossidanti.
- **Soluzioni di idrogeno solfito di sodio:** per rimuovere odori, come le aldeidi.

- **Soluzioni acide:** per rimuovere componenti alcalini.
- **Solventi organici a bassa volatilità:** per il recupero di COV leggeri.

Lo scrubbing liquido diventa economicamente vantaggioso per portate di gas superiori a 5000 m<sup>3</sup>/h. È essenziale raffreddare i vapori caldi prima dell'entrata in contatto con le soluzioni di abbattimento e installare un demister per minimizzare il trascinamento della soluzione di lavaggio.

## Applicazioni

Lo scrubbing umido è comunemente utilizzato nell'industria chimica, trattamento delle superfici, stoccaggio e manipolazione di prodotti chimici e incenerimento dei rifiuti. È anche usato per il lavaggio acido e alcalino in vari settori industriali. È utile monitorare l'efficienza di depurazione tramite misuratori di pH o potenziale red-ox, e prevedere la gestione della soluzione di lavaggio per ottimizzare il recupero e lo smaltimento.

### 4.1.4 Sistemi Biologici di Abbattimento degli Odori

#### Biofiltrazione

La biofiltrazione rappresenta uno dei metodi biologici più diffusi per la rimozione degli odori. Questo processo si basa sull'azione degradativa di microrganismi che intervengono su un ampio spettro di composti organici e inorganici presenti nei gas di effluente. I microrganismi sono sviluppati su un supporto inerte, caratterizzato da una grande area superficiale che favorisce il contatto tra i gas e il biofilm batterico adeso alla superficie.

Il processo di biofiltrazione si articola in tre fasi principali:

1. **Assorbimento:** L'inquinante presente nel flusso gassoso attraversa l'interfaccia tra il gas e il biofilm acquoso che avvolge il supporto solido.
2. **Diffusione:** Il composto si diffonde attraverso il biofilm fino a raggiungere una colonia di microrganismi acclimatati.
3. **Degradazione:** I microrganismi degradano il composto, utilizzandolo come substrato primario o metabolizzandolo tramite vie enzimatiche alternative. Durante questo processo, si verifica anche una diffusione e consumo di nutrienti e ossigeno nel biofilm.

Il biofilm è cruciale per il funzionamento del biofiltro. Il suo spessore dipende dalla velocità di flusso, dal materiale del letto e dalla configurazione del sistema. Normalmente, lo spessore varia da qualche decina di micrometri fino a oltre 1 cm. Tuttavia, uno spessore eccessivo può limitare la diffusione dei nutrienti, influenzando negativamente l'efficienza del processo.

Il letto del biofiltro deve possedere elevata area superficiale per favorire lo sviluppo del biofilm e un'alta porosità per garantire una distribuzione uniforme dei gas. Materiali comunemente utilizzati includono cortecce, legno tritato, compost maturo e torba. È essenziale mantenere il controllo di parametri come ossigeno, pH, temperatura e umidità, poiché questi influenzano direttamente l'attività microbica. L'umidità ottimale per il mezzo filtrante è compresa tra il 40% e il 60%. L'uso di irrigatori può aiutare a mantenere

un'umidità adeguata, mentre un eccesso di umidità può portare a problemi come zone anaerobiche e formazione di percolato acido.

I biofiltri possono essere progettati in due configurazioni:

- **Biofiltri aperti:** La parte superiore è esposta all'atmosfera, richiedendo ampie superfici e soggetta a variazioni delle condizioni atmosferiche.

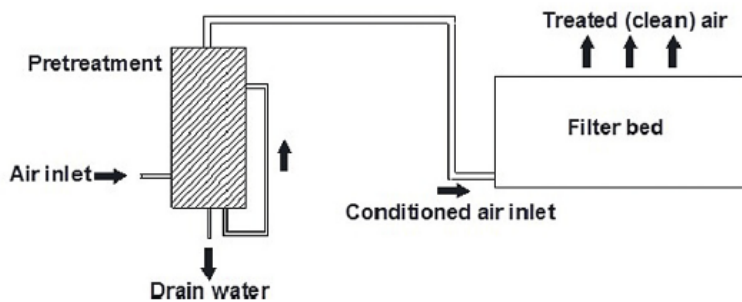


Fig. 17 – rappresentazione schematica di un biofiltro aperto (Kennes and Veiga, 2001)

- **Biofiltri chiusi:** Installati in camere chiuse che permettono un migliore controllo dei parametri di processo.

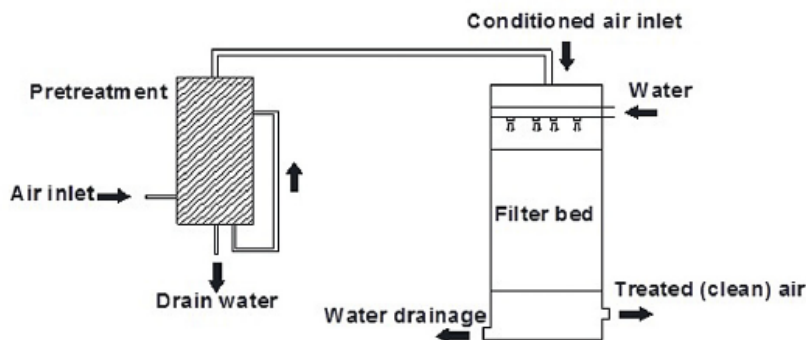


Fig. 18 – rappresentazione schematica di un biofiltro chiuso (Kennes and Veiga, 2001)

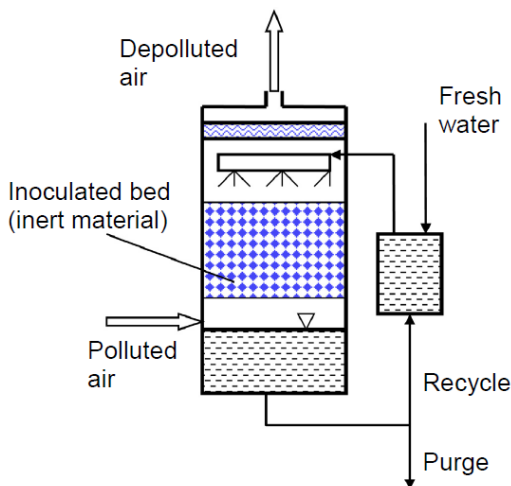
## Biotrickling

Il biotrickling è un sistema avanzato di trattamento biologico, particolarmente efficace per inquinanti solubili e biodegradabili. In questo processo, il gas attraversa un materiale di supporto continuamente irrigato con una soluzione nutritiva. Gli inquinanti sono assorbiti dalla fase liquida e degradati nel biofilm. Il materiale di supporto deve avere alta porosità,



stabilità chimica e resistenza alla compattazione. Materiali inerti come resine, ceramiche e poliuretano sono ideali.

Uno svantaggio del biotrickling è la necessità di trasferire gli inquinanti nella fase acquosa, il che lo rende meno adatto per composti poco solubili in acqua. Tuttavia, è particolarmente utile per composti che generano sottoprodotti acidi come H<sub>2</sub>S (vediamo nella Tab. 6 diversi gruppi di composti). La crescita eccessiva del biofilm può portare a intasamenti e flussi preferenziali, riducendo l'efficienza del sistema.



Rappresentazione schematica del sistema biotrickling (Delhomenie and Heitz, 2005)

Adatto	Generalmente adatto	Non adatto
Alcoli (metanolo, etanolo, butanolo, glicole, diglicole, butil glicole)	Stirene, naftalene	Idrocarburi alifatici (metano, pentano)
Aldeidi e chetoni (formaldeide, acetaldeide, acetone, metil isobutil chetone)	Composti eterociclici dello zolfo	Percloroetene
Acidi carbossilici e loro esteri (acido acetico, acido propionico, acido butirrico, n-butil acetato, etil acetato, metil metacrilato)	Disolfuro di carbonio	1,1,1-tricloroetano
Fenoli (fenolo, cresolo)	Tricloroetene, vinil cloruro	
Mercaptani		
Composti azotati (ammine, ammoniaca, composti eterociclici dell'azoto)		
Diclorometano, 1,2-dicloroetano, clorofenoli		
Idrogeno solforato		

Tab. 6 – Applicabilità del biotrickling ai diversi gruppi di composti (Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector, 2016)

## Bioscrubber

Il bioscrubbing è una tecnologia utilizzata per rimuovere le sostanze odorose attraverso un processo che combina l'assorbimento fisico in un liquido e il successivo trattamento

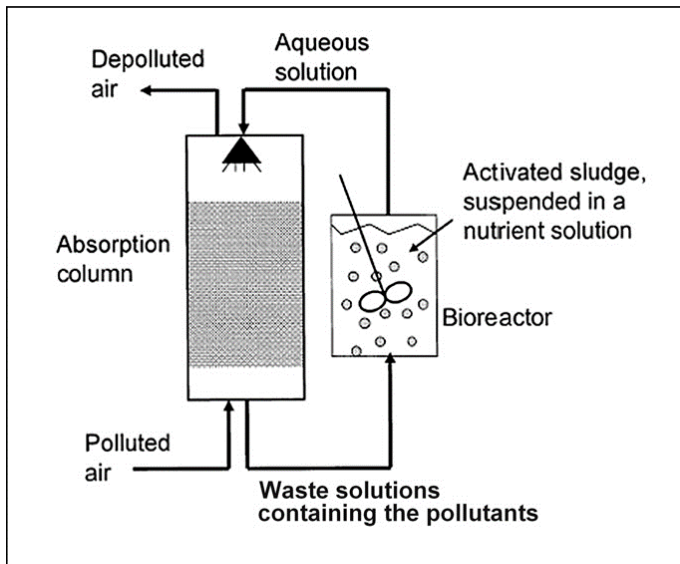
biologico in un bioreattore. Il liquido, una volta passato attraverso il bioreattore, viene ricircolato nell'unità di assorbimento, migliorando l'eliminazione degli inquinanti solubili. Il processo di eliminazione degli odori nei bioscrubber coinvolge sia meccanismi fisici che biochimici:

- **Absorbimento:** le molecole odorose vengono trasferite dalla fase gassosa a quella liquida, un processo che dipende dalla superficie di contatto, dalla durata dell'esposizione e dalla capacità di diffusione delle sostanze.
- **Biodegradazione/Biotrasformazione:** all'interno del bioreattore, microrganismi (eterotrofi o autotrofi) degradano gli inquinanti disciolti. I microrganismi eterotrofi utilizzano fonti di carbonio organico per la crescita e la produzione di energia, mentre gli autotrofi ottengono il carbonio dall'anidride carbonica presente nell'aria e traggono energia dall'ossidazione del solfuro.

L'unità di assorbimento facilita il trasferimento degli inquinanti dalla fase gassosa a quella liquida, con torri impaccate o a spray che sono particolarmente adatte per il bioscrubbing, in quanto garantiscono elevate efficienze anche per inquinanti meno solubili. Nel bioreattore, sotto aerazione costante, gli inquinanti vengono convertiti in anidride carbonica, acqua e biomassa dai microrganismi. L'effluente trattato viene poi riutilizzato nell'unità di assorbimento.

I bioscrubber sono apprezzati per la loro stabilità operativa, bassa resistenza al flusso e la capacità di controllare efficacemente vari parametri di processo, come il pH e l'aggiunta di nutrienti. Rispetto ai sistemi di biotrickling, i bioscrubber evitano problemi di intasamento e possono gestire grandi volumi di gas con alte concentrazioni di inquinanti. Inoltre, la rimozione continua dei prodotti di reazione riduce l'accumulo di sottoprodotti tossici. Un ulteriore vantaggio rispetto alla biofiltrazione e al biotrickling è la capacità di sostenere una maggiore quantità di biomassa in un'unità di processo più compatta. Tuttavia, i bioscrubber presentano anche alcuni limiti, come la generazione di rifiuti liquidi e il rischio di eccessiva produzione di fango. A causa del breve tempo di permanenza degli inquinanti gassosi nell'unità di assorbimento, questa tecnologia è meno adatta per composti con bassa solubilità in acqua.

I bioscrubber trovano applicazione nell'industria chimica e petrolchimica, oltre che negli impianti di trattamento delle acque reflue (vediamo in Tab. 7 l'applicabilità del bioscrubber ai diversi composti).



Rappresentazione schematica del funzionamento di un'unità di bioscrubber (Mudliar, 2010)

Adatto	Generalmente adatto	Non adatto
Alcoli (metanolo, etanolo, butanolo, glicole, diglicole, butil glicole) Aldeidi e chetoni (formaldeide, acetaldeide, acetone, metil isobutil chetone, metil etil chetone) Acidi carbossilici e loro esteri (EDTA, acido acetico, acido propionico, acido butirrico, <i>n</i> -butil acetato, etil acetato, metil metacrilato, estere dell'acido glicolico) Fenoli (fenolo, cresolo) Mercaptani Ammine Composti eterociclici dello zolfo e dell'azoto Clorofenoli Idrogeno solforato	Naftalene Tioeteri Ammoniaca	Idrocarburi alifatici (metano, pentano, esano, idrocarburi a lunga catena, acetilene, cicloesano, ecc...) Idrocarburi aromatici (benzene, toluene, xylene, stirene), eccetto naftalene Eteri (tetraidrofurano, dietil etere, diossano) Disolfuro di carbonio Composti dell'azoto Idrocarburi alogenati (diclorometano, tricloroetene, percloroetene, 1,1,1-tricloroetano, dicloruro di etilene, vinil cloruro), eccetto clorofenoli

Tab. 7 – Applicabilità del bioscrubber ai diversi gruppi di composti (Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector, 2016)

## Ozono e Ultravioletti (UV)

L'ozono è un agente ossidante economico che reagisce con una vasta gamma di composti odorosi, convertendoli in prodotti non odorigeni. Viene spesso utilizzato in forma di ozono generato in situ. I raggi UV agiscono in modo simile, ma entrambe le tecnologie sono generalmente meno efficaci rispetto ai metodi biologici. I vantaggi dell'ozono includono la semplicità e i bassi costi operativi, mentre le limitazioni comprendono la corrosività, i problemi di sicurezza e la possibilità di odori pungenti residui.

## **Ossidazione Termica**

L'ossidazione termica è un processo che prevede l'ossidazione controllata di gas combustibili e sostanze odorose attraverso il riscaldamento con aria o ossigeno in una camera di combustione. In questa camera, viene mantenuta una temperatura elevata per un tempo sufficiente a garantire la completa conversione in anidride carbonica e acqua. Tuttavia, a seconda della composizione inquinante del gas trattato e delle condizioni operative del sistema di ossidazione, altri inquinanti come CO, HCl, HF, HBr, HI, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, COV, PCDD/PCDF, PCB e metalli pesanti possono essere presenti nei gas di scarico trattati. Pertanto, potrebbe essere necessario un trattamento aggiuntivo a monte o a valle, in base alla composizione specifica del gas (Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector, 2016).

L'ossidazione termica è particolarmente efficace per trattare sostanze poco solubili in acqua, come i flussi gassosi che contengono oli minerali. Tuttavia, i costi di investimento sono elevati e diventano giustificabili solo se combinati con sistemi di recupero del calore.

In questo contesto, l'ossidazione termica rigenerativa riveste un'importanza fondamentale. In questi impianti, l'energia termica viene recuperata internamente tramite letti ceramici, che agiscono come accumulatori di calore, assorbendo il calore dal gas e restituendolo per facilitare la combustione. Le soluzioni moderne prevedono un numero dispari di camere rigenerative, dove i letti ceramici operano alternativamente per minimizzare le emissioni durante la commutazione del flusso gassoso (in una camera si preriscalda, in un'altra si ossida, e nella terza si scarica). È quindi cruciale, in fase di progettazione, valutare attentamente il tempo di contatto alla temperatura di ossidazione prescritta, nonché la posizione della termocoppia utilizzata per misurare tale temperatura, poiché questi fattori influenzano l'intero processo di progettazione.

Le variabili chiave da monitorare includono la temperatura di ossidazione, il corretto funzionamento delle valvole di commutazione e la temperatura dei letti ceramici.

## **Ossidazione Catalitica**

L'ossidazione catalitica riduce la temperatura richiesta per la reazione di ossidazione mediante l'uso di catalizzatori. Questo processo è tipico per composti chimici nell'industria chimica e altre applicazioni. I catalizzatori, come platino e palladio, hanno una vita utile limitata e richiedono rigenerazione o sostituzione. È importante controllare variabili come la temperatura, i tempi di contatto e le perdite di carico per garantire l'efficienza del processo.

## **Neutralizzazione degli Odori**

Esistono numerosi prodotti per neutralizzare o mascherare gli odori tramite nebulizzazione. Questi prodotti riducono la percezione dell'odore, ma non sempre sono efficaci e possono causare ulteriori problemi se usati in eccesso. La loro utilità è particolarmente evidente nell'industria dei rifiuti organici, sebbene non ci siano prove definitive della loro efficacia complessiva.

## **5. CONCLUSIONI**

Le emissioni di odori sono considerate la principale causa di disturbo percepito dai cittadini che vivono vicino a determinate strutture. Anche se raramente è associato un reale rischio tossicologico-sanitario all'impatto olfattivo proveniente da fonti legate ad attività di gestione dei rifiuti e simili, a causa della natura raramente pericolosa degli odori e delle concentrazioni generalmente molto basse, l'immaginario collettivo spesso associa i cattivi odori a condizioni di "aria non salubre". Di fatto, a questi odori viene spesso attribuita una valenza maggiore rispetto a quella di contaminanti più pericolosi, ma non direttamente percepibili dai nostri sensi.

Le emissioni di odori influenzano la qualità della vita, causando stress psicologico e sintomi come insonnia, perdita di appetito e comportamenti irrazionali. Gli odori sono diventati una preoccupazione prioritaria per gli operatori delle strutture, gli ingegneri e gli urbanisti che si occupano di impianti di trattamento dei rifiuti e industriali. Le lamentele per gli odori possono portare alla chiusura di strutture ed impedire l'espansione di quelle esistenti. La particolare e complessa natura delle numerose sostanze trattate in queste strutture determina un "impatto olfattivo", la cui entità dipende da una varietà di fattori, tra cui il tempo, le condizioni meteorologiche e la soggettività di ciascuna persona nella percezione di un odore specifico. L'interazione di questi fattori ha ritardato i progressi nella regolamentazione degli odori.

Le difficoltà nel risolvere queste controversie derivano anche dall'assenza di standard universalmente riconosciuti per determinare oggettivamente l'effetto negativo indotto. Solo pochi paesi, infatti, dispongono di criteri di qualità dell'aria per gli odori o soglie di emissione di odori per le fonti industriali. A livello europeo, la norma EN 13725:2022 fa riferimento al campionamento e alla quantificazione degli odori utilizzando l'olfattometria dinamica dalle fonti. Stati Uniti, Australia, Canada e Giappone stanno adottando approcci simili.

Gli odori molesti non rappresentano solo una minaccia diretta per la salute ed il benessere umano, ma contribuiscono anche in modo significativo alla formazione dello smog fotochimico e all'emissione di contaminanti secondari particolati. In questo contesto, è cruciale un abbattimento degli odori che sia economicamente conveniente e rispettoso dell'ambiente, in un mondo sempre più attento alla sostenibilità e alla preservazione ambientale, ma anche agli standard di qualità della vita. Le tecnologie fisiche/chimiche sono state ampiamente utilizzate grazie al loro ridotto ingombro, all'esperienza consolidata nella progettazione e nell'operazione, e all'avvio rapido, ma presentano significativi impatti ambientali e costi operativi elevati. D'altro canto, le biotecnologie sono state promosse come metodi di abbattimento degli odori a basso costo e rispettosi dell'ambiente.

L'obiettivo di tutta questa tesi è fornire una base teorica e pratica per affrontare il problema del campionamento e della misurazione degli odori utilizzando tecniche olfattometriche, analitiche e miste per valutarne l'impatto.

### **5.1. Impatto tossicologico dipendente dal tipo di materiale presente nell'impianto**

Non sempre la soglia olfattiva è in grado di segnalare la presenza di un composto nocivo in quanto esistono molte sostanze con valori di TLV inferiore al valore di soglia olfattiva. In questi casi, dunque, è estremamente importante disporre di una rilevazione strumentale essendo la sensibilità organolettica inadeguata. Di seguito si riporta un elenco di alcune sostanze osmogene caratterizzate da un valore di TLV inferiore al limite di percezione olfattiva. Tra queste, particolarmente rilevante è l'ammoniaca i cui effetti irritanti sono presenti a concentrazioni inferiori al valore di soglia olfattiva.

<b>Sostanza</b>	<b>Soglia olfattiva (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>TLV (mg/m<sup>3</sup>)</b>
Acroleina	0,49	0,25
Ammoniaca	33	18
Acrilonitrile	47	45
Canfora	100	2
Dimetilformamide	300	30
Diossano	620	320
Metanolo	7.800	260
Glicole metilenico	190	80
Ozono	0,2	0,05
Anidride solforosa	79	13
Tricloroetilene	535	115
Tetracloruro di carbonio	650	65

Diversi composti chimici richiedono diluizioni di oltre 1000 volte per rientrare entro i limiti di percettibilità olfattiva, molti altri richiedono diluizioni di almeno 100 volte. Il metantiolo richiede addirittura diluizioni di 2 milioni di volte. Metantiolo e butantiolo sono stati ritrovati in concentrazioni superiori anche al TLV, per il primo il superamento è di 87 volte. Fortunatamente il TLV per questi composti esprime in realtà una condizione di intollerabilità olfattiva più che la tossicità sull'organismo umano. Il superamento del TLV è invece evidente per sostanze volatili di chiara origine industriale quali il benzene, toluene e cloruro di vinile.

La seguente tabella indica i componenti misurati in concentrazioni superiori al limite di tossicità a lungo termine e dà il fattore di diluizione necessario per conseguire il limite TLV.

<b>Composti</b>	<b>Limite TLV (mg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Discariche di rifiuti urbani</b>			<b>Discariche contenenti rifiuti industriali</b>				
		<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>E</b>	<b>F</b>
Benzene	3,25	-	1	-	7	35	35	2	7
Toluene	375	-	-	-	-	2	2	-	-
Xileni	435	-	-	-	-	-	-	-	-
Propilbenzene	245	-	-	-	-	-	-	-	-
Cloruro di vinile	10	-	-	-	-	3	3	2	-
Tetracloroetilene	335	-	-	-	-	-	-	1	-
Metantiolo	1	-	-	87	-	-	-	60	-
Butantioli	1,5	-	-	2	-	-	-	-	-
Metanolo	260	-	-	1	-	-	-	-	-

## **Possiamo dire che gli odori sono sempre un problema di salute pubblica? Oppure, gli odori possono rappresentare talvolta solo un problema sociale?**

Analizziamo composti odorigeni tossici e non tossici originati da varie attività, mirati al recupero e alla trasformazione di sostanze organiche

### **Impianti di gestione dei rifiuti**

Il problema del fastidio olfattivo, dovuto alle emissioni di molecole attive, è fondamentalmente associato agli impianti di gestione dei rifiuti, compresi i rifiuti solidi urbani e gli impianti di trattamento delle acque reflue. In queste attività, le emissioni di odori possono essere attribuite sia allo stoccaggio dei materiali prima del loro trattamento, sia alla produzione di nuovi composti durante le fasi di lavorazione. La produzione animale è anche una fonte importante di fastidio olfattivo, impatti ambientali e avversità per la salute.

### **Strutture di produzione animale**

Le strutture di produzione animale rappresentano una significativa fonte di emissioni odorose. Le operazioni come l'allevamento intensivo, la gestione dei rifiuti animali e l'uso di fertilizzanti organici contribuiscono all'emissione di odori sgradevoli che possono influenzare negativamente la qualità dell'aria e la salute delle comunità vicine.

### **Produzione industriale**

La produzione industriale può contribuire alle emissioni di odori attraverso diverse attività, inclusi i processi di produzione chimica, la lavorazione dei materiali e altre operazioni industriali che rilasciano composti odorosi nell'aria. La gestione inadeguata delle emissioni può portare a impatti negativi sull'ambiente e sulla salute pubblica.

## **5.2. Valutazione del rischio sanitario**

L'esposizione a lungo termine a una miscela di composti volatili può comportare un rischio sanitario cronico o cancerogeno. La valutazione del rischio sanitario cumulativo è stata valutata in diversi studi. Gli effetti non cancerogeni e cancerogeni dell'esposizione a composti odorosi sono stati analizzati per comprendere meglio i potenziali rischi per la salute umana.

Gli effetti sulla salute sono legati alla concentrazione e alla durata dell'esposizione agli odoranti, nonché alla loro potenza irritante e/o alla biotrasformazione in metaboliti pericolosi.

Vediamo alcuni importanti esempi.

Composti azotati

*Ammoniaca*

L'ammoniaca (NH<sub>3</sub>) è un gas incolore con un odore pungente caratteristico. È ampiamente utilizzata nell'industria e nell'agricoltura. L'esposizione all'ammoniaca può causare

irritazione delle vie respiratorie, degli occhi e della pelle. Concentrazioni elevate possono provocare tosse, bruciore alla gola e agli occhi, danni alle vie respiratorie e in casi estremi, edema polmonare.

### *Ammine alifatiche*

Le ammine alifatiche sono composti organici contenenti gruppi amminici. Possono causare irritazione delle vie respiratorie, degli occhi e della pelle. L'esposizione prolungata o ad alte concentrazioni può portare a effetti sistemici come mal di testa, nausea e in casi estremi, danni al fegato e ai reni.

### Composti solforati

#### *Idrogeno solforato*

L'idrogeno solforato ( $H_2S$ ) è un gas incolore con un odore caratteristico di uova marce. È prodotto naturalmente da processi di decomposizione organica e da alcune attività industriali. L'esposizione all' $H_2S$  può causare irritazione degli occhi, delle vie respiratorie e della pelle. Concentrazioni elevate possono provocare mal di testa, vertigini, nausea e, in casi estremi, perdita di coscienza e morte.

#### *Disolfuro di carbonio*

Il disolfuro di carbonio ( $CS_2$ ) è un liquido volatile con un odore dolce e etereo. È utilizzato principalmente nella produzione di rayon e cellophane. L'esposizione al  $CS_2$  può causare irritazione delle vie respiratorie e degli occhi, mal di testa, vertigini e nausea. L'esposizione prolungata può portare a danni neurologici e cardiovascolari.

#### *Mercaptani*

I mercaptani sono composti organici contenenti gruppi tiolici. Sono noti per i loro odori forti e sgradevoli. Possono causare irritazione delle vie respiratorie, degli occhi e della pelle. L'esposizione prolungata o ad alte concentrazioni può portare a effetti sistemici come mal di testa e nausea.

### Composti aromatici

#### *BTEX*

BTEX è un acronimo che si riferisce a benzene, toluene, etilbenzene e xileni, che sono composti aromatici volatili. Sono comunemente trovati in prodotti petroliferi e solventi. L'esposizione a BTEX può causare irritazione delle vie respiratorie e degli occhi, effetti sul sistema nervoso centrale come mal di testa, vertigini e nausea. Il benzene è noto per essere un cancerogeno umano e può causare leucemia.

### Composti alogenati

#### *Clorobenzeni*

I clorobenzeni sono composti aromatici alogenati utilizzati in vari processi industriali e come intermedi chimici. Possono causare irritazione delle vie respiratorie, degli occhi e della pelle. L'esposizione prolungata può portare a danni al fegato e ai reni.



## Cloroformio

Il cloroformio è un liquido incolore con un odore dolce. È stato utilizzato come anestetico, ma il suo uso è stato limitato a causa dei suoi effetti tossici. L'esposizione al cloroformio può causare irritazione delle vie respiratorie e degli occhi, mal di testa, vertigini e nausea. È anche un potenziale cancerogeno per l'uomo.

Per concludere questa tesi ho ritenuto interessante riportare un articolo su una vicenda che ha sconvolto particolarmente le nostre vite, soffermandoci però sull'aiuto di nuovi approcci e tecniche per monitorarlo e combatterlo.

Di seguito si riporta un esempio recente di applicazione dello studio degli odori in diagnostica medica

### **5.3 Rilevamento del COVID-19 dal Respiro Espirato ( COVID-19 DETECTION FROM EXHALED BREATH )<sup>iv</sup>**

Le epidemie virali, come quella di COVID-19 che ha avuto un impatto devastante a livello globale con oltre 770 milioni di casi e 7 milioni di morti entro il 2023, hanno dimostrato la necessità di strumenti diagnostici rapidi ed efficaci per contenere la diffusione delle malattie. Sebbene la PCR e i test antigenici siano stati fondamentali durante la pandemia, essi presentano limitazioni: la PCR richiede tempo e risorse, mentre i test antigenici possono essere meno affidabili nelle fasi iniziali dell'infezione. Il respiro espirato, che contiene migliaia di COV che riflettono lo stato di salute di una persona, si è rivelato una promettente alternativa diagnostica. Questo studio propone un sistema che sfrutta la spettrometria di massa e il nano-campionamento per rilevare il SARS-CoV-2 direttamente dal respiro, offrendo un metodo diagnostico efficiente e facilmente integrabile in contesti diversi.

È stato condotto uno studio clinico tra il 2021 e il 2022 su 294 soggetti reclutati presso centri di test COVID-19. I partecipanti, preoccupati di essere infettati, hanno soffiato in un dispositivo collegato a uno spettrometro di massa, che ha permesso l'analisi immediata dell'aria espirata e l'identificazione di composti organici volatili (COV) associati al SARS-CoV-2.

Gli spettri di massa, raccolti nell'intervallo di massa/carica ( $m/z$ ) da 10 a 351, sono stati ottenuti tramite un dispositivo di nano-campionamento accoppiato a uno spettrometro di massa ad alta risoluzione. I dati grezzi sono stati pre-elaborati per ridurre il rumore e migliorare la qualità del segnale. La pre-elaborazione includeva normalizzazione, sottrazione del fondo e riduzione del rumore. Successivamente, gli spettri sono stati elaborati da algoritmi software personalizzati per aumentare la sensibilità del rilevamento dei biomarcatori.

I dati sono stati quindi analizzati e classificati utilizzando algoritmi di apprendimento automatico, come SVM, ANN e RF, addestrati per identificare i soggetti positivi al COVID-19 in base ai COV rilevati. Le prestazioni del sistema sono state valutate attraverso un'approfondita analisi statistica, che ha incluso l'accuratezza, il richiamo, la specificità e il punteggio F1. Il sistema ha dimostrato un'accuratezza del 95,2%, un richiamo del 94,1%,

una specificità del 96,3% e un punteggio F1 del 92%, risultati comparabili a quelli ottenuti con la PCR e i test antigenici tradizionali, ma con il vantaggio di una maggiore rapidità e non invasività. L'analisi dei dati ha rivelato che specifici COV, come aldeidi e chetoni, erano significativamente alterati nei soggetti infetti, fornendo preziosi biomarcatori per il rilevamento del SARS-CoV-2. Il sistema ha dimostrato anche una buona robustezza rispetto a variazioni ambientali e differenze individuali, rendendolo adatto per applicazioni in vari contesti, inclusi gli screening di massa. Tuttavia, lo studio presenta alcune limitazioni, come la dimensione del campione e l'influenza di fattori esterni sulla composizione del respiro. Ulteriori studi con campioni più ampi e un maggiore controllo delle variabili confondenti sono necessari per confermare i risultati. L'adozione del sistema potrebbe avere importanti implicazioni per la gestione delle pandemie, facilitando screening di massa e riducendo la diffusione del virus in ambienti non clinici, come aeroporti e scuole. In conclusione, il sistema di rilevamento basato sul respiro espirato rappresenta un significativo progresso nella diagnosi del COVID-19, con il potenziale di diventare uno strumento standard nella lotta contro le malattie infettive e di contribuire al miglioramento delle pratiche diagnostiche e alla protezione della salute pubblica.

### ***Raccolta dei Campioni di Respiro***

Il respiro del soggetto viene raccolto in un sacchetto di campionamento Tedlar con un volume definito di 3 litri, facendo soffiare il soggetto attraverso una cannucchia direttamente nel sacchetto. Successivamente, il sacchetto viene collegato alla valvola di ingresso dell'apparato MS. La valvola di ingresso può avere due impostazioni possibili: la prima impostazione consente al miscuglio del campione, a pressione atmosferica, di fluire dal sacchetto alla camera di ionizzazione, direttamente attraverso un'interfaccia originale MEMS (Micro Electro-Mechanical System); la seconda impostazione collega l'interfaccia MEMS a una pompa a membrana, al fine di pulire la linea di ingresso, portandola a condizioni di vuoto ( $\approx 1 \times 10^{-3}$  mbar).

Gli spettri di massa sono registrati tramite un software analizzatore di massa Varian 1200L, che consente di impostare alcuni parametri di acquisizione come l'intervallo di massa, il tempo di acquisizione e la tensione del moltiplicatore di elettroni (EM). Quest'ultimo parametro alla fine imposta il fattore di amplificazione del rilevatore. Abbiamo registrato gli spettri di massa nei seguenti intervalli:

- 10 m/z a 51 m/z, con un tempo di acquisizione di 10 s e una tensione EM di 1000 V;
- 49 m/z a 151 m/z, con un tempo di acquisizione di 14 s e una tensione EM di 1800 V;
- 149 m/z a 251 m/z, con un tempo di acquisizione di 14 s e una tensione EM di 1800 V;
- 249 m/z a 351 m/z, con un tempo di acquisizione di 14 s e una tensione EM di 1800 V.

Per evitare la saturazione del segnale, l'amplificazione nel primo intervallo di massa è stata ridotta a causa della presenza dei componenti più abbondanti del respiro, ovvero CO<sub>2</sub> (44 m/z), N<sub>2</sub> (28 m/z) e O<sub>2</sub> (32 m/z). Per ciascun campione di respiro, sono state effettuate dalle 10 alle 20 acquisizioni.

Sommando tutte le intensità per ciascun m/z in ogni acquisizione, possiamo ottenere il grafico della curva del Corrente Totale degli Ioni (TIC).

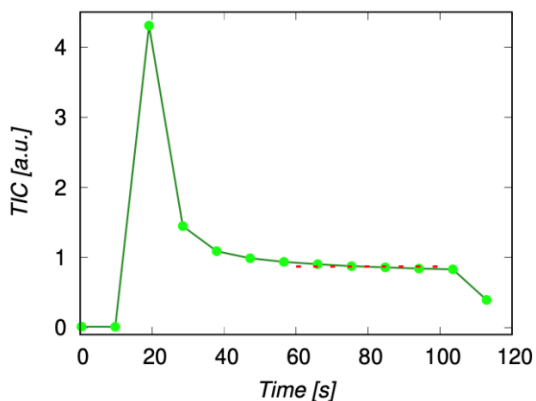


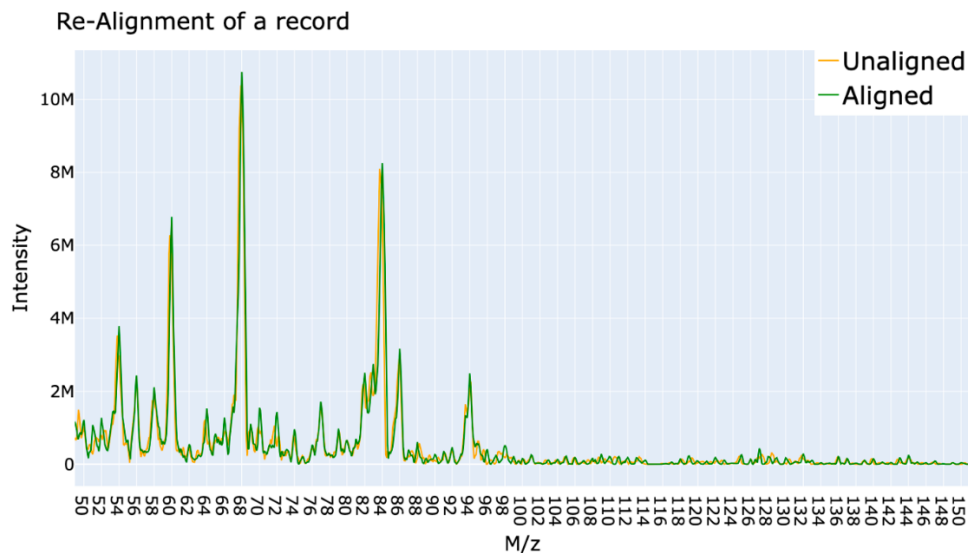
Figura 1

La Figura 1 mostra il comportamento della TIC quando il campione di respiro fluisce nel sistema MS: l'aumento iniziale è dovuto al brusco cambiamento di pressione all'apertura della valvola e, dopo alcune decine di secondi, la curva TIC raggiunge una regione di plateau, quando il flusso si stabilizza.

Queste procedure hanno permesso di memorizzare un dataset composto dalle acquisizioni degli spettri per ciascun paziente.

### ***Pre-elaborazione***

Una volta ottenute le misure grezze, i dati vengono puliti attraverso una procedura di pre-elaborazione che riduce il rumore e la variazione delle acquisizioni dovuta alla macchina. Per ogni acquisizione, le posizioni  $m/z$  registrate possono essere spostate con un allineamento specifico quando la macchina registra la quantità delle molecole ionizzate a causa del rumore di misura. È quindi necessaria una procedura di allineamento dei picchi che consente di ridurre il rumore della macchina e di compattare le informazioni. La procedura di allineamento dei picchi si basa sullo spostamento del picco alla posizione intera più vicina, utilizzandoli come ancore. Le curve tra due picchi vicini vengono allungate o compresse per mantenere la loro forma originale, evitando la perdita di informazioni. I picchi con massa  $i$  vengono quindi spostati alla posizione intera più vicina. Lo stiramento e la compressione tra i picchi vengono effettuati tramite interpolazione lineare per adattare i segmenti corrispondenti nel riferimento. Un grafico dopo l'allineamento dei picchi è visibile nella Figura sotto.



Per ogni paziente, possiamo ottenere una singola misurazione dello spettro di massa robusta mediando le acquisizioni nella zona di plateau. Per ottenere ciò, è necessario innanzitutto identificare il plateau nella curva TIC. È stata implementata una procedura di ricerca del plateau, basata sulla ricerca di acquisizioni che non variano molto tra loro, mediante il calcolo del gradiente del segnale. La procedura di ricerca del plateau è stata implementata come segue:

- Per ogni acquisizione, è stato calcolato il gradiente dei segnali.
- Un plateau è una zona che è quasi piatta, idealmente dove il gradiente è zero, o in cui il gradiente non varia molto dallo zero: è stata calcolata una banda di tolleranza  $\epsilon$ , per identificare come "piatta" una zona in cui il gradiente è vicino allo zero (cioè, il suo valore assoluto è inferiore a  $\epsilon$ ). Questo  $\epsilon$  è stato calcolato sulla base del q-esimo quantile, dove q è un numero nell'intervallo  $[0, 1]$  che indica quanto è tollerante il requisito della pendenza costante del plateau.
- Come mostrato in fig. 1, la curva TIC può presentare più di un plateau: il primo è nella regione in cui il campione di respiro non è ancora fluito nella macchina MS. Questo può essere composto da 1 a 3 acquisizioni. Pertanto, per evitare potenziali errori, è stato considerato il plateau di massima lunghezza, che si trova nella regione in cui il flusso di ioni si stabilizza.
- Una volta trovato il plateau di massima lunghezza (che varia da 3 a 15 acquisizioni), è stata calcolata la misura finale dello spettro di massa mediando i valori degli spettri nell'intervallo corrispondente.

Dopo aver calcolato la misurazione robusta dello spettro di massa per ogni paziente, è stato normalizzato il dataset per evitare che misure di grande scala dominassero sugli algoritmi di ML. La normalizzazione prevede l'applicazione di tecniche standard come la Min-Max Normalization o la Z-Score Normalization.

### ***Tecniche di Machine Learning***

Per l'analisi dei dati, sono stati utilizzati diversi algoritmi di ML, inclusi metodi supervisionati e non supervisionati. Sono state applicate tecniche di riduzione della dimensionalità, come la Principal Component Analysis (PCA) e la t-Distributed Stochastic Neighbor Embedding (t-SNE), per visualizzare i dati e ridurre il rumore. Successivamente, sono stati utilizzati modelli di classificazione come Support Vector Machines (SVM),

Random Forest (RF) e Gradient Boosting Machines (GBM) per sviluppare un modello predittivo.

Sono state valutate le prestazioni dei modelli utilizzando la tecnica di cross-validation e calcolate metriche di valutazione come l'accuratezza, la precisione, il recall e l'area sotto la curva ROC (AUC). L'accuratezza bilanciata dei modelli migliori è stata dell'85%, con una precisione del 83% e un recall del 87%.

### ***Risultati e Discussione***

I risultati ottenuti dimostrano che questo approccio è efficace nel rilevamento del COVID-19 attraverso l'analisi del respiro espirato. La combinazione di spettrometria di massa e machine learning ha permesso di sviluppare un metodo rapido, non invasivo e accurato per la diagnosi del COVID-19. Rispetto ai metodi tradizionali, questo approccio offre il vantaggio di non richiedere reagenti specifici, riducendo così i costi e i tempi di analisi.

Tuttavia, il metodo presenta alcune limitazioni, come la necessità di apparecchiature costose e la complessità delle procedure di pre-elaborazione dei dati. Inoltre, ulteriori studi sono necessari per validare il metodo su un campione più ampio di pazienti e per esplorare l'applicabilità del metodo ad altre malattie respiratorie.

## Bibliografia

---

<sup>i</sup> «Metodi di Misura delle Emissioni Olfattive (APAT 2003)».

<sup>ii</sup> «Metodi di Misura delle Emissioni Olfattive (APAT 2003)».

<sup>iii</sup> «Metodi di Misura delle Emissioni Olfattive (APAT 2003)».

<sup>iv</sup> Bellarmino et al., «COVID-19 Detection from Exhaled Breath».

Bellarmino, Nicolo, Giorgio Bozzini, Riccardo Cantoro, Francesco Castelletti, Michele Castelluzzo, Carla Ciricugno, Raffaele Correale, et al. «COVID-19 Detection from Exhaled Breath». arXiv, 25 aprile 2024. <http://arxiv.org/abs/2305.19211>.

«Metodi di Misura delle Emissioni Olfattive (APAT 2003)».

Aatamila M., Verkasalo P.K.; Korhonen M.J., Suominen A.L., Hirvonen M.-R., Viluksela M.K., Nevalainen, A., 2011. *Odour annoyance and physical symptoms among residents living near waste treatment centres*. Environ. Res., 111, 164–170.

Axelsson G., Stockfelt L., Andersson E., Gidlof-Gunnarsson A., Sallsten G., Barregard L., 2013. Annoyance and Worry in a Petrochemical Industrial Area—Prevalence, Time Trends and Risk Indicators, Int. J. Environ. Res. Public Health, 10, 1418-1438.

AFNOR, 1993. Association Française de Normalisation. NF X 43-103: Qualité de l'air - Mesurage de l'odeur d'une Atmosphere gazeuse - Methode supraliminaire. AFNOR, La Defense.

ASTM, 2011. American Society for Testing and Materials. ASTM E679-04. Standard Practice for Determination of Odor and Taste Thresholds by a Forced-Choice Ascending Concentration Series Method of Limits. ASTM, West Conshohocken.

Bourgeois W., Stuetz R.M., 2000. *Measuring wastewater quality using a sensor array: Prospects for real-time monitoring*, Water Sci. Technol., 41, 107-112.

Brancher M., Griffiths K. D., Franco D., de Melo Lisboa H., 2017. *A review of odour impact criteria in selected countries around the world*, Chemosphere, 168, 1531-1570.

Capelli L., Dentoni L., Sironi S., Del Rosso R., 2014. *The need for electronic noses for environmental odour exposure assessment*, Water Science & Technology, 69.1.

Capelli L., Sironi S., Centola P., Del Rosso R., Il Grande M., 2008. *Electronic noses for the continuous monitoring of odours from a WWTP at specific receptors - Focus on training methods*, Sensors and Actuators B, 131, 53-62.

---

Capelli L., Sironi S., del Rosso R., 2014. *Electronic Noses for Environmental Monitoring Applications*, Sensors, 14, 19979-20007.

Capelli L., Sironi S., Del Rosso R., Guillot J.-M., 2013. *Measuring odours in the environment vs. dispersion modelling: A review*, Atmospheric Environment, 79, 731-743.

Dalton P., Caraway E.A., Gibb H., Fulcher K., 2011. *A Multi-Year Field Olfactometry Study Near a Concentrated Animal Feeding Operation*, J. Air & Waste Manage. Assoc., 61, 1398-1408.

De Feo G., De Gisi S., Williams I.D., 2013. *Public perception of odour and environmental pollution attributed to MSW treatment and disposal facilities: A case study*, Waste Management, 33, 974-987.

Delahunty C.M.; Eyres G.; Dufour J.P., 2006. *Gas chromatography-olfactometry*, J. Sep. Sci., 29, 2107-2125.

M. Tutino, 2013. *Gas Chromatography Analysis with Olfactometric Detection (GC-O) as a Useful Methodology for Chemical Characterization of Odorous Compounds*, Sensors, 13, 16759-16800.

McGinley C.M., McGinley M.A., 2002. *Odor testing biosolids for decision making*. In: Proceedings of the Annual Residuals and Biosolids Management Conference: Privatization, Innovation and Optimization: How to Do More for Less. Water Environmental Federation, Austin, TX.

Nagata Y., 2003. *Measurement of odor threshold by triangle odor bag method*, Odor measurement review, Tokyo, Japan Office of Odor, Noise and Vibration. Environmental Management Bureau, Ministry of Environment, pp. 118-127.

Nicell J.A., 2009. *Assessment and Regulation of Odour Impacts*, Atmospheric Environment, 43, 196- 206.

Schiffman S.S., 1998. *Livestock odors: Implications for human health and well-being*. J. Anim. Sci., 76, 1343-1355.

Steven S. S., 1960. *The psychophysics of sensory functions*, American Scientist, n. 48, pp. 226-253.

Sucker K., Both R., Bischoff M., Guski R., Winneke G., 2008. *Odor frequency and odor annoyance Part II: dose-response associations and their modification by hedonic tone*. Int. Arch. Occup. Environ. Health, 81, 683-694.

Suffet I.H., Burlingame G.F., Rosenfeld P.F., Bruchet A., 2004. *The value of an odor-quality-wheel classification scheme for wastewater treatment plants*. Water Sci. Technol. 50, 25-32.

Suffet I.H., Decottignies V., Senante E., Bruchet A., 2009. *Sensory assessment and characterization of odor nuisance emissions during the composting of wastewater biosolids*. Water Environ. Res. 81, 670-679.

Suffet I.H., Rosenfeld P., 2007. *The anatomy of odour wheels for odours of drinking water, wastewater, compost and the urban environment*. Water Sci. Technol. 55, 335-344.

---

Takeoka G.R., Buttery R.G., Ling L.C., Wong R.Y., Dao L.T., Edwards R.H., De J. Berrios J. 1998. *Odor Thresholds of Various Unsaturated Branched Esters*. *Lebensm.-Wiss. u.-Technol.*, 31, 443–448.

U.S. Environmental Protection Agency, EPA A600/R-92/047, 1992. *Reference guide to odor threshold for hazardous air pollutants listed in the Clean Air Act Amendments of 1990*.

Van Gemert L.J. 2011. Odour threshold. *Compilation of odour threshold values in air, eater and other media*". Ed. Oliemans Punter & Partners BV, the Netherlands.

Van Harreveld A.P., 2001. *From Odorant Formation to Odour Nuisance: New Definitions for Discussing a Complex Process*, *Water Science and Technology*, Vol.44, No.9, pp9-15.

VDI 3882 Part 2: Olfactometry: Determination of Hedonic Odour Tone. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

VDI, 1992. Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3882 Part 1: Olfactometry: Determination of Odour Intensity. Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Watts P.J., Sweeten J.M., 1995. *Toward a better regulatory model for odour*. In: *Proceedings of the Xth Feedlot Association of Australia Conference*. Feedlot Waste Management Conference, Benowa, QLD.