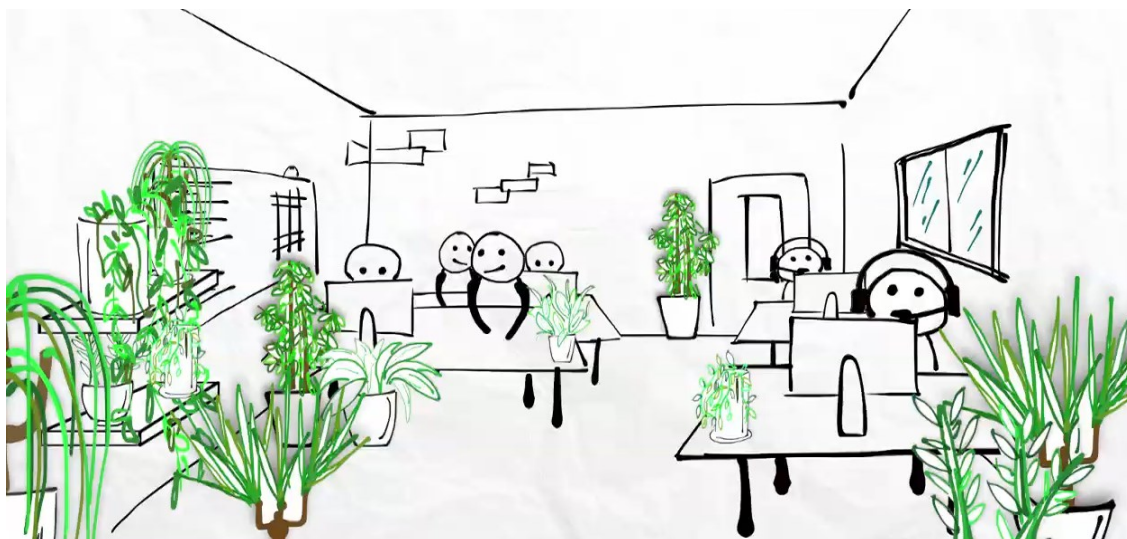




Région Autonome
Vallée d'Aoste



PROGETTO SPERIMENTALE SULLA FITODEPURAZIONE DELL'ARIA INDOOR



REPORT FINALE

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Hanno collaborato alla realizzazione del progetto:

Devis Panont, Sara Pittavino, Annie Rollandin (ARPA Valle d'Aosta)

Laurent Blanc (consulente libero professionista)

Guido Lingua (Università del Piemonte Orientale - Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica)

Elisabetta Carraro (Dipartimento di Scienze della Sanità Pubblica e Pediatriche dell'Università degli Studi di Torino)



Sommario

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUZIONE..... | 4 |
| 2. LA QUALITA' DELL'ARIA INDOOR | 6 |
| 3. GLI EFFETTI SULLA SALUTE UMANA..... | 9 |
| 4. LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO | 11 |
| 5. AGENTI INQUINANTI DELL'ARIA INDOOR | 13 |
| 5.1. Principali inquinanti chimici dell'aria indoor | 16 |
| 5.2. Composti Organici Volatili | 23 |
| 6. LE FONTI DI EMISSIONE | 33 |
| 7. LA VENTILAZIONE DEGLI AMBIENTI CONFINATI..... | 34 |
| 8. PIANTE E FITODEPURAZIONE | 37 |
| 9. LO STUDIO SPERIMENTALE | 40 |
| 9.1. Obiettivi e strategie adottate | 40 |
| 9.2. Metodi di campionamento e misura | 43 |
| 9.2.1. Misure con campionatori passivi di tipo diffusivo..... | 43 |
| 9.2.2. Misure con rilevatori PID portatili..... | 46 |
| 9.3. Piante utilizzate per la sperimentazione | 47 |
| 9.4. Accordi con enti universitari | 48 |
| 10. RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE..... | 48 |
| 10.1. Ambiente indoor industriale – area produttiva e ufficio | 48 |
| 10.1.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor | 48 |
| 10.1.2. Fonti di emissione outdoor..... | 50 |
| 10.1.3. Fonti di emissione indoor..... | 50 |
| 10.1.4. Frequentazione | 52 |
| 10.1.5. Aerazione | 52 |
| 10.1.6. Risultati dell'indagine conoscitiva preliminare | 53 |
| 10.1.7. Risultati delle prove sperimentali condotte nell'area produttiva | 59 |
| 10.1.8. Risultati delle prove sperimentali condotte nell'ufficio adiacente all'area produttiva .. | 62 |
| 10.2. Gabbiotto di una stazione di rifornimento carburante | 66 |
| 10.2.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor | 66 |
| 10.2.2. Fonti di emissione outdoor..... | 66 |
| 10.2.3. Fonti di emissione indoor..... | 66 |
| 10.2.4. Frequentazione | 67 |
| 10.2.5. Aerazione | 67 |
| 10.2.6. Risultati dell'indagine conoscitiva preliminare | 67 |
| 10.2.7. Risultati delle prove sperimentali | 69 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Regione Autonoma
Valle d'Aosta



| | |
|---|-----|
| 10.3. Salone di un parrucchiere | 71 |
| 10.3.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor | 71 |
| 10.3.2. Fonti di emissione outdoor | 71 |
| 10.3.3. Fonti di emissione indoor | 71 |
| 10.3.4. Frequentazione | 71 |
| 10.3.5. Aerazione | 71 |
| 10.3.6. Risultati dell'indagine conoscitiva | 71 |
| 10.4. Scuola dell'infanzia di nuova costruzione | 74 |
| 10.4.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor | 74 |
| 10.4.2. Fonti di emissione outdoor | 74 |
| 10.4.3. Fonti di emissione indoor | 75 |
| 10.4.4. Frequentazione | 75 |
| 10.4.5. Aerazione | 75 |
| 10.4.6. Risultati dell'indagine conoscitiva | 76 |
| 10.5. Confronto tra i valori misurati nei diversi ambienti indoor e nell'aria esterna | 79 |
| 11. CONCLUSIONI | 83 |
| 12. TABELLE DEI RISULTATI | 85 |
| AREA PRODUTTIVA | 85 |
| UFFICIO ADIACENTE ALL'AREA PRODUTTIVA | 91 |
| GABBIOTTO DELLA STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE | 94 |
| SALONE DI UN PARRUCCHIERE | 100 |
| SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE | 101 |
| BIBLIOGRAFIA | 103 |



1. INTRODUZIONE

Gli individui che vivono al giorno d'oggi alle nostre latitudini trascorrono, nella maggior parte dei casi, oltre il 90% della propria giornata in un ambiente confinato.

Un'indagine condotta a livello europeo (Künzli et al., 1997) rivela che nei centri urbani la popolazione trascorre in media il 95-97% del tempo negli ambienti confinati, il 2,4% nei mezzi di trasporto e l'1% nell'ambiente esterno (outdoor).

L'esposizione all'inquinamento dell'aria indoor è pertanto preponderante rispetto a quello outdoor, nonostante l'opinione pubblica abbia una sensibilità e un'informazione maggiore rispetto alle problematiche collegate all'inquinamento ambientale inteso come "ambiente outdoor".

L'inquinamento dell'aria indoor è particolarmente insidioso, essendo meno percepibile rispetto all'inquinamento dell'aria esterna in quanto generalmente non si manifesta visivamente e le concentrazioni degli inquinanti sono spesso inferiori alle soglie olfattive.

La qualità dell'aria negli ambienti indoor (*Indoor Air Quality – IAQ*) è influenzata direttamente dalla qualità dell'aria esterna, alla quale si aggiungono le diverse fonti di inquinamento interne. Questo implica che, generalmente, negli ambienti confinati l'aria è più inquinata che all'esterno.

Negli edifici moderni, costruiti secondo i principi dell'efficienza energetica, il tasso di ricambio dell'aria interna è molto inferiore rispetto al passato, comportando un conseguente accumulo degli inquinanti e un peggioramento dell'IAQ.

Gli effetti dell'inquinamento dell'aria indoor sulla salute umana sono universalmente riconosciuti e si presentano sempre più frequentemente, colpendo soprattutto i soggetti più sensibili come i bambini e gli anziani, con sintomi che coinvolgono prevalentemente l'apparato respiratorio (asma, allergie, irritazione delle mucose...).

Oltre a tali effetti vengono riconosciute altre patologie legate all'inquinamento indoor, tra cui la cosiddetta Sick Building Syndrome, che si manifesta con sintomi non specifici ma ripetitivi e non correlati ad un agente particolare. Tali sintomi coinvolgono più frequentemente soggetti che lavorano in ufficio, scompaiono o comunque si attenuano all'uscita dai locali e non sono accompagnati da reperti obiettivi rilevanti.

È stato inoltre dimostrato che l'IAQ può avere una forte influenza sul sistema nervoso centrale delle persone. Un recente studio condotto negli Stati Uniti presso un centro di ricerca specializzato dimostra una forte influenza dei livelli di COV (composti organici volatili) e di CO₂ nell'aria indoor degli uffici sulle capacità cognitive e decisionali dei lavoratori (Allen et al, 2015).

Per garantire una buona qualità dell'aria indoor occorre prima di tutto eliminare le fonti di inquinamento interne (es. fumo di sigaretta, materiali di costruzione/arredo che rilasciano COV) e,

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



in secondo luogo, provvedere a un opportuno ricambio dell'aria, anche con l'impiego di sistemi di ventilazione meccanizzata.

L'importanza del ricambio dell'aria degli ambienti confinati mediante la semplice apertura periodica delle finestre viene generalmente sottovalutata e comunque attuato più raramente durante la stagione fredda, per via della bassa temperatura dell'aria esterna. Questo aspetto è più critico nei territori di montagna, nei quali la stagione fredda dura più a lungo.

Tra le diverse azioni utili al miglioramento dell'IAQ desta interesse l'impiego delle piante. Diversi studi sperimentali hanno dimostrato la capacità da parte di alcune piante di arredo di rimuovere gli inquinanti gassosi (COV in particolare) dall'aria indoor. In genere si tratta di studi condotti in condizioni controllate di laboratorio, con utilizzo ad esempio di camere chiuse dotate di sistemi per l'iniezione di sostanze inquinanti in dosi definite.

A differenza di quanto fatto in questi studi, nel presente progetto sperimentale l'applicabilità della fitodepurazione dell'aria è stata testata in contesti reali. Le prove sperimentali sono state condotte in ambienti indoor connessi ad attività lavorative che comportano la presenza di sorgenti di emissione di COV, verificando l'applicabilità della fitodepurazione in relazione ad una serie di inevitabili fattori contingenti quali le caratteristiche delle fonti di emissione (che nelle realtà sono variabili e discontinue), le dimensioni dei locali, le comuni pratiche di ventilazione dei locali, le attività svolte correntemente all'interno degli stessi, la logistica di alloggiamento delle piante.

In tale contesto, gli obiettivi del presente progetto sperimentale sono:

- condurre misure conoscitive del livello di inquinamento di ambienti indoor lavorativi interessati dalla presenza di sostanze organiche volatili (COV);
- sperimentare l'utilizzo di piante da arredo per la depurazione dell'aria in contesti reali;
- verificare l'efficacia della fitodepurazione dell'aria di ambienti indoor caratterizzati dalla presenza di COV.



2. LA QUALITA' DELL'ARIA INDOOR

Per ambienti indoor si intendono gli ambienti confinati di vita e di lavoro non industriali, in particolare quelli adibiti a dimora, svago, lavoro e trasporto¹.

Secondo questo criterio, l'ambiente indoor comprende, dunque:

- le abitazioni
- gli uffici pubblici e privati;
- le strutture comunitarie (ospedali, scuole, caserme, alberghi, banche, etc.);
- locali destinati ad attività ricreative e/o sociali (cinema, bar, ristoranti, negozi, strutture sportive, etc.);
- mezzi di trasporto pubblici e/o privati (auto, treno, aereo, nave, etc.).

La popolazione trascorre gran parte del proprio tempo in questi ambienti subendo un prolungato contatto con le potenziali sorgenti di inquinamento.

Secondo una ricerca condotta nel 1998 su un campione di popolazione di Milano, nei giorni feriali la popolazione impiegata in ufficio trascorre in media il 59% del tempo a casa, il 35% in ufficio ed il 6 % nei tragitti casa-ufficio². Per alcuni gruppi di persone come bambini, anziani, e malati la percentuale di tempo trascorsa in casa è ancora più alta.

Un altro studio del 1998, condotto nel Delta del Po ha dimostrato che le persone trascorrono l'84% del loro tempo giornaliero all'interno di ambienti confinati (di cui il 64% in casa), il 3,6% in transito e solo il 12% all'aperto³.

Questi studi hanno documentato profondi cambiamenti sia qualitativi che quantitativi dell'aria indoor, con un progressivo aumento in assoluto delle sostanze inquinanti e dei relativi livelli nell'aria. Questo fenomeno è collegato alla necessità di contenere i consumi per il riscaldamento e per il condizionamento che ha imposto nuovi criteri tecnico-progettuali per gli edifici ad uso civile al fine di garantire un migliore isolamento termico degli edifici e una migliore sigillatura degli ambienti interni rendendo gli edifici più ermetici e riducendo il tasso di ventilazione naturale dovuto a infiltrazione di aria

Nelle abitazioni residenziali il tipico fattore di ricambio d'aria è passato da 1 Vol/h per gli edifici costruiti negli anni '70 a circa 0,5 Vol/h⁴ sino a valori decisamente più bassi, addirittura 0,1 Vol/h per gli edifici di nuova generazione a bassissimo consumo energetico⁵. Se dal punto di vista

¹ Accordo del 27/09/2001 tra il Ministero della salute, le regioni e le province autonome

² Carrer et al., 2000

³ Simoni et al., 1998

⁴ Chan et al. 2003; Hodgson et al. 2000; ASHRAE 2013

⁵ Allen et al. 2012; ASHRAE 2013

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



energetico questo modello costruttivo ha notevoli vantaggi, dal punto di vista della qualità dell'aria interna può condurre a molteplici problematiche come l'aumento della concentrazione di inquinanti. Le trasformazioni strutturali degli edifici sono state accompagnate anche da modifiche rilevanti dei materiali utilizzati per gli arredi e i rivestimenti, con utilizzo sempre più diffuso di materiali sintetici in grado di rilasciare sostanze aeriformi nel tempo.

Spesso anche materiali considerati ecologici e sostenibili, utilizzati nella "bioedilizia", come rivestimenti in legno e pannelli isolanti in fibre naturali sono sorgenti di sostanze inquinanti quali COV, formaldeide o benzene. Nelle valutazioni di impatto sulla IAQ i materiali devono essere visti come parte di un sistema e non come singolo materiale: ad esempio anche un cappotto in fibra di legno può avere indirettamente un impatto negativo poiché le colle utilizzate per il fissaggio dei pannelli spesso sono sorgenti di COV. Le nuove tecniche costruttive basate sull'efficienza energetica hanno portato alla nascita di numerosi nuovi materiali e nella maggior parte dei casi gli addetti ai lavori non considerano o non conoscono gli impatti negativi che possono avere i materiali da costruzione sulla qualità dell'aria negli ambienti confinati.

Tali diversi fattori hanno portato ad un progressivo peggioramento della qualità dell'aria indoor negli ultimi anni.

A fronte di questo fenomeno non ha fatto riscontro un aumento della sensibilità verso questa problematica, mentre è cresciuta notevolmente la preoccupazione nei confronti dell'inquinamento dell'aria ambiente esterna.

La normativa sulla qualità dell'aria esterna (Dlgs 155/2010) è ormai consolidata e garantisce il perseguimento della tutela della qualità dell'aria attraverso la messa in atto di piani e programmi contenenti una serie di misure atte alla riduzione delle emissioni a livello locale, nazionale e comunitario. Le azioni di contenimento sono riferite a fonti di emissione conosciute e comuni a tutte le realtà territoriali (traffico, riscaldamento, industrie). I monitoraggi vengono condotti mediante stazioni di misura dislocate in ambiente esterno e sono pianificati in relazione alla presenza delle fonti di emissione sul territorio.

Allo stesso modo la normativa sull'igiene del lavoro (Dlgs 81/2008) garantisce la tutela della salute dei lavoratori rispetto all'esposizione ad alcuni inquinanti specifici legati all'attività lavorativa svolta. Prevede misure di contenimento delle fonti di emissione presenti all'interno dell'ambiente lavorativo attraverso sistemi di captazione o di confinamento e in secondo luogo l'adozione di dispositivi di protezione individuale atti a proteggere il sistema respiratorio. Prevede inoltre il rispetto di valori soglia su breve e lungo periodo per prevenire l'insorgere di effetti acuti e cronici conosciuti legati all'esposizione a determinate sostanze. I monitoraggi in questo caso sono effettuati con campionamenti personali sui lavoratori pianificati in relazione a mansioni ed attività lavorative svolte.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



La normativa sulla qualità dell'aria indoor è invece ancora in divenire e di fatto non costituisce ancora un ambito chiaramente regolamentato.

L'aria indoor costituisce una sorta di zona grigia compresa tra i due diversi ambiti dell'aria esterna e dell'aria interna degli ambienti di lavoro. Gli ambienti indoor sono caratterizzati dalla presenza sia da fonti di inquinamento esterne che da fonti interne all'ambiente stesso.

Le fonti esterne possono essere molto particolari e variegata, quali ad esempio la presenza nelle vicinanze di piccole attività produttive (es. falegnamerie, verniciature, cucine, benzinai) o di cantieri (es. piccoli lavori di edilizia) oppure legati al vicinato (es. utilizzo di solventi per hobbistica, utilizzo di attrezzature a motore): si tratta di un elenco molto stringato ma la casistica è vastissima.

Le fonti interne possono essere di diversa tipologia (es. materiali costruttivi, arredamenti, apparecchi di combustione, prodotti di pulizia) e non sempre sono definite o chiaramente individuabili. Gli inquinanti che possono essere presenti in ambiente indoor sono molto più numerosi ed eterogenei rispetto a quelli normalmente monitorati in aria esterna e negli ambienti di lavoro. Se in tali ambiti l'attenzione è rivolta agli effetti provocati dai singoli inquinanti, nel caso dell'aria indoor sono invece di interesse gli effetti provocati da miscele di inquinanti che in genere, pur essendo presenti singolarmente in concentrazioni inferiori alle soglie di rischio previste rispettivamente dalle normative di qualità dell'aria esterna e degli ambienti di lavoro, provocano effetti osservati sulla salute e sul benessere delle persone difficilmente riconducibili ad un meccanismo di causa-effetto se non per il tempo di permanenza nell'ambiente indoor inquinato.

Gli ambienti indoor sono caratterizzati generalmente da livelli di inquinamento inferiori di alcuni ordini di grandezza rispetto alle soglie di rischio previste per la protezione dei lavoratori. La valutazione della qualità dell'aria indoor viene condotta facendo generalmente riferimento agli stessi valori soglia previsti per la qualità dell'aria esterna. Per alcuni inquinanti specifici non normati in qualità dell'aria esterna è possibile fare riferimento alle soglie indicate nelle linee guida pubblicate dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO, 2001).

La qualità dell'aria indoor comporta effetti sulla salute umana che in molti casi possono essere comuni rispetto a quelli connessi alla qualità dell'aria esterna e all'esposizione negli ambienti di lavoro. Tuttavia, nella maggior parte dei casi, la qualità dell'aria interna è connessa ad effetti di eziologia non definita e sintomatologia non specifica (es. Sick Building Syndrome), che hanno effetti non gravi sulla salute umana ma provocano conseguenze concrete sulla qualità professionale dei lavoratori che si manifestano con diminuzione della capacità di attenzione e di decisione. Allo stesso modo sono di interesse gli ambienti scolastici e la relativa capacità di attenzione e apprendimento dei bambini, soggetti particolarmente sensibili alle condizioni degli ambienti in cui vivono. Tali aspetti fanno parte dello stato di benessere delle persone, obiettivo da perseguire una volta garantita la protezione da effetti negativi sulla salute umana. Vivere in



maniera più confortevole significa anche poter respirare un'aria il più pulita possibile per la maggior parte del tempo di vita.

3. GLI EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

Gli effetti sulla salute umana dell'inquinamento dell'aria indoor sono solo parzialmente conosciuti e sono ancora in fase di studio. I problemi di salute legati alla IAQ possono manifestarsi attraverso diversi sintomi che la maggior parte delle volte sono difficilmente ricollegabili ai singoli inquinanti. I sintomi maggiormente riscontrabili sono irritazione della pelle, delle mucose o del tratto respiratorio, allergie, infiammazioni, infezioni fino ad arrivare a problemi cardiovascolari o neurologici e a intossicazioni mortali o invalidanti⁶.

Questi sintomi, le cui cause specifiche spesso non sono individuabili ma collegabili solamente al tempo trascorso da un individuo all'interno di un edificio, possono essere identificati come "*sindrome dell'edificio malato*" (dall'inglese "*Sick building syndrome*")

Una classificazione completa dei sintomi collegabili a un cattiva qualità dell'aria interna è stata proposta da J. Malchaire nel 2001⁷:

| CATEGORIE DI SINTOMI | COMPOSTI PRINCIPALI |
|--|---|
| MUCOSE E VIE RESPIRATORIE SUPERIORI | Irritazione, secchezza degli occhi, del naso e della gola |
| | Prurito e bruciore agli occhi, lacrimazione, congestione nasale |
| | Tosse, starnuti, epistassi |
| | Raucedine e afonia |
| APPARATO RESPIRATORIO PROFONDO | Oppressione toracica, asma |
| PELLE | Secchezza della pelle |

⁶ Institut de Veille Sanitaire, Gestion de la qualité de l'air intérieur, 2010.

⁷ Malchaire J, Chasseur C, Nolard N. *Sick building syndrome : analyse et prévention (2e édition)*. Bruxelles: Institut national de recherche sur les conditions de travail; 2001.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | |
|---------------------------------|--|
| | Eruzioni cutanee |
| SISTEMA NERVOSO CENTRALE | Fatica, difficoltà di concentrazione, sonnolenza |
| | Mal di testa |
| | Stordimento, vertigini, nausea |

La presenza di inquinanti non comporta necessariamente la comparsa di sintomi e patologie, ma l'influenza che essi hanno dipendono da diversi fattori, tra cui:

- la tipologia di inquinanti;
- la concentrazione dell'inquinante;
- il tempo di esposizione dell'individuo al determinato inquinante;
- la sensibilità dell'individuo esposto.

Particolarmente importante è il tempo di esposizione, in quanto gli effetti sulla salute possono cambiare notevolmente in base al periodo di permanenza dell'individuo in presenza delle sostanze inquinanti. Il tempo di esposizione può essere suddiviso in 2 macro-categorie: esposizione di breve durata (da qualche ora sino a alcune settimane) e di lunga durata (più di un anno).

Naturalmente i sintomi conseguenti alle esposizioni di breve durata, come irritazioni, allergie e cefalee hanno conseguenze decisamente minori di una lunga esposizione, la quale può portare a patologie dell'apparato respiratorio e cardiovascolare e in alcuni casi a malattie tumorali.

Una cattiva qualità dell'aria ambiente non solo può condurre ad effetti tangibili sulla salute, ma può essere anche causa indiretta dell'aumento dei costi e della diminuzione di produttività dovuti al manifestarsi delle patologie sopra descritte e il conseguente aumento dei giorni di malattia dei lavoratori⁸. Lo studio di Shendell et al⁹ ha documentato la correlazione tra le presenze a scuola degli alunni e la concentrazione di CO₂. Nei casi in cui la concentrazione di CO₂ era più elevata, a causa di una scarsa ventilazione, le assenze degli studenti erano maggiori del 10%-20% rispetto alle classi in cui i livelli di CO₂ erano più bassi. Un altro studio (Mendel et al, 2005) ha messo in luce i legami tra l'influenza della scarsa qualità dell'aria indoor nelle scuole e l'abbassamento delle performance degli studenti¹⁰.

⁸ Fisk WJ, & Rosenfeld AH. 1997. Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments.

⁹ Shendell et al 2004

¹⁰ Mendell M.J., Heath G.A. 2005. Do indoor pollutants and thermal comfort conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Inoltre il recente studio di J. Allen et al¹¹ ha dimostrato che le persone che lavorano in ambienti con bassi livelli di COV hanno migliori funzioni cognitive rispetto ai lavoratori impiegati in ambienti convenzionali. Alti livelli di COV comportano una diminuzione delle capacità intellettuali e decisionali. Si può quindi desumere che facendo particolare attenzione all'IAQ, diminuendo le sorgenti di inquinanti e attuando adeguati ricambi d'aria, si possano aumentare i livelli di attenzione, produttività e apprendimento dei lavoratori. Questo studio risulta essere quindi di particolare importanza, in quanto non focalizza più l'attenzione solo sul legame della qualità dell'aria indoor e gli aspetti prettamente sanitari come l'insorgenza di patologie, ma anche sulla produttività, modificando la sensibilità rispetto alle soglie di concentrazione degli inquinanti negli ambienti confinati. Se per garantire la salubrità degli ambienti ed evitare l'insorgere di problemi di salute è sufficiente mantenere una concentrazione di inquinanti inferiore ai livelli di soglia indicati delle varie organizzazioni come l'OMS, per migliorare le condizioni di confort, la produttività e le capacità cognitive degli occupanti è importante ridurre il più possibile la presenza di sostanze inquinanti. Pertanto è importante indagare ed intervenire non solo nelle situazioni in cui si manifestano problemi, ma in qualsiasi ambiente in cui i tempi di residenza degli occupanti sono significativi per ridurre al minimo i livelli delle sostanze nocive.

Il peso sociale dell'inquinamento degli ambienti confinati non si limita quindi solamente al disagio umano, alle malattie e al disconfort, ma si estende anche ai costi economici derivanti dal calo di produttività. Negli Stati Uniti i costi sanitari per le principali malattie da inquinamento indoor sono stimati essere superiori al miliardo di dollari all'anno (anni 1986-1987) e alcuni studi evidenziano che il calo di produttività derivato dall'inquinamento indoor determinano un costo annuale compreso tra i 4 e i 5 miliardi di dollari¹².

4. LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Pur non essendo prevista una normativa specifica a livello comunitario, alcuni stati dell'UE hanno introdotto nella propria legislazione norme specifiche per la qualità dell'aria indoor.

In particolare Francia, Belgio, Finlandia, Norvegia e Portogallo hanno stabilito dei valori guida per una serie di inquinanti nell'aria indoor. Altri Paesi come Germania, Austria, Paesi Bassi e Regno Unito hanno istituito dei gruppi di lavoro multidisciplinari con il compito specifico di elaborare valori guida per la qualità dell'aria indoor che sono utilizzati dagli organismi governativi di controllo, al fine di valutare l'influenza delle sorgenti e attivare le necessarie azioni di mitigazione.

¹¹ Allen J., MacNaughton P., Satish U., Santanam S., Vallarino J. and John D. Spengler J. 2015. Associations of Cognitive Function Scores with Carbon Dioxide, Ventilation, and Volatile Organic Compound Exposures in Office Workers: A Controlled Exposure Study of Green and Conventional Office Environments.

¹² Ministero della Sanità Dipartimento della Prevenzione. "La tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati".

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



In Italia è operativo un Gruppo di studio nazionale attivato dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS) al quale prendono parte diversi soggetti interessati quali il Ministero della Salute, istituti di ricerca, università e alcune ASL e ARPA regionali, che si occupa della redazione di documenti tecnici condivisi al fine di garantire una omogeneità a livello nazionale. Uno di questi documenti è il Rapporto Istisan 13/4 "Strategie di monitoraggio dei COV in ambiente indoor" che è stato preso a riferimento nel presente lavoro sperimentale.

A livello internazionale sono stati emanati diversi documenti di carattere tecnico-scientifico che riportano indicazioni in merito agli effetti sulla salute di alcuni inquinanti nell'IAQ.

Un riferimento importante è costituito dalle Linee Guida per la qualità dell'aria indoor pubblicate dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) pubblicate nel 2010¹³.

Un altro documento preso spesso a riferimento a livello europeo è il report finale del progetto INDEX (Critical Appraisal of the Setting and Implementation of Indoor exposure Limits in the EU) commissionato dall'UE e coordinato dal Joint Research Center (JRC) e pubblicato nel 2005.

In tali documenti vengono riportati, per alcune sostanze, dei valori guida per la qualità dell'aria indoor per consentire una valutazione scientifica uniforme.

Per valore guida l'OMS intende un valore di concentrazione nell'aria riferito ad un periodo temporale nel corso del quale, allo stato attuale delle conoscenze, non è atteso alcun effetto sulla popolazione in generale.

I valori guida possono essere riferiti a condizioni di esposizione acuta (da alcuni minuti a qualche giorno) o a condizioni di esposizione cronica (generalmente un anno solare) per via inalatoria.

Tale definizione è applicabile nel caso di sostanze per le quali è possibile definire una soglia di dose. Nel caso di sostanze senza soglia di dose (sostanze cancerogene e mutagene) i valori guida sono espressi in relazione alla soglia di rischio corrispondente ad una probabilità di insorgenza della patologia associata alla sostanza in esame.

Tra i paesi europei che hanno legiferato in materia spicca la Francia in cui il quadro normativo sull'IAQ risulta più sviluppato ed evoluto rispetto agli altri Paesi dell'UE.

In Francia i valori guida (VGAI - Valeurs guides de qualité de l'air intérieur) vengono stabiliti dall'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (ANSES)¹⁴. In relazione a tali valori, al fine di guidare gli enti pubblici nella messa in atto di azioni di miglioramento della qualità dell'aria indoor, l'Haut Conseil de la Santé Publique (HCSP) propone dei "valori di gestione", individuati a partire dai valori guida VGAI dell'ANSES con relative tempistiche consigliate per il raggiungimento degli stessi. I valori guida proposti dall'HCSP sono finalizzati a informare il gestore dell'ambiente indoor

¹³ WHO. *Guidelines for indoor air quality: selected pollutants*. Disponibile all'indirizzo: http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0009/128169/e94535.pdf

¹⁴ <https://www.anses.fr/fr/system/files/AIR2012sa0203.pdf>

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



interessato a proposito dei rischi associati ai livelli misurati di concentrazione di sostanze inquinanti tenendo conto anche di aspetti di carattere pratico, regolamentare, giuridico, economico e sociale.

L'HCSP individua le seguenti categorie di valori guida:

- valeur d'action rapide (VAR) – valore che suggerisce una azione rapida;
- valeur d'information et de recommandations (VIR) – valore che suggerisce di informare il gestore dell'ambiente indoor in merito allo stato delle cose;
- valeur repère (VR) – valore di riferimento, relativo alla situazione attuale;
- valeur cible (VC) – valore obiettivo da raggiungere e medio-lungo termine.

Ad esempio, nel caso della formaldeide, rispetto al valore guida di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ indicato dall'ANSES come obiettivo da perseguire a medio termine (entro 10 anni dal 2009), l'HCSP propone un valore di riferimento (valeur repère) di $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ giudicato più raggiungibile operativamente considerando i livelli di concentrazione osservati negli ambienti indoor in Francia. Oltre a tale valore, l'HCSP propone altri valori di riferimento utili a livello gestionale:

- un valore di azione rapida pari a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- un valore di informazione e raccomandazione pari a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$;
- un valore obiettivo di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Nella valutazione dei risultati del presente studio sperimentale, si è deciso di prendere a riferimento oltre ai valori guida indicati nelle Linee Guida dell'OMS anche quelli della normativa in vigore in Francia. A tale proposito nel paragrafo successivo sono descritti i principali inquinanti dell'aria indoor e per ognuno di essi viene compilata una scheda in cui vengono indicati i valori guida previsti dagli enti internazionali (OMS, progetto INDEX) e dagli enti competenti francesi (ANSES, HCSP).

5. AGENTI INQUINANTI DELL'ARIA INDOOR

Gli agenti inquinanti presenti all'interno degli ambienti confinati, ritenuti responsabili di provocare una diminuzione del confort ambientale e un rischio per la salute, sono molteplici e possono essere suddivisi in:

- agenti di tipo chimico: composti organici e inorganici;
- agenti di tipo fisico: radiazioni ionizzanti e non ionizzanti;
- agenti di tipo biologico: microrganismi, muffe e acari.

Gli inquinanti chimici comprendono una serie di sostanze naturali o artificiali che, presenti nell'aria in forma liquida, solida o gassosa, ne peggiorano la qualità. Possono originarsi da fonti situate

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



negli ambienti stessi o provenire dall'aria esterna, soprattutto in condizioni di elevato inquinamento ambientale.

I maggiori contaminanti di natura chimica sono:

- monossido di carbonio (CO);
- biossido di azoto (NO₂);
- biossido di zolfo (SO₂);
- composti organici volatili (COV);
- formaldeide (CH₂O);
- benzene (C₆H₆);
- idrocarburi aromatici policiclici (IPA);
- ozono (O₃);
- particolato aerodisperso (PM10, PM2.5);
- composti presenti nel fumo di tabacco ambientale;
- pesticidi;
- amianto.

I contaminanti biologici sono, invece, una serie di sostanze di origine biologica che possono incidere negativamente sulla qualità dell'aria sia indoor che outdoor.

Le principali fonti di inquinamento microbiologico nei locali sono rappresentate dagli occupanti (uomo, animali, piante), dalla polvere (ottimo ricettacolo per i microrganismi), dalle strutture e dai servizi degli edifici. A queste fonti si aggiungono gli umidificatori e i condizionatori d'aria, dove la presenza di elevata umidità e l'inadeguata manutenzione facilitano l'insediamento e la moltiplicazione dei contaminanti biologici che poi vengono diffusi nei vari ambienti.

Tra i contaminanti biologici indoor più comuni troviamo:

- i batteri, trasmessi dalle persone e dagli animali ma presenti anche in luoghi con condizioni di temperatura e umidità che ne favoriscono la crescita.
- i virus, trasmessi dalle persone e dagli animali infettati.
- i pollini delle piante, provenienti soprattutto dall'ambiente esterno.
- funghi e muffe che si formano all'interno dei luoghi confinati per problemi d'umidità o che possono penetrare dagli ambienti esterni.
- gli acari, considerati tra le principali cause di allergia ed asma poiché, tramite le loro feci, producono dei potenti allergeni facilmente inalabili.
- gli allergeni degli animali domestici rilasciati principalmente dalla saliva, forfora e urina che, una volta essiccati e frammentati, rimangono sospesi nell'aria. La principale fonte è costituita dagli animali con pelliccia (cani, gatti, roditori, etc.), ma anche da uccelli, scarafaggi e insetti.

Infine, gli agenti fisici responsabili di una cattiva qualità dell'ambiente indoor sono:

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



- campi elettromagnetici (c.e.m.)
- rumore
- radon.

Il fenomeno comunemente definito “inquinamento elettromagnetico” è legato alla generazione di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici artificiali, cioè non attribuibili al naturale fondo terrestre o ad eventi naturali (quale ad esempio può essere il campo elettrico generato da un fulmine), ma prodotti da impianti realizzati per trasmettere informazioni attraverso la propagazione di onde elettromagnetiche (impianti radio-TV e per telefonia mobile), da impianti utilizzati per il trasporto e la trasformazione dell'energia elettrica dalle centrali di produzione fino all'utilizzatore in ambiente urbano (elettrodotti), da impianti per lavorazioni industriali, nonché da tutti quei dispositivi il cui funzionamento è subordinato a un'alimentazione di rete elettrica (tipico esempio sono gli elettrodomestici).

Il rumore, responsabile dell'inquinamento acustico, è costituito dall'insieme dei suoni che risultano indesiderati perché di intensità eccessiva, fastidiosi o improvvisi, e che spesso rappresentano elementi di disturbo per la ricezione da parte dell'orecchio umano. Il radon è un elemento chimico naturale, radioattivo, appartenente alla famiglia dei cosiddetti gas nobili o inerti.

Non esiste luogo ove il radon non sia presente. In atmosfera si disperde rapidamente e non raggiunge quasi mai elevate concentrazioni, ma nei luoghi chiusi (case, scuole, negozi, ambienti di lavoro, ecc.) può in taluni casi arrivare a concentrazioni tali da rappresentare un rischio eccessivo per gli occupanti.

In definitiva gli inquinanti dell'aria indoor sono di diversa natura e derivanti da molteplici sorgenti, come riepilogato nella tabella successiva:

| TIPI DI INQUINANTI | COMPOSTI PRINCIPALI | SORGENTI |
|-----------------------------------|--|---|
| Inquinanti di tipo chimico | Aldeidi (es: Formaldeide) | Materiali di costruzioni Colle e solventi Mobili, libri e riviste Fumo di sigaretta Processi di combustione |
| | Composti organici volatili (COV) (es: Benzene) | |
| | Monossido di carbonio (CO) | Combustioni |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Region Autonome
Vallée d'Aoste



Regione Autonoma
Valle d'Aosta



| | | |
|------------------------------|--------------------------------------|---|
| | Biossido di Azoto (NO ₂) | Combustioni (Cucine a gas, stufe a gas, caldaie, autoveicoli) |
| Inquinanti di tipo fisico | Campi elettromagnetici | Apparecchiature elettriche |
| | Radon | Gas presente nel sottosuolo |
| Inquinanti di tipo biologico | Batteri | Umidità e acqua stagnante Uomo Animali |
| | Pollini | Piante |
| | Funghi e muffe | Umidità |

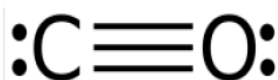
5.1. PRINCIPALI INQUINANTI CHIMICI DELL'ARIA INDOOR

Di seguito sono riportate le schede descrittive dei principali inquinanti presenti negli ambienti confinati e i valori guida previsti dagli enti internazionali (OMS, progetto INDEX) e dagli enti competenti francesi (ANSES, HCSP).

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



MONOSSIDO DI CARBONIO (CO)



DESCRIZIONE

Il monossido di carbonio è un gas inodore, incolore, insapore e altamente tossico. È prodotto dalla combustione incompleta dei materiali contenenti carbonio (combustibili per cucine e per riscaldamento, sigarette, ecc.).

FONTI

È uno degli inquinanti maggiormente diffusi, ampiamente generato negli ambienti chiusi, a causa di malfunzionamenti degli impianti di riscaldamento a gas, di fornelli, stufe e camini o di una inadeguata ventilazione, o a causa del fumo passivo.

Una fonte outdoor è costituita dai gas di scarico dei veicoli e quindi la vicinanza a strade ad elevato traffico veicolare, a garage e parcheggi, può provocare un impatto significativo sulle concentrazioni del gas negli ambienti confinati.

NORMATIVA/STANDARD

| | | |
|-------------------------------|-----------------------|---|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | 10 mg/m ³ | valore limite per la media massima giornaliera su 8 ore |
| Aria indoor – OMS | 7 mg/m ³ | media su 24 ore |
| | 10 mg/m ³ | media su 8 ore |
| | 35 mg/m ³ | media su 1 ora |
| | 100 mg/m ³ | media su 10 minuti |
| Aria indoor – Europa/INDEX | 10 mg/m ³ | media su 8 ore |
| | 30 mg/m ³ | media su 1 ora |
| Aria indoor – Francia - ANSES | 10 mg/m ³ | media su 8 ore |
| | 30 mg/m ³ | media su 1 ora |
| | 60 mg/m ³ | media su 30 minuti |
| | 100 mg/m ³ | media su 10 minuti |

EFFETTI SULLA SALUTE

In casi di forte concentrazioni il monossido di carbonio inibisce l'ossigenazione dell'emoglobina nel sangue e può condurre alla morte. I principali effetti che si manifestano a basse concentrazioni sono senso di

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



affaticamento e dolori al torace per i cardiopatici; a concentrazioni moderate si riscontrano problemi di coordinamento, mal di testa, nausea, vertigini, fino ad avere conseguenze fatali nel caso di concentrazioni molto elevate.

MISURE DI CONTROLLO

Buone norme di controllo e ispezione delle apparecchiature da combustione. Adeguata aerazione, ventilazione e buon funzionamento delle cappe di aspirazione.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



BIOSSIDO DI AZOTO (NO₂)



DESCRIZIONE

Il biossido di azoto è un gas tossico di colore giallo-rosso, dall'odore forte e pungente; è un ossidante altamente reattivo e corrosivo, con grande potere irritante. Viene generato nei processi di combustione ad alta temperatura a partire dall'azoto e dall'ossigeno presenti in atmosfera.

FONTI

Il biossido di azoto (NO₂) è un inquinante che viene normalmente generato a seguito di processi di combustione. In ambienti indoor le sorgenti sono costituite dai fornelli da cucina, dalle stufe, dagli impianti di riscaldamento con caldaie interne e dal fumo di tabacco ambientale. Una fonte outdoor è rappresentata dal traffico veicolare e dalla presenza di garage o parcheggi coperti, essendo l'NO₂ contenuto anche nei gas di scarico degli autoveicoli.

NORMATIVA/STANDARD

| | | |
|------------------------------|-----------------------|--|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | 200 µg/m ³ | valore limite per la media oraria da non superare per più di 18 volte l'anno |
| | 40 µg/m ³ | valore limite per la media annuale |
| Aria indoor – OMS | 200 µg/m ³ | media sul breve termine (1 ora) |
| | 40 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |
| Aria indoor – Europa/INDEX | 200 µg/m ³ | media sul breve termine (1 ora) |
| | 40 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |

EFFETTI SULLA SALUTE

Provoca disturbi alle vie respiratorie profonde e causa maggiore predisposizione alle infezioni soprattutto nei soggetti affetti da patologie polmonari.

MISURE DI CONTROLLO

Mantenere in perfetta efficienza le apparecchiature garantendo gli sfoghi verso l'esterno; ventilare i locali delle caldaie; accendere regolarmente la cappa di aspirazione durante la cottura dei cibi ed eliminare il fumo di sigaretta.



PARTICOLATO AERODISPERSO (PM₁₀, PM_{2.5})

PM₁₀

PM_{2.5}

DESCRIZIONE

Per materiale particolato aerodisperso si intende l'insieme delle particelle atmosferiche solide e liquide sospese nell'aria. Il termine PM10 identifica le particelle di diametro aerodinamico inferiore a 10 µm, il termine PM2.5 identifica le particelle di diametro aerodinamico inferiore o uguale ai 2,5 µm.

FONTI

La presenza di particolato aerodisperso nell'aria indoor è legata principalmente alle attività che comportano una combustione, quali la cottura degli alimenti, gli apparecchi di riscaldamento, il fumo di sigaretta, gli incensi.

Oltre alle fonti interne all'ambiente hanno influenza anche le fonti esterne costituite sia da fenomeni naturali (processi di erosione del suolo, incendi boschivi, dispersione di pollini, ecc.) sia da attività antropiche, in particolar modo dai processi di combustione e dal traffico veicolare. Tali fonti sono responsabili del cosiddetto "particolato primario", oltre al quale esiste anche un particolato di origine secondaria che si genera in atmosfera per reazione di altri inquinanti come gli ossidi di azoto (NO_x), il biossido di zolfo (SO₂), l'ammoniaca (NH₃) ed i Composti Organici Volatili (COV), per formare solfati, nitrati e sali di ammonio. Inoltre, tra i costituenti delle polveri rientrano composti quali idrocarburi policiclici aromatici (IPA) e metalli pesanti.

NORMATIVA/STANDARD

| | | | |
|------------------------------|-------|----------------------|--|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | PM10 | 50 µg/m ³ | valore limite per la media giornaliera su 24 ore da non superare per più di 35 giornate all'anno |
| | | 40 µg/m ³ | Valore limite per la media annuale |
| | PM2.5 | 25 µg/m ³ | Valore limite per la media annuale |

| | | | |
|---|-------|----------------------|-------------------------------------|
| Aria indoor/outdoor OMS – Air quality guidelines 2015 | PM10 | 50 µg/m ³ | valore guida per media sulle 24 ore |
| | | 20 µg/m ³ | valore guida per la media annuale |
| | PM2.5 | 25 µg/m ³ | valore guida per media sulle 24 ore |
| | | 10 µg/m ³ | valore guida per la media annuale |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



EFFETTI SULLA SALUTE

Le PM10 possono essere inalate e penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio, dal naso alla laringe. Le PM2,5 possono essere respirate e spingersi nella parte più profonda dell'apparato, fino a raggiungere i bronchi. Le polveri ultrafini (diametro inferiore a 0,1 μm) potrebbero essere addirittura in grado di filtrare fino agli alveoli e ancora più in profondità nell'organismo e, si sospetta, entrare nel circolo sanguigno e poi nelle cellule.

Studi epidemiologici, confermati anche da analisi cliniche e tossicologiche, hanno dimostrato una diretta correlazione tra la concentrazione di polveri fini nell'aria e gli effetti negativi sulla salute della popolazione.

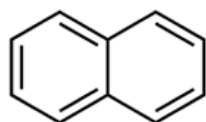
Gli effetti di tipo acuto, legati ad una esposizione di breve durata, possono consistere nell'infiammazione delle vie respiratorie, provocando in certi casi crisi di asma, o inficiare il funzionamento del sistema cardiocircolatorio.

Gli effetti di tipo cronico dipendono, invece, da una esposizione prolungata ad alte concentrazioni di polveri e possono determinare sintomi respiratori come tosse e catarro, diminuzione della capacità polmonare e bronchite cronica. Per soggetti sensibili, cioè persone già affette da patologie polmonari e cardiache o asmatiche, è ragionevole temere un peggioramento delle malattie e uno scatenamento dei sintomi tipici del disturbo.

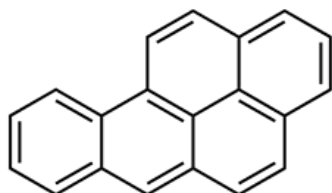
Studi condotti in materia hanno anche registrato un aumento dei ricoveri ospedalieri e della mortalità per patologie respiratorie e cardiache direttamente riferibili all'inquinamento da polveri.



IDROCARBURI POLICICLICI AROMATICI (IPA)



Naftalene



Benzo(a)pirene

DESCRIZIONE

Gli Idrocarburi Policiclici Aromatici rappresentano un insieme di composti organici con due o più anelli benzenici condensati.

FONTI

Sono presenti ovunque in atmosfera; provengono dalla combustione incompleta di materiale organico. Negli ambienti indoor derivano dai forni a legna, dai caminetti, dai fumi dei cibi cucinati sulle fiamme o affumicati e dal fumo di tabacco ambientale. Inoltre si depositano su scarpe e indumenti provenienti dall'ambiente esterno.

FONTI

Il tricloroetilene è un ottimo solvente per molti composti organici. La trielina è un ottimo solvente e detergente, di basso costo, non intacca i metalli e non esplosivo e non s'infiamma. E' usato come anestetico in interventi di piccola chirurgia. Industrialmente, viene impiegato per: pulitura fibre tessuti in lavanderie a secco, per sgrassare e pulire pezzi di metallo da smaltare o nichelare, per estrarre e purificare olii vegetali e animali, per fabbricare "collanti" da calzaturifici, come solvente di colori, resine.

Per via della sua tossicità e cancerogenicità, non è più impiegato nell'industria alimentare e farmaceutica dagli anni settanta praticamente in tutto il mondo.

Secondo l'OMS sorgenti dell'inquinamento del TCE possono essere anche l'acqua derivante da sorgenti inquinate e l'ingresso negli edifici di vapori da suoli inquinati attraverso le crepe nelle fondazioni.

NORMATIVA/STANDARD

| | | | |
|------------------------------|----------------|-------------------------|--|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | Benzo(a)pirene | 1 ng/m ³ | valore obiettivo per la media annuale |
| Aria indoor – OMS* | Benzo(a)pirene | 1,2 ng/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁴ per l'esposizione di una vita intera |
| | | 0,12 ng/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁵ per l'esposizione di una vita intera |
| | | 0,012 ng/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁶ per l'esposizione di una vita intera |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



* Trattandosi di una sostanza classificata cancerogena di prima categoria non è possibile definire una soglia di dose e pertanto i valori guida sono espressi in relazione alla soglia di rischio corrispondente ad una probabilità di insorgenza della patologia associata alla sostanza inquinante

| | | | |
|-------------------------------|-----------|----------------------|---------------------------------------|
| Aria indoor – OMS | Naftalene | 10 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |
| Aria indoor – Francia - ANSES | Naftalene | 10 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |
| Aria indoor – Francia - HCSP | Naftalene | 50 µg/m ³ | valeur d'action rapide |
| | | 10 µg/m ³ | valeur repère (valore di riferimento) |

EFFETTI SULLA SALUTE

Provocano irritazioni all'apparato respiratorio e molti sono stati valutati cancerogeni di classe 2A.

MISURE DI CONTROLLO

È sempre importante ventilare la cucina durante la cottura dei cibi e comunque tutti i luoghi dove sono presenti le fonti. Inoltre è bene ispezionare annualmente tutte le apparecchiature di combustione.

5.2. COMPOSTI ORGANICI VOLATILI

I COV comprendono un'ampia classe di sostanze con varie caratteristiche chimico/fisiche e vari enti hanno proposto diverse definizioni; di seguito si riportano quelle maggiormente significative.

L'OMS, nel documento *Indoor Air Quality: Organic Pollutants*, classifica i COV in 4 gruppi (molto volatili, volatili, semivolatili, materiale particolato) in base ai punti di ebollizione, con un limite inferiore tra 50-100°C e un limite superiore fra 240-260°C.

L'European Concerted Action (ECA) nel documento *Evaluation of COV emissions from building products: solid flooring materials* riporta una classificazione dei COV in base al tempo di ritenzione cromatografico: "tutti i composti organici volatili, eluiti in una colonna capillare rivestita con il 100% di dimetilpolisilossano, nell'intervallo di ritenzione compreso tra il n-esano (C6) e l'esadecano (n-C16)"; questo intervallo corrisponde a punti di ebollizione compresi tra 50-290°C.

L'UNI EN ISO 16000-5 Part 5: *Sampling strategy for volatile organic compounds (COVs)* riprende la classificazione dei COV secondo l'OMS.

L'Unione Europea (UE) nella direttiva 1999/13/CE sulla limitazione delle emissioni di composti organici volatili dovute all'uso di solventi organici in talune attività e in taluni impianti, recepita in Italia dal DM 44/04, definisce come COV "qualsiasi composto organico che abbia a 293,15 K una

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



pressione di vapore di 0,01 kPa o superiore, oppure che abbia una volatilità corrispondente in particolari condizioni d'uso”.

Successivamente sempre l'UE nella direttiva 2004/42 sulla limitazione delle emissioni di composti organici volatili conseguenti all'uso di solventi in talune pitture e vernici, nonché in prodotti per la carrozzeria, recepita in Italia con il DLgs 161/06, definisce come COV *“qualsiasi composto organico avente un punto di ebollizione iniziale pari o inferiore a 250°C misurato a una pressione standard di 101,3 kPa”.*

I COV più diffusi e con maggiori caratteristiche di pericolosità in aria ambiente indoor sono il benzene e la formaldeide, classificati dalla IARC (International Agency for Research on Cancer) come cancerogeni di Gruppo 1 (cancerogeno accertato per l'uomo).

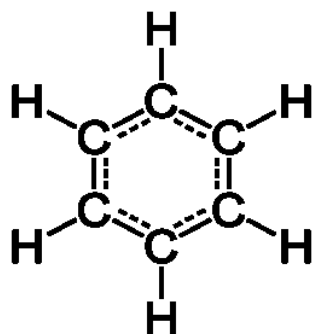
Le linee guida OMS dedicano attenzione particolare anche al tricloroetilene e al tetracloroetilene.

Per ognuno di tali composti viene di seguito riportata una scheda tecnica specifica con indicazione anche dei valori guida previsti dall'OMS e dalla normativa francese.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



BENZENE (C₆H₆)



DESCRIZIONE

Il benzene è un idrocarburo aromatico con un odore pungente e dolciastro che evapora all'aria molto velocemente, come tutti i Composti Organici Volatili (COV). È una sostanza altamente infiammabile proveniente dalla combustione incompleta del carbone e del petrolio.

FONTI

Le sue fonti provengono sia dall'esterno che da ambienti indoor. Negli ambienti confinati deriva fondamentalmente dal fumo di sigaretta, dalle combustioni domestiche incomplete del carbone e del petrolio e dai vapori liberati da prodotti che lo contengono, come colle, vernici, cere per mobili, detergenti. L'inquinamento esterno è dovuto al traffico e alle emissioni dell'industria petrolifera, chimica e petrolchimica.

NORMATIVA/STANDARD

| | | |
|------------------------------|------------------------|--|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | 5 µg/m ³ | valore limite per la media annuale |
| Aria indoor – OMS* | 17 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁴ per l'esposizione di una vita intera |
| | 1,7 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁵ per l'esposizione di una vita intera |
| | 0,17 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁶ per l'esposizione di una vita intera |

* Trattandosi di una sostanza classificata cancerogena di prima categoria non è possibile definire una soglia di dose e pertanto i valori guida sono espressi in relazione alla soglia di rischio corrispondente ad una probabilità di insorgenza della patologia associata alla sostanza inquinante

| | | |
|-------------------------------|----------------------|--|
| Aria indoor – Francia - ANSES | 30 µg/m ³ | media sul breve termine (1-14 giorni) |
| | 10 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |
| | 2 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁵ per l'esposizione di una vita intera |
| Aria indoor – Francia - HCSP | 10 µg/m ³ | valeur d'action rapide |
| | 5 µg/m ³ | valeur repère (valore di riferimento) |
| | 2 µg/m ³ | valeur cible (valore obiettivo) |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



EFFETTI SULLA SALUTE

Livelli di concentrazione bassi possono causare vertigini, sonnolenza, aumento del battito cardiaco, tremori, confusione e perdita di coscienza. Concentrazioni prolungate nel tempo possono alterare la memoria e alcune capacità psichiche oltre a causare disturbi ed effetti irritanti sulla pelle e sulle mucose. È considerato cancerogeno per l'uomo.

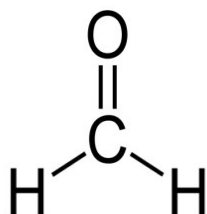
MISURE DI CONTROLLO

Controllare l'immissione di benzene proveniente dall'esterno aerando gli ambienti nelle ore di minor traffico. Evitare il fumo di tabacco. Controllare le etichette dei solventi, detergenti e vernici utilizzate nei luoghi chiusi. Ventilare i locali durante e dopo le operazioni di verniciatura.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



FORMALDEIDE (CH₂O)



DESCRIZIONE

La formaldeide è un gas incolore con caratteristico odore pungente e con un forte potere irritante.

FONTI

In uffici e ambienti residenziali la formaldeide è largamente presente nella mobilia, nei tessuti, nei materiali per l'edilizia, nel fumo di tabacco e in molti prodotti di uso corrente, come detersivi, coloranti, disinfettanti, materie plastiche, colle e vernici.

NORMATIVA/STANDARD

| | | |
|-------------------------------|------------------------------------|--|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | Valori di riferimento non previsti | |
| Aria indoor – OMS | 100 µg/m ³ | media sul breve termine (30 minuti) |
| | 100 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |
| Aria indoor – Europa/INDEX | 30 µg/m ³ | media sul breve termine (30 minuti) |
| Aria indoor – Francia - ANSES | 50 µg/m ³ | media sul breve termine (2 ore) |
| | 10 µg/m ³ | media sul lungo termine (annuale) |
| Aria indoor – Francia - HCSP | 100 µg/m ³ | valeur d'action rapide |
| | 50 µg/m ³ | valeur d'information et de recommandations |
| | 30 µg/m ³ | valeur repère (valore di riferimento) |
| | 10 µg/m ³ | valeur cible (valore obiettivo) |

EFFETTI SULLA SALUTE

Irritazione alle mucose, agli occhi e alle vie respiratorie; congiuntivite, asma, dermatite da contatto; stanchezza, angoscia, emicranie, nausea, sonnolenza e vertigini. Inoltre possiede potere mutageno e cancerogeno.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



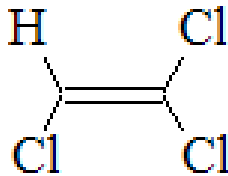
MISURE DI CONTROLLO

Limitare l'uso dei prodotti contenenti formaldeide; migliorare la ventilazione e mantenere l'umidità tra il 40 e il 60%. Avere in casa delle piante che aiutano a neutralizzare la formaldeide come ad esempio la felce di Boston, l'areca palmata, il ficus, lo spatafillo, la dracena.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



TRICLOROETILENE



DESCRIZIONE

Il tricloroetilene, noto anche col nome commerciale di trielina, è un alogenuro alchilico la cui struttura chimica è quella di una molecola di etene in cui tre atomi di idrogeno sono sostituiti da tre atomi di cloro.

È un prodotto sintetico e a temperatura ambiente si presenta come un liquido non infiammabile, incolore e dall'odore caratteristico (dolciastro).

FONTI

Il tricloroetilene è un ottimo solvente per molti composti organici. La trielina è un ottimo solvente e detergente, di basso costo, non intacca i metalli e non esplosivo e non s'infiamma. È usato come anestetico in interventi di piccola chirurgia. Industrialmente, viene impiegato per: pulitura fibre tessuti in lavanderie a secco, per sgrassare e pulire pezzi di metallo da smaltare o nichelare, per estrarre e purificare olii vegetali e animali, per fabbricare "collanti" da calzaturifici, come solvente di colori, resine.

Per via della sua tossicità e cancerogenicità, non è più impiegato nell'industria alimentare e farmaceutica dagli anni settanta praticamente in tutto il mondo.

Secondo l'OMS sorgenti dell'inquinamento del TCE possono essere anche l'acqua derivante da sorgenti inquinate e l'ingresso negli edifici di vapori da suoli inquinati attraverso le crepe nelle fondazioni.

NORMATIVA/STANDARD

| | | |
|------------------------------|------------------------------------|--|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | Valori di riferimento non previsti | |
| Aria indoor – OMS* | 230 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁴ per l'esposizione di una vita intera |
| | 23 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁵ per l'esposizione di una vita intera |

* Trattandosi di una sostanza classificata cancerogena di prima categoria non è possibile definire una soglia di dose e pertanto i valori guida sono espressi in relazione alla soglia di rischio corrispondente ad una probabilità di insorgenza della patologia associata alla sostanza inquinante

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | |
|-------------------------------|----------------------|--|
| Aria indoor – Francia - ANSES | 20 µg/m ³ | valore associato ad una soglia di rischio pari a 1x10 ⁻⁵ per l'esposizione di una vita intera |
| Aria indoor – Francia - HCSP | 10 µg/m ³ | valeur d'action rapide |
| | 2 µg/m ³ | valeur repère (valore di riferimento) |

CONCENTRAZIONE NELL'ARIA INDOOR

Secondo l'OMS ("Guidelines for indoor air quality", WHO 2010) le concentrazioni di tricloroetilene misurate in diverse città degli Stati Uniti sono vicine a 1 µg/m³, mentre negli edifici di alcune città europee i livelli medi sono decisamente più alti (Milano 7.7 µg/m³, Praga 13.6 µg/m³, Atene 8.2 µg/m³).

EFFETTI SULLA SALUTE

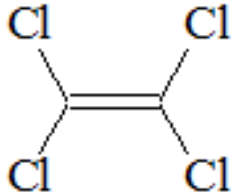
Esposizioni importanti al tricloroetilene, in genere registrate in ambienti di lavoro, conducono a depressione del sistema nervoso centrale, sonnolenza, cefalea, insufficienza epatica acuta. Inalato, il tricloroetilene deprime il sistema nervoso centrale e produce sintomi simili a quelli dell'ubriacatura da alcol: mal di testa, confusione, difficoltà nella coordinazione motoria. Un'esposizione prolungata può portare all'incoscienza e alla morte.

Il tricloroetilene è considerato un cancerogeno fortemente sospetto, in classe 2A della classificazione IARC per cancerogenicità su fegato e vie biliari; sospetta relazione con linfomi non Hodgkin.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



TETRACLOROETILENE



DESCRIZIONE

Il tetracloroetene (o tetracloroetilene o percloroetilene) è un alogenuro organico. La sua struttura è assimilabile a quella di una molecola di etene i cui quattro atomi di idrogeno sono stati sostituiti da altrettanti atomi di cloro.

FONTI

Viene utilizzato come sgrassante per i metalli, nelle lavanderie a secco, nell'industria chimica e farmaceutica. Il tetracloroetilene viene comunemente per le finiture e la realizzazione di prodotti tessili, smacchiatori e inchiostri, prodotti per la pulizia del legno.

FONTI

Il tricloroetilene è un ottimo solvente per molti composti organici. La trielina è un ottimo solvente e detergente, di basso costo, non intacca i metalli e non esplosivo e non s'infiamma. E' usato come anestetico in interventi di piccola chirurgia. Industrialmente, viene impiegato per: pulitura fibre tessuti in lavanderie a secco, per sgrassare e pulire pezzi di metallo da smaltare o nichelare, per estrarre e purificare olii vegetali e animali, per fabbricare "collanti" da calzaturifici, come solvente di colori, resine.

Per via della sua tossicità e cancerogenicità, non è più impiegato nell'industria alimentare e farmaceutica dagli anni settanta praticamente in tutto il mondo.

Secondo l'OMS sorgenti dell'inquinamento del TCE possono essere anche l'acqua derivante da sorgenti inquinate e l'ingresso negli edifici di vapori da suoli inquinati attraverso le crepe nelle fondazioni.

NORMATIVA/STANDARD

| | | |
|------------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| Aria esterna – Dlgs 155/2010 | Valori di riferimento non previsti | |
| Aria indoor – OMS | 250 µg/m ³ | media su lungo periodo (annuale) |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|
| Aria indoor – Francia - ANSES | 1380 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | media sul breve termine (1-14 giorni) |
| | 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | media sul lungo termine (annuale) |
| Aria indoor – Francia - HCSP | 1250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | valeur d'action rapide |
| | 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | valeur repère (valore di riferimento) |

CONCENTRAZIONE NELL'ARIA INDOOR

Secondo l'OMS ("Guidelines for indoor air quality", WHO 2010) le concentrazioni di tetracloroetilene medie misurate in diverse città degli Stati Uniti sono comprese tra 0.4 e 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ¹⁵, mentre negli edifici di alcune città europee i livelli medi sono decisamente più alti (Milano 7.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Praga 8.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Atene 4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)¹⁶.

EFFETTI SULLA SALUTE

L'esposizione al tetracloroetilene può portare a irritazione agli occhi, alle mucose, alla pelle, ai polmoni, al fegato e ai reni.

Un'esposizione acuta, con concentrazioni nell'aria superiore a 100 ppm, può avere effetti sull'apparato neurologico, con problemi di coordinazione e di comportamento. A concentrazioni maggiori possono manifestarsi problemi importanti come la perdita di coscienza

Nella tabella seguente vengono riportati i valori guida per l'IAQ riportati per alcuni altri COV nel report del progetto INDEX.

| | | | |
|------------------------------|-------------|-------------------------------|-------------------------|
| Aria indoor – Europa - INDEX | Acetaldeide | 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | media sul breve termine |
| | | 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | media sul lungo termine |
| | Xileni | 20 mg/m^3 | media sul breve termine |
| | | 0,2 mg/m^3 | media sul lungo termine |
| | Toluene | 15 mg/m^3 | media sul breve termine |
| | | 0,3 mg/m^3 | media sul lungo termine |
| | Stirene | 2000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | media sul breve termine |
| | | 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | media sul lungo termine |

¹⁵ Tetrachloroethylene. Geneva, World Health Organization, 1984.

¹⁶ Jantunen MJ et al. *Air pollution exposure in European cities: the EXPOLIS Study*. Kuopio, National Public Health Institute, 1999.



6. LE FONTI DI EMISSIONE

Le fonti di inquinamento dell'aria indoor sono molteplici e spesso di difficile individuazione, in quanto l'IAQ è il risultato di complesse interazioni tra ambiente interno, ambiente esterno, materiali di costruzione e attività antropiche.

Tra le principali sorgenti di sostanze inquinanti presenti all'interno degli ambienti confinati troviamo:

- materiali da costruzione;
- mobili;
- incensi e deodoranti;
- prodotti per la pulizia;
- stufe a biomassa (legna e pellet);
- la preparazione di cibi (in particolare i prodotti derivanti dalla combustione dei fornelli a gas);
- fumi di sigaretta e sigaretta elettronica;
- stampanti.

I materiali e i prodotti per la decorazione utilizzati in edilizia sono importanti sorgenti di composti organici volatili (COV). Alcuni paesi europei, al fine di ridurre le emissioni di inquinanti, hanno redatto diverse procedure per la qualificazione dei prodotti da costruzione basate sul rilascio di inquinanti volatili. Queste procedure hanno lo scopo di informare e sensibilizzare i consumatori sull'acquisto di materiali con bassi valori di emissione di COV. Ad esempio il governo francese ha reso obbligatorio dal 1° gennaio 2012 l'etichettatura di qualità dei materiali per la costruzione e per la decorazione. L'etichetta, sulla falsa riga dell'etichettatura energetica degli elettrodomestici, permette di indicare in maniera semplice il livello di emissione di COV da parte del prodotto attraverso una suddivisione in classi di emissione dalla A+ (la meno inquinante) alla C¹⁷.

Questo tipo di regolamentazione permette di sensibilizzare la popolazione sulla pericolosità dell'inquinamento indoor e di indirizzare i consumatori all'acquisto di prodotti con basse emissioni di COV.

Una delle sorgenti maggiormente impattanti sono le sigarette; l'Accademia di Medicina Francese considera il fumo di sigaretta, che contiene più di 4.000 sostanze chimiche (tra cui benzene, cadmio e diossine) il principale inquinante dell'aria interna. Le principali sostanze tossiche del fumo liberate in ambiente sono: il monossido di carbonio (CO), gli idrocarburi policiclici aromatici, COV, ammoniaca e ammine volatili, acido cianidrico e gli alcaloidi del tabacco.

¹⁷ "Etiquetage des émissions en polluants volatils des produits de construction et de décoration", Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Anche le sigarette elettroniche, proposte come alternativa “salutare” al tabacco, emettono composti chimici dannosi per la salute umana e per l’ambiente. Secondo alcuni studi, tra cui quello di Goniewicz et al.¹⁸, gli aerosol prodotti dall’utilizzo delle sigarette elettroniche contengono concentrazioni di sostanze cancerogene, come le nitrosammine, in quantità non trascurabile e che il glicole, contenuto nel liquido che viene “aerosolizzato”, può essere ossidato dagli elementi riscaldanti, creando delle aldeidi pericolose come la formaldeide¹⁹.

Tipico delle regioni montane è l’utilizzo di camini e stufe, alimentati a biomassa, come fonte ausiliaria per il riscaldamento. Il loro utilizzo può incrementare notevolmente il livello di sostanze inquinanti all’interno degli ambienti, in particolar modo se le stufe e i camini risultano essere datati. I principali inquinanti derivanti dalla combustione di biomassa e riscontrabili negli ambienti sono polveri sottili, monossido di carbonio e ossidi di azoto. Al fine di ridurre i rischi connessi all’utilizzo di questo tipo di focolari è bene sostituire i vecchi apparecchi con quelli di nuova generazione, possibilmente con camera stagna, ovvero con la presa dell’aria comburente direttamente dall’esterno e la camera di combustione ermetica, la quale non permette scambi con l’ambiente indoor circostante.

Particolare attenzione va posta anche nell’utilizzo di prodotti contro zanzare, blatte e insetti. Gli antiparassitari sono utilizzati anche come trattamento protettivo del legno: una rilevante esposizione cronica ad antiparassitari, in particolare pentaclorofenolo, è stata rilevata in individui che occupano edifici in cui sono presenti numerose superfici in legno²⁰.

7. LA VENTILAZIONE DEGLI AMBIENTI CONFINATI

Al fine di migliorare la qualità dell’aria interna è fondamentale non solo limitare le sorgenti di sostanze inquinanti, ma anche garantire una corretta aerazione dei locali al fine di rinnovare l’aria degli ambienti confinati, estraendo l’aria viziata e tenendo sotto controllo i livelli di umidità.

La ventilazione, che sia realizzata in maniera naturale attraverso l’apertura dei serramenti o attraverso un sistema di ventilazione meccanica, è indispensabile per ottenere una buona qualità dell’aria indoor.

¹⁸ Goniewicz, M., K. Knsak, M. Gawron. 2013. “Levels of selected carcinogens and toxicants in vapor from electronic cigarettes”. Tobacco Control, March.

¹⁹ Ohta, K., et al. 2011. “Determination of carbonyl compounds generated from the electronic cigarette using coupled silica cartridges impregnated with hydroquinone and 2,4-dinitrophenylhydrazine”. Bunseki Kagaku.

²⁰ Ministero della Sanità Dipartimento della Prevenzione. “La tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati”.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



La Norma Uni 10339 (*“Impianti aeraulici ai fini di benessere. Generalità, classificazione e requisiti. Regole per la richiesta d'offerta, l'offerta, l'ordine e la fornitura.”*) indica una serie di parametri tecnici da rispettare, tra cui il numero di ricambi d'aria dei locali, per garantire le condizioni di benessere ambientale a seconda del tipo di locale e dall'attività che viene svolta.

I valori riportati indicano il tasso minimo di aerazione degli ambienti interni al fine di mantenere accettabili livelli di qualità dell'aria, definita dalla stessa norma come *“caratteristica dell'aria trattata che risponde ai requisiti di purezza. Essa non contiene contaminanti noti in concentrazioni tali da arrecare danno alla salute e causare condizioni di malessere per gli occupanti. I contaminanti, contenuti sia nell'aria di rinnovo che in quella ricircolata, sono gas, vapori, microrganismi, fumo e altre sostanze particolate”*.

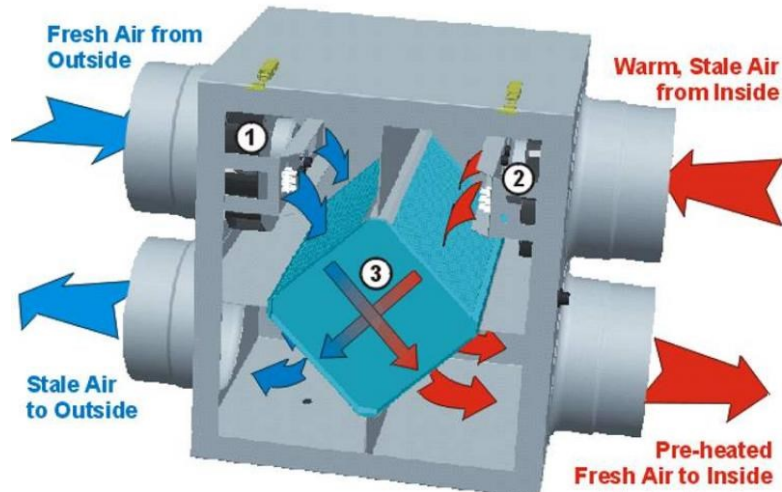
Nella maggior parte dei casi, sia in edifici residenziali che nei luoghi di lavoro, il ricambio dell'aria è demandato all'apertura delle finestre. Questa modalità di controllo della qualità dell'aria è totalmente aleatoria e legata alle sensazioni di chi occupa l'edificio. Nei periodi invernali, quando le temperature esterne sono rigide, soprattutto in ambienti montani come quello della Valle d'Aosta, difficilmente le finestre vengono aperte per evitare di raffreddare le stanze o, se anche l'operazione viene eseguita, il tempo di apertura delle finestre è troppo breve per permettere il completo ricambio dell'aria interna. Inoltre è fondamentale sottolineare come sia particolarmente importante l'aspetto energetico nel ricambio naturale dell'aria indoor, in quanto l'apertura dei serramenti comporta l'ingresso di notevoli quantità d'aria esterna a bassa temperatura (o ad alta temperatura nei periodi estivi) e il conseguente squilibrio termico. Viste le linee guida dettate dalle normative europee e nazionali, che richiedono la costruzione di edifici sempre più a basso consumo energetico e ad alti livelli di isolamento, sembra essere un controsenso l'apertura delle finestre per il ricambio dell'aria.

Per questi motivi è importante che il controllo della qualità dell'aria degli ambienti indoor sia realizzata attraverso impianti di ventilazione meccanizzata per il rinnovo dell'aria ambiente. Attraverso questa tipologia di impianto è possibile mantenere un buon livello dell'aria indoor attraverso l'estrazione dell'aria viziata e l'immissione di aria esterna in continuo, col duplice vantaggio, rispetto alla classica aerazione naturale ottenuta mediante l'apertura delle finestra, di poter filtrare l'aria in ingresso e recuperare l'energia termica contenuta nell'aria espulsa. La possibilità di poter trattare l'aria di rinnovo attraverso l'utilizzo di filtri permette di aumentare notevolmente la qualità dell'aria, limitando soprattutto l'ingresso di particolato all'interno dell'ambiente confinato. Con la realizzazione di impianti di ventilazione meccanizzata è inoltre possibile ridurre gli sprechi termici, recuperando l'energia contenuta nell'aria viziata attraverso l'installazione di scambiatori di calore ad alta efficienza.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Un esempio di sistema di ventilazione meccanizzata con recupero del calore è riportato nella figura seguente.



La realizzazione di impianti di ventilazione meccanica controllata offre quindi numerosi vantaggi sia dal punto di vista del confort e della qualità dell'aria indoor, sia dal punto di vista del risparmio energetico ottenibile rispetto alla ventilazione naturale, evitando le condizioni di scarsa qualità dell'aria dovute al ridotto tasso di ventilazione naturale conseguenti a tempi di apertura delle finestre troppo limitati.

D'altro canto la ventilazione meccanizzata non sempre è realizzabile e può portare a problematiche connesse all'assenza o a una cattiva manutenzione degli impianti.

Una delle principali criticità della VMC è l'elevato costo di realizzazione, oltre ai costi di gestione energetici possono essere elevati soprattutto nei casi di impianti a tutt'aria, dove non solo è garantito il ricambio dell'aria, ma l'impianto viene utilizzato anche per soddisfare il fabbisogno termico dell'edificio.

Inoltre occorre tenere conto che non sempre un impianto di VMC può tecnicamente essere realizzato, in quanto esso richiede notevoli spazi per l'installazione dell'unità di trattamento dell'aria (UTA) e dei canali di ventilazione. Questa problematica emerge soprattutto negli edifici esistenti dove non sono stati concepiti spazi per gli impianti di ventilazione.

Fondamentale per il buon funzionamento della VMC e per garantire sufficienti livelli di IAQ è la manutenzione degli impianti, la quale purtroppo raramente viene eseguita, se non quando ormai si sono manifestate problematiche sanitarie o di cattivi odori. Una scarsa manutenzione può addirittura peggiorare l'IAQ, portando alla proliferazione di agenti patogeni all'interno dei canali aerulici e la conseguente diffusione all'interno degli ambienti.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Le fonti normative in merito non mancano, ma spesso non vengono seguite. La normativa vigente in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro, D.L.vo 81/08 art. 64, obbliga i datori di lavoro a provvedere affinché i luoghi di lavoro, gli impianti e i dispositivi vengano sottoposti a regolare pulizia al fine di assicurare condizioni igieniche adeguate. Tali obblighi riguardano quindi anche gli impianti di ventilazione. Purtroppo l'esecuzione di una corretta manutenzione e sanificazione degli impianti aeraulici è decisamente complessa e onerosa e spesso, soprattutto in questo periodo di crisi economica, le poche risorse finanziarie a disposizione vengono investite in altri ambiti, trascurando le operazioni di manutenzione non direttamente connesse alle attività produttive e redditizie.

| | VANTAGGI | SVANTAGGI |
|---|----------------------------------|---|
| VENTILAZIONE NATURALE | Costi di investimento nulli | Legata alle sole sensazioni degli occupanti |
| | Manutenzione non necessaria | Spreco energetico |
| | | Difficilmente attuabile nel periodo invernale |
| | | Ingresso di aria esterna non trattata |
| VENTILAZIONE MECCANICA CONTROLLATA | Ricambio d'aria continuo | Alti costi di investimento iniziale |
| | Filtrazione dell'aria di rinnovo | Elevati costi di manutenzione |
| | Recupero energetico | Manutenzione non sempre agevole |
| | Qualità dell'aria indoor elevata | |

8. PIANTE E FITODEPURAZIONE

L'utilizzo delle piante ai fini della depurazione di acque e di terreni è una tecnica naturale molto utilizzata e di provata efficacia. Questa tecnica di risanamento dei terreni o delle acque inquinate è denominata *Phytoremediation*. Le piante riescono ad assorbire grandi quantità di agenti tossici, come i metalli pesanti, attraverso l'apparato radicale per poi trasportarli efficacemente attraverso lo xilema fino agli apparati fogliari dove vengono stoccati. Alcune specie vegetali possono assorbire e trasformare contaminanti organici in sottoprodotti meno tossici (*fitodegradazione*) e, in alcuni casi,

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



rilasciarli in atmosfera tramite il processo di traspirazione (*fitovolatilizzazione*), mentre altre piante possono accumulare elevate quantità di metalli, senza presentare fenomeni di tossicità (*fitoestrazione*).²¹ L'utilizzo della *phytoremediation* è cresciuto rapidamente poiché si tratta di un processo di depurazione "pulito", economico e con risvolti positivi anche a livello estetico sull'architettura paesaggistica.

Le piante, come dimostrano alcuni studi scientifici, possono essere utilizzate non solo per la depurazione dell'acqua e dei terreni, ma anche per quella dell'aria benché questa tecnica sia poco sviluppata. Il concetto di *phytoremediation* può essere quindi allargato e definito come l'utilizzo delle piante per l'estrazione, accumulo e degradazione delle sostanze inquinanti presenti nell'ambiente in cui esse si sviluppano.

Dal punto di vista scientifico, i primi studi importanti sulla possibilità di migliorare la qualità dell'aria degli ambienti confinati risalgono agli anni '80, quando la NASA ha realizzato alcune prove per verificare la possibilità di purificare l'aria delle navette e delle basi spaziali. La maggior parte degli studi condotti fino ad ora sono stati incentrati su esperimenti eseguiti in ambienti con volumi ridotti e con i parametri chimici e fisici controllati.

Uno studio americano (Cornejo et al., 1999) ha messo in luce la capacità di alcune piante ornamentali, tra cui la *Pelargonium domesticum*, *Ficus elastica* e la *Kalanchoe blossfeldiana*, di rimozione del benzene presente nell'aria²².

In Francia nel 2004 è nato il programma di ricerca denominato PHYTAIR su impulso di CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), del LSVF (Laboratoire des Sciences Végétales et Fongiques) della facoltà di farmacia di Lille e de l'Association Plant'Air Pur, al fine di studiare la capacità di depurazione degli inquinanti degli inquinanti aerodispersi da parte delle piante attraverso le foglie in maniera passiva, ovvero senza dispositivi di biofiltrazione, e di studiare i meccanismi coinvolti nella fitodepurazione al fine di studiare il potenziali di utilizzo delle piante nella biosorveglianza.

L'uso di piante per depurare l'aria di ambienti chiusi da sostanze organiche volatili (COV) è stato già proposto, prevalentemente per interventi in uffici e in ambito domestico. Almeno un centinaio di specie vegetali differenti sono state proposte per questo genere di interventi (Dela Cruz et al., 2014).

I dati disponibili suggeriscono che diversi fattori contribuiscono alla depurazione dell'aria:

Le COV possono essere assorbite dalla parte aerea della pianta attraverso gli stomi oppure attraverso la cuticola fogliare. Piante con fotosintesi CAM, con gli stomi aperti durante le ore notturne, possono essere mescolati a piante C3 o C4, in modo da rendere più efficiente il processo

²¹ APAT, F. Baglivo et al. Phytoremediation: metodologie, parametri e protocollo d'applicazione

²² CORNEJO J.J., MUNOZ F.G., MA C.Y. & STEWART A.J., 1999. *Studies on the Decontamination of Air by Plants*

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



(Sriprapat & Thiravetyan, 2013). L'assorbimento attraverso la cuticola risulta maggiormente efficiente per molecole di piccole dimensioni e tendenzialmente apolari (Sabljic et al., 1990). I COV assorbiti per queste vie possono essere stoccati o metabolizzati fino al rilascio di CO₂ (Schmitz et al., 2000).

I microrganismi del suolo presenti nel substrato di crescita possono contribuire all'assorbimento e degradazione delle COV presenti nell'aria. Questa attività può essere svolta da batteri e funghi micorrizici (Orwell et al., 2004; Gao et al., 2010).

Una quota di COV possono essere assorbiti anche dal substrato di crescita, tuttavia questa capacità è limitata alla capacità di assorbimento del substrato e non consiste in una degradazione. Diverse specie vegetali possono mostrare efficienza molto variabile, con differenza anche a livello di varietà o cultivar (Liu et al., 2007; Yang et al., 2009; Zhou et al., 2011). Le felci sembrano avere un'ottima efficienza (Kim et al., 2010). La capacità di eliminare le COV è di solito riportata, negli studi compiuti in laboratorio, come quantità di COV rimossi per unità di tempo, per unità di area fogliare. Questo ultimo aspetto costituisce un punto critico, poiché mancano per molte piante modelli e dati sulla velocità di accrescimento e di formazione della biomassa. In linea di massima, molte prove empiriche sono state compiute inserendo da 1 a 6 piante (con indicazioni dimensionali molto vaghe) ogni 10 m² di superficie (Dela Cruz et al., 2014); poiché si tratta di prove in uffici, possiamo considerare questa indicazione valida per circa 30 m³.

L'illuminazione può rappresentare un fattore critico. In generale, un aumento dell'intensità di luce può avere un effetto favorevole sulla rimozione delle COV (Baosheng et al., 2009; Xu et al., 2011). È opportuno considerare che, in condizioni indoor, l'illuminazione spesso si attesta su valori piuttosto bassi (fino a 9-14 mol m⁻² s⁻¹). A questi flussi di luce, l'attività foto sintetica di molte piante è bassa.

Anche la temperatura può produrre effetti. Altri fattori importanti sono dati dalla concentrazione delle COV, dalla loro tipologia e dalla presenza di misture. Le piante in fioritura, invece, provocano l'emissione di COV.



9. LO STUDIO SPERIMENTALE

9.1. OBIETTIVI E STRATEGIE ADOTTATE

Il principale obiettivo dello studio sperimentale è quello di testare l'applicabilità della fitodepurazione in contesti reali.

A differenza di altri studi sperimentali sulla fitodepurazione dell'aria indoor reperibili in letteratura, nei quali le prove sono state condotte in condizioni controllate di laboratorio (camere chiuse con iniezione dosata di COV mediante sistemi pneumatici collegati a bombole), nel presente progetto sperimentale le prove sono state condotte in condizioni reali, verificando l'applicabilità della fitodepurazione in relazione ad una serie di fattori contingenti quali le caratteristiche delle fonti di emissione (che nella realtà sono variabili e discontinue), le dimensioni dei locali, la logistica di alloggiamento delle piante, le comuni pratiche di ventilazione dei locali, le attività svolte correntemente all'interno dei locali stessi.

In primo luogo sono stati individuati ambienti indoor di diversa tipologia considerati potenzialmente interessanti per l'applicazione della fitodepurazione in relazione alla presenza di sorgenti di emissione di COV.

I COV possono derivare da prodotti utilizzati in attività produttive oppure dai materiali di costruzione degli edifici o dagli arredi.

A tale proposito sono stati individuati i seguenti ambienti indoor:

- area produttiva di uno stabilimento industriale in cui vengono utilizzati prodotti contenenti COV, nel caso specifico l'attività produttiva svolta è la produzione di trasformatori elettrici (SITO A);
- ufficio dello stabilimento industriale sopra descritto, contiguo all'area produttiva (SITO B);
- gabbiotto di una stazione di rifornimento carburante (SITO C);
- salone di un parrucchiere (SITO D);
- scuola dell'infanzia di nuova costruzione realizzata con materiali di bioedilizia, dotato di ventilazione meccanizzata (SITO E).

Si tratta di ambienti in cui i livelli di COV nell'aria interna sono ampiamente inferiori alle soglie di rischio previste dalla normativa dell'igiene del lavoro, ma nei quali le concentrazioni di COV sono tali da poter comportare potenzialmente negli ospitanti alcune delle riconosciute sintomatologie causate dalla permanenza in ambienti indoor inquinati.

In ognuno degli ambienti individuati è stata condotta una indagine conoscitiva iniziale finalizzata a individuare le tipologie di sostanze presenti e i relativi livelli di concentrazione.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Per ogni campagna misura sono state condotte rilevazioni parallele nell'ambiente esterno immediatamente vicino per verificare la presenza di eventuali fonti di contaminazione esterne.

Sulla base dei risultati dell'indagine iniziale si è deciso di condurre la sperimentazione con le piante nei seguenti ambienti indoor:

- nell'area produttiva dello stabilimento industriale di produzione di trasformatori elettrici;
- nell'ufficio annesso allo stabilimento di produzione di trasformatori elettrici, contiguo all'area produttiva;
- nel gabbiotto della stazione di rifornimento carburante.

Il salone del parrucchiere è stato escluso dalla sperimentazione in quanto i livelli di concentrazione di COV sono risultati inferiori rispetto agli altri ambienti sopra indicati e pertanto l'effetto di abbattimento degli inquinanti da parte delle piante sarebbe potuto essere più difficilmente apprezzabile.

Nel caso della scuola dell'infanzia la sperimentazione è stata mirata a valutare i livelli di COV provocati dalla presenza di materiali costruttivi di nuova realizzazione e a verificare la diminuzione delle concentrazioni di COV ottenute con l'applicazione della ventilazione meccanizzata. In tale ambiente non è stata pertanto testata la fitodepurazione.

Per verificare l'effetto della fitodepurazione sono state condotte campagne di misura in periodi diversi sia in assenza di piante che in presenza di piante, mantenendo inalterate le altre condizioni al contorno (fonti di emissione, ricambi d'aria, condizioni microclimatiche di temperatura e umidità). Le misure sono state condotte sia durante la stagione estiva che durante la stagione invernale, per verificare i livelli di concentrazione e l'efficacia della fitodepurazione in relazione alle diverse modalità di gestione della ventilazione degli ambienti interni che caratterizzano le due diverse stagioni.

Per ogni condizione di prova sono state condotte due prove ripetute successive. Pertanto per ogni ambiente sono state condotte:

- n. 2 misure nel periodo estivo in assenza di piante;
- n. 2 misure nel periodo estivo in presenza di piante;
- n. 2 misure nel periodo invernale in assenza di piante;
- n. 2 misure nel periodo invernale in presenza di piante.

Nel caso dell'area produttiva la strategia sperimentale sopra descritta è stata valutata non applicabile essendo caratterizzata da una volumetria molto maggiore rispetto all'ufficio e al gabbiotto del benzinaio, rendendo praticamente impossibile alloggiare un numero di piante

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



sufficiente a garantire una densità (numero di piante per m³ di aria interna) confrontabile con quella applicata negli altri due ambienti.

La sperimentazione è stata pertanto condotta alloggiando un buon numero di piante su una struttura a forma di parallelepipedo posta nelle vicinanze del punto in cui vengono normalmente condotte le fasi lavorative con utilizzo di prodotti contenenti COV. In tal modo si è cercato di confinare un volume ridotto dell'ambiente indoor circondato da piante per testare un eventuale effetto di riduzione della concentrazione di COV rispetto all'aria ambiente del locale.

Le misure sono state condotte parallelamente all'interno dello spazio racchiuso dalla struttura di alloggio delle piante e nell'ambiente indoor vicino all'esterno della struttura stessa.

Anche in questo caso le misure sono state condotte sia nel periodo estivo che nel periodo invernale.

Nel caso della scuola dell'infanzia la sperimentazione è stata mirata a valutare i livelli di COV provocati dalla presenza di materiali costruttivi di nuova realizzazione e a verificare la diminuzione delle concentrazioni di COV ottenute con l'applicazione della ventilazione meccanizzata. In tale ambiente non è stata pertanto testata la fitodepurazione.

Nella tabella seguente sono riepilogati i siti scelti e le prove eseguite.

| SITO | Indagine conoscitiva | Campagna estiva senza piante | Campagna estiva con piante | Campagna invernale senza piante | Campagna invernale con piante |
|---------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| A – Valletrafor area produttiva | X | X | X | X | X |
| B – Valletrafor uffici | X | X | X | X | X |
| C – Benzinaio | X | X | X | X | X |
| D – Scuola infanzia St-Marcel | X | X | | X | |
| E - Parruchiere | X | | | X | |



9.2. METODI DI CAMPIONAMENTO E MISURA

9.2.1. Misure con campionatori passivi di tipo diffusivo

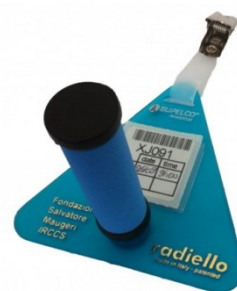
Le prove sperimentali sono state focalizzate sui Composti Organici Volatili (COV - Volatile Organic Compounds), comprese le aldeidi.

Le misure sono state condotte mediante campionatori passivi di tipo diffusivo a simmetria radiale (radiello®, brevettati dalla Fondazione Salvatore Maugeri-IRCCS).



Il campionatore a diffusione è una scatola chiusa di forma cilindrica, nella quale una delle due facce piane è “trasparente” alle molecole gassose e quella opposta le adsorbe. La prima è chiamata superficie diffusiva, la seconda superficie adsorbente.

Il campionatore passivo radiello® è di forma cilindrica ed è composto da una cartuccia adsorbente all'interno della quale viene collocato il corpo diffusivo, avvitata ad una piastra di sostegno.



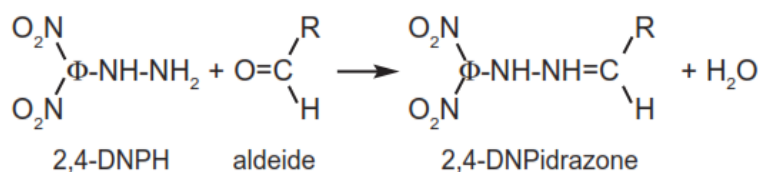
La cartuccia adsorbente interna viene sottoposta successivamente a desorbimento ed analisi di laboratorio per la determinazione dei composti organici adsorbiti.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



La cartuccia adsorbente per il campionamento dei COV è costituita da una rete di acciaio inossidabile riempita con carbone attivo. I COV captati per adsorbimento sono recuperati con solfuro di carbonio e sono analizzati in gascromatografia capillare con rivelatore FID.

La cartuccia adsorbente per il campionamento delle aldeidi è costituita da una rete in acciaio inossidabile riempita di florisil rivestito di 2,4-dinitrofenilidrazina (2,4-DNPH). Le aldeidi reagiscono con la 2,4-DNPH per dare il corrispondente 2,4-dinitrofenilidrazzone.



I 2,4-dinitrofenilidrazoni sono estratti con acetonitrile e sono analizzati mediante HPLC in fase inversa con rivelatore UV.

Per le strategie di campionamento si è fatto riferimento alla norma UNI EN ISO 16000-1 “Aria in ambienti confinati. Parte 1: aspetti generali della strategia di campionamento”, che prevedono in particolare:

- l'effettuazione per ogni campionamento indoor di un campionamento parallelo nel corrispondente ambiente outdoor, per verificare l'effetto di fonti di contaminazione presenti all'esterno;
- l'effettuazione di almeno due misure ripetute per ogni condizione di prova per verificare la ripetibilità;
- la ripetizione delle misure in condizioni estive e invernali per verificare l'effetto delle diverse condizioni di temperatura sulle concentrazioni degli inquinanti.

Si è inoltre scelto di esporre n. 3 campionatori in parallelo per ogni misura, per verificare la ripetibilità dei campionamenti nelle condizioni effettive delle prove sperimentali.

I campionatori passivi sono stati esposti nell'ambiente di interesse per un periodo variabile tra 9 e 15 giorni per i COV, e pari a 7 giorni per le aldeidi, secondo le indicazioni del produttore.

I COV ricercati sono stati scelti tenendo conto delle sostanze più frequentemente presenti negli ambienti indoor secondo letteratura e delle sostanze presenti nei prodotti utilizzati nel processo produttivo.

Sono state ricercate complessivamente 42 sostanze, 35 COV e 7 aldeidi, riportate nell'elenco seguente.



SOSTANZE RICERCATE NELLO STUDIO SPERIMENTALE CON MISURE MEDIANTE CAMPIONATORI PASSIVI

COMPOSTI ORGANICI VOLATILI (COV)

alcool sec-butilico
metilcicloesano
propilen glicole monometil etere acetato
acetato di butile
metilmetacrilato
alcool isobutilico
alcool n-butilico
alcool terz-butilico
limonene
cicloesanone
cicloesano
n-decano
n-dodecano
n-eptano
n-esano
n-nonano
n-ottano
n-pentano
n-undecano
1,2,4-trimetilbenzene
1,3,5-trimetilbenzene
benzene
etilbenzene
isopropilbenzene
stirene
toluene
xileni (o,m,p)
acetato di etile
acetato di isobutile
acetato di isopropile
acetato di metile
acetato di propile
metossietile acetato

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | |
|----------------|---|
| ALDEIDI | formaldeide acetaldeide acroleina propanale benzaldeide pentanale esanale |
|----------------|---|

9.2.2. Misure con rilevatori PID portatili

Oltre alle misure con campionatori passivi, sono state condotte anche delle misure di COV totali con strumentazione portatile dotata di rivelatore a fotoionizzazione (PID).

È stato utilizzato un rilevatore di tipo attivo (marca ION SCIENCE mod. PHOCHECK 5000) e uno di tipo passivo (marca ION SCIENCE mod. CORVUS).

Il PHOCHECK 5000 è un rilevatore portatile dotato di aspirazione attiva del campione di aria da misurare, in grado di restituire misure istantanee e adatto per indagini conoscitive atte a individuare la presenza di COV nell'aria ed eventualmente per ricercare la presenza di fughe di gas. Il PHOCHECK 5000 ha una risoluzione di 1 ppb e un campo di misura di 0,1 – 10000 ppm.



Il CORVUS è uno strumento adatto all'installazione fissa o temporanea, per un periodo di tempo limitato, all'interno di un ambiente indoor per il monitoraggio nel tempo dei COV totali e comprende anche dei sensori di temperatura, pressione atmosferica e umidità. La peculiarità che contraddistingue il Corvus dai fotoionizzatori tradizionali è il suo funzionamento passivo, in quanto

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



l'aria non transita in maniera forzata attraverso l'ausilio di una pompa all'interno dello strumento, ma in maniera diffusiva con una dinamica di captazione degli inquinanti del tutto simile a quello dei campionatori passivi dell'aria.



Nella tabella seguente sono riportate le principali caratteristiche dello strumento CORVUS.

| CORVUS | | | |
|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|
| TIPO DI MISURA | INTERVALLO DI MISURA | PRECISIONE | RISOLUZIONE |
| Misure COV attraverso PID | 0-50 ppm | +/- 5 ppb (isobutilene equivalente) | 5 ppb |
| Temperatura | -40°C a +125°C | +/- 1°C | 0,1°C |
| Umidità | 0-99% | +/- 4% | 0,04% |
| Pressione | 700-1060 mBar | +/- 1,5% | 0,72 mBar |

9.3. PIANTE UTILIZZATE PER LA SPERIMENTAZIONE

Le piante utilizzate per la realizzazione dello studio sperimentale sono state individuate sulla base della consulenza del prof. Guido Lingua del Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica dell'Università degli Studi del Piemonte Orientale, tenendo conto delle condizioni ambientali degli ambienti di destinazione e dei costi.

Le specie prese in considerazione per lo studio sperimentale sono le seguenti:

- Pothos (*Scindapsus aureus*);
- Ficus (*F. benjamina*, *F. lyrata*, *F. elastica*);
- *Zamioculcas zamiifolia* (pianata con fotosintesi CAM);
- Felci varie (generi *Pteris*, *Asplenium*, *Adiantum*, ecc.);

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



- Dracene (specie del genere *Dracaena*, adatte solo ad ambienti caldi e privi di correnti).

9.4. ACCORDI CON ENTI UNIVERSITARI

Nell'ambito della conduzione dello studio sperimentale sono stati stipulati due accordi di collaborazione con enti universitari:

- con l'Università del Piemonte Orientale, Dipartimento di Scienze e Innovazione Tecnologica (prot. ARPA n. 7655 del 20/07/2015);
- con l'Università degli Studi di Torino, Dipartimento di Scienze della Sanità Pubblica e Pediatriche (prot. ARPA n. 4003 del 10/04/2015).

Nell'ambito di tali accordi è stato possibile per ARPA ottenere supporto e consulenza nella definizione delle strategie di sperimentazione, in particolare per la scelta delle piante da utilizzare nelle prove sperimentali.

10. RISULTATI DELLA SPERIMENTAZIONE

10.1. AMBIENTE INDOOR INDUSTRIALE – AREA PRODUTTIVA E UFFICIO

10.1.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor

L'ambiente indoor di tipo industriale individuato per la campagna sperimentale è costituito da uno stabilimento di produzione di trasformatori elettrici.

Lo stabilimento (Figura 1) è ubicato all'interno di un parco industriale regionale, nella zona denominata "Espace Aosta", situata a sud-est del territorio comunale ed è collocato a circa 100 m dal confine con il comune di Charvensod, situato a sud, e a circa 400 m dal confine del Comune di Pollein, situato ad est.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Figura 1 – Vista esterna dello stabilimento produttivo all'interno del quale sono state condotte le prove sperimentali

Lo stabilimento è suddiviso in 2 aree:

- area produttiva, situata al piano terreno, con un'estensione di circa 2700 m², in cui avviene la produzione delle macchine elettriche statiche;
- area uffici, situata al primo piano, in cui sono ubicati gli uffici amministrativi e tecnici.

Le prove sperimentali sono state condotte sia nell'area produttiva che in uno degli uffici dell'area amministrativa.

Il volume dell'ufficio è di 85 m³.



Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor

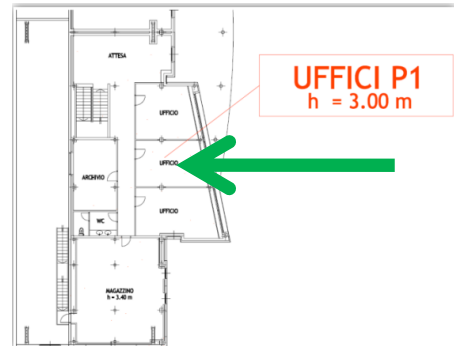


Figura 2 – Planimetria dello stabilimento produttivo

10.1.2. Fonti di emissione outdoor

Lo stabilimento si trova nella zona industriale della città di Aosta con presenza di diverse sorgenti inquinanti nell'ambiente outdoor:

- l'autostrada A5 che collega Torino con il Traforo del Monte Bianco, situata a sud dello stabilimento a poche decine di metri dallo stesso;
- uno stabilimento industriale di produzione dell'acciaio, situato a nord dello stabilimento a poche centinaia di metri dallo stesso;
- la centrale di teleriscaldamento della città di Aosta, alimentata a metano e situata a ovest dello stabilimento a poche decine di metri dallo stesso

Tali fonti di emissione provocano un impatto sulla qualità dell'aria locale per i seguenti inquinanti:

- autostrada: polveri, NO_x, CO, IPA, benzene
- stabilimento industriale di produzione dell'acciaio: polveri, metalli, NO_x, acidi inorganici
- centrale di teleriscaldamento; NO_x, CO.

Tali fonti di emissione non provocano pertanto impatti significativi sui composti organici volatili (COV) che sono oggetto delle misurazioni nell'ambiente indoor di interesse. Pertanto si può affermare che la presenza delle sorgenti outdoor non influisce sugli inquinanti che sono oggetto dello studio sperimentale.

10.1.3. Fonti di emissione indoor

Le fasi produttive che provocano l'emissione in atmosfera di COV sono:

- il trattamento di impregnazione sottovuoto dei semilavorati, condotto in autoclave, con utilizzo di una resina poliesteri, in occasione delle fasi di apertura dell'autoclave;

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



- la cottura di polimerizzazione della resina, successiva alla fase di impregnazione in autoclave, che viene condotta in n. 3 forni elettrici le cui emissioni vengono evacuate attraverso i rispettivi camini regolarmente autorizzati;
- la verniciatura a spruzzo, condotta molto raramente solo per alcuni lotti di prodotto, con applicazione di uno smalto verniciante a base solvente, che viene condotta all'interno di una cabina di verniciatura completamente chiusa collegata al camino E1;
- la finitura dei prodotti a seguito del processo di polimerizzazione della resina, che prevede la rimozione manuale dei colaticci e la pulizia di alcune parti del trasformatore mediante prodotti a base solvente applicati a pennello e l'applicazione superficiale di smalti.

Di queste fasi, quelle che hanno un potenziale impatto sulla qualità dell'aria indoor sono costituite dal trattamento di impregnazione con la resina in autoclave, in occasione delle operazioni di apertura dell'autoclave, e di finitura dei prodotti con applicazione di solvente a pennello, in quanto le emissioni non vengono captate da sistemi di aspirazione localizzata e si diffondono nell'ambiente.

Una ulteriore fonte di emissione, non propriamente legata al processo produttivo, è costituita dai gas di scarico degli automezzi durante le operazioni di carico e scarico dei materiali e dei prodotti finiti, nel corso delle quali viene aperto il portone di ingresso e gli automezzi si avvicinano all'ingresso in retromarcia. I motori degli automezzi vengono spesso mantenuti accesi, in alcuni casi per consentire il permanere del riscaldamento dell'abitacolo durante la stagione invernale, in altri casi per cattiva abitudine da parte degli operatori.

Le indagini condotte per l'igiene del lavoro ai sensi del Dlgs 81/2008 hanno rilevato che la concentrazione di COV in ambiente è molto bassa, molto inferiore ai livelli di rischio previsti. Dal punto di vista dell'igiene del lavoro, pur essendo previsto l'utilizzo da parte degli operatori di DPI individuali (guanti, tuta, mascherine monouso) durante le operazioni che comportano l'utilizzo di prodotti a base COV, non è stata ritenuta necessaria l'installazione di sistemi di aspirazione localizzata.

I principali COV contenuti nei solventi per la pulizia superficiale dei prodotti semifiniti e negli smalti utilizzati per la finitura sono indicati nella tabella seguente.

| COMPOSTI ORGANICI VOLATILI CONTENUTI NEI PRODOTTI UTILIZZATI NEL CICLO PRODUTTIVO | |
|---|---|
| DILUENTE PER PULIZIA PRODOTTI SEMIFINITI | Alcol isobutilico (15-20%) Acetato di n-butile (12,5 – 15%) 1,2,4-trimetilbenzene (1-3%) Xileni (1-3%) |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | |
|----------------------|--|
| | 1,3,5-trimetilbenzene (0,5-1%) |
| SMALTO TIPO 1 | n-ottano (30-40%) xilene (20-25%) nafta solvente (20-25%) acetato di isobutile (3-5%) Alcol isobutilico (1-3%) |
| SMALTO TIPO 2 | Nafta solvente (40-50%) Xilene (1-3%) |

I vapori di COV presenti nell'aria ambiente indoor dell'area produttiva trafileano anche nelle altre aree dello stabilimento e in particolare negli uffici. Tra l'ufficio in cui sono state condotte le prove sperimentali (indicato con la freccia verde nella figura qui sopra) e l'area produttiva vi sono 2 locali intermedi costituiti da un magazzino e un corridoio separati da porte: questo attutisce sensibilmente ma non evita la presenza nell'aria indoor degli uffici dei COV utilizzati nella produzione, la cui presenza è chiaramente percepibile a livello olfattivo.

Le concentrazioni dei COV sono sensibilmente maggiori nella stagione invernale in quanto le finestre e i portoni dell'edificio dell'area produttiva vengono mantenuti quasi sempre chiusi e pertanto il ricambio dell'aria avviene con frequenza minore, comportando un maggiore effetto di accumulo di inquinanti nell'aria indoor.

10.1.4. Frequentazione

Il locale è frequentato in relazione all'orario di lavoro, previsto su due turni dalle 6 alle 22 dal lunedì al venerdì e il sabato mattina dalle 6 alle 14.

10.1.5. Aerazione

I tre forni per la cottura di polimerizzazione della resina sono collegati ai rispettivi tre camini per l'evacuazione all'esterno delle emissioni che si sviluppano durante il processo di cottura.

Anche la cabina di verniciatura è completamente chiusa e dotata di una sistema di aspirazione con convogliamento all'esterno delle emissioni.

Il locale dell'area produttiva e gli uffici sono privi di sistemi di ventilazione meccanica controllata e l'aerazione avviene mediante apertura delle finestre, attuata manualmente dai lavoratori stessi. Occasionalmente, soprattutto al mattino, si ha ingresso di aria esterna nell'area produttiva a



seguito dell'apertura del portone di ingresso degli automezzi di carico e scarico dei materiali e dei prodotti finiti.

10.1.6. Risultati dell'indagine conoscitiva preliminare

Prima di procedere alla conduzione dello studio sperimentale di fitodepurazione dell'aria indoor, si è proceduto ad effettuare una indagine preliminare finalizzata a verificare la presenza nell'ambiente delle sostanze attese in base all'analisi del processo produttivo e a individuare i punti più idonei nei quali condurre le misure dei COV aerodispersi.

Le prove sono state condotte nel mese di maggio, nelle effettive condizioni di aerazione degli ambienti indoor adottate dai lavoratori in relazione alla stagione in corso.

I punti di misura individuati per l'indagine conoscitiva preliminare sono i seguenti (Figura 2):

- Punto P1: zona finiture manuali
- Punto P2: cabina centrale
- Punto P3: soppalco affacciato sull'area produttiva
- Punto P4: bocca dell'autoclave
- Punto P5: uscita dello sfiato dell'autoclave utilizzata per l'impregnazione con la resina
- Punto P6: apertura forni di polimerizzazione della resina
- Punto U: interno dell'ufficio
- Punto E: esterno dell'edificio.

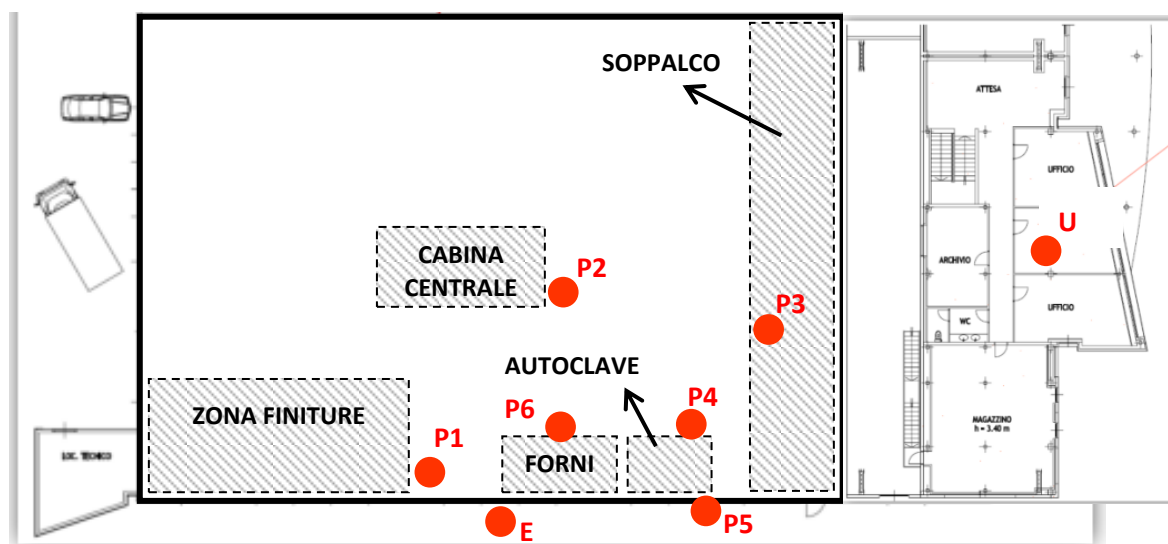


Figura 2 – Punti di misura dell'indagine conoscitiva preliminare

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Dall'analisi del processo produttivo si è ipotizzato che le zone dell'ambiente indoor nelle quali si possono avere le maggiori concentrazioni di COV sono quelle in cui vengono condotte le operazioni di finitura (punto P1) e la zona nella quale è posizionata l'autoclave (punto P4).

Per verificare questa ipotesi è stata condotta una indagine conoscitiva con il rilevatore portatile PID modello Phocheck 5000 effettuando misure di breve periodo (alcuni minuti) in varie zone dell'area produttiva durante diversi momenti della giornata.

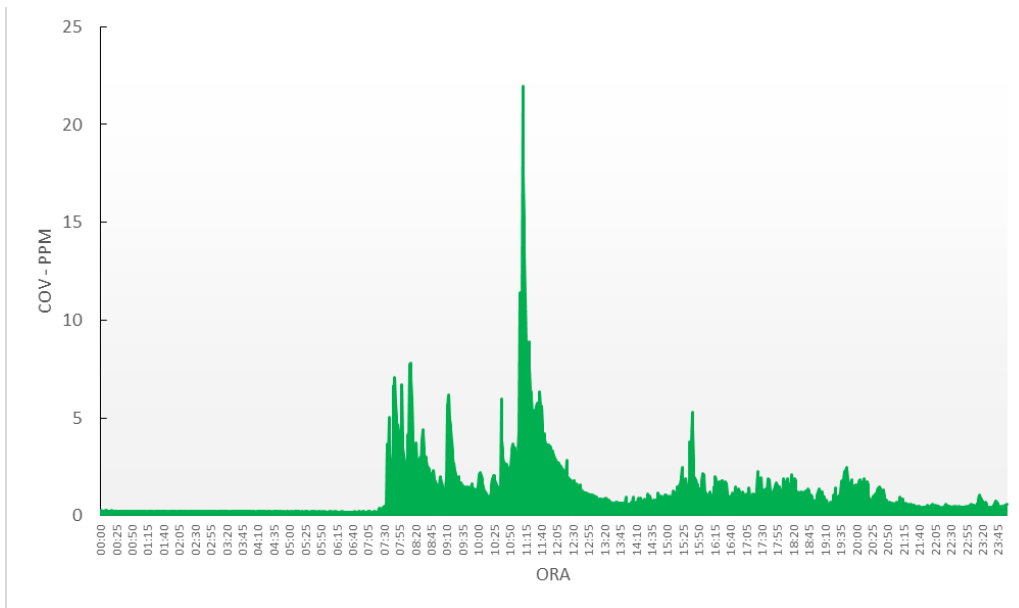
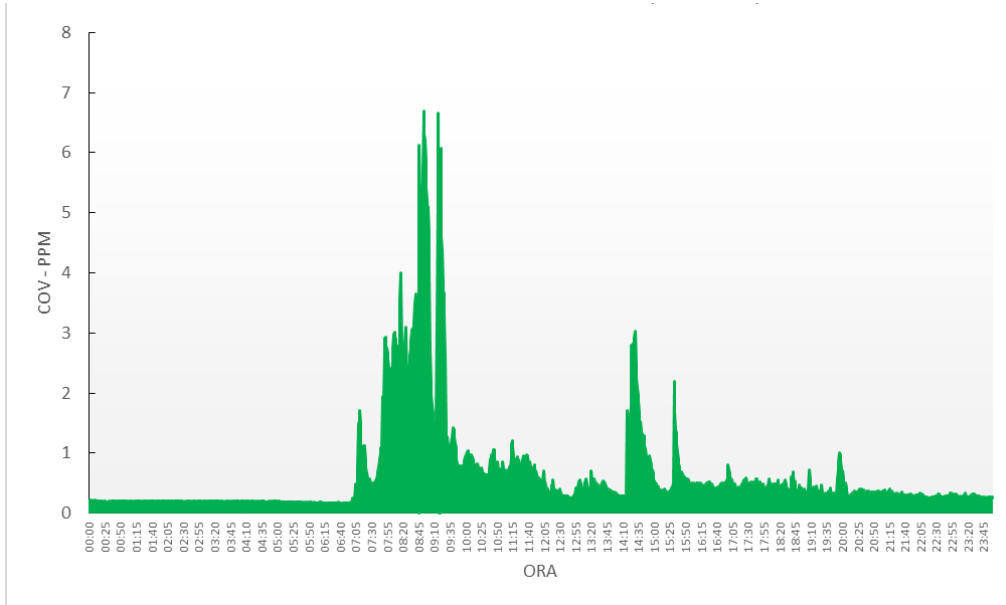
Tale indagine ha permesso di ricostruire le dinamiche di dispersione dei COV nell'aria indoor di seguito descritte:

- le operazioni di finitura con utilizzo di prodotti al solvente comportano aumenti sensibili del valore di fondo di COV totali dell'ambiente indoor;
- la zona dell'area produttiva in cui si hanno valori mediamente più alti sono quelle dell'area finiture (punto P1), mentre nel resto dell'ambiente si misura un valore di fondo pressoché costante in tutte le zone, già a partire da pochi metri di distanza dall'area finiture stessa;
- le operazioni di apertura dell'autoclave e dei forni di polimerizzazione non comportano emissione significativa di COV totali, in quanto il rilevatore, posizionato in diretta prossimità della bocca dell'autoclave (punto P4) e delle aperture dei forni (punto P6), non ha mostrato variazioni apprezzabili della concentrazione di COV totali rispetto al valore di fondo dell'ambiente indoor.

Nella zona finiture (punto P1) è stato successivamente condotto un monitoraggio dei COV totali con il rilevatore PID di tipo passivo (CORVUS) per un periodo continuativo di una settimana al fine di ricostruire le dinamiche emissive dei COV durante le operazioni di finitura.

Nei grafici seguenti sono riportati i risultati delle misure effettuate con lo strumento CORVUS nel punto P1 in quattro diverse giornate lavorative dalle 0:00 alle 24:00.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor

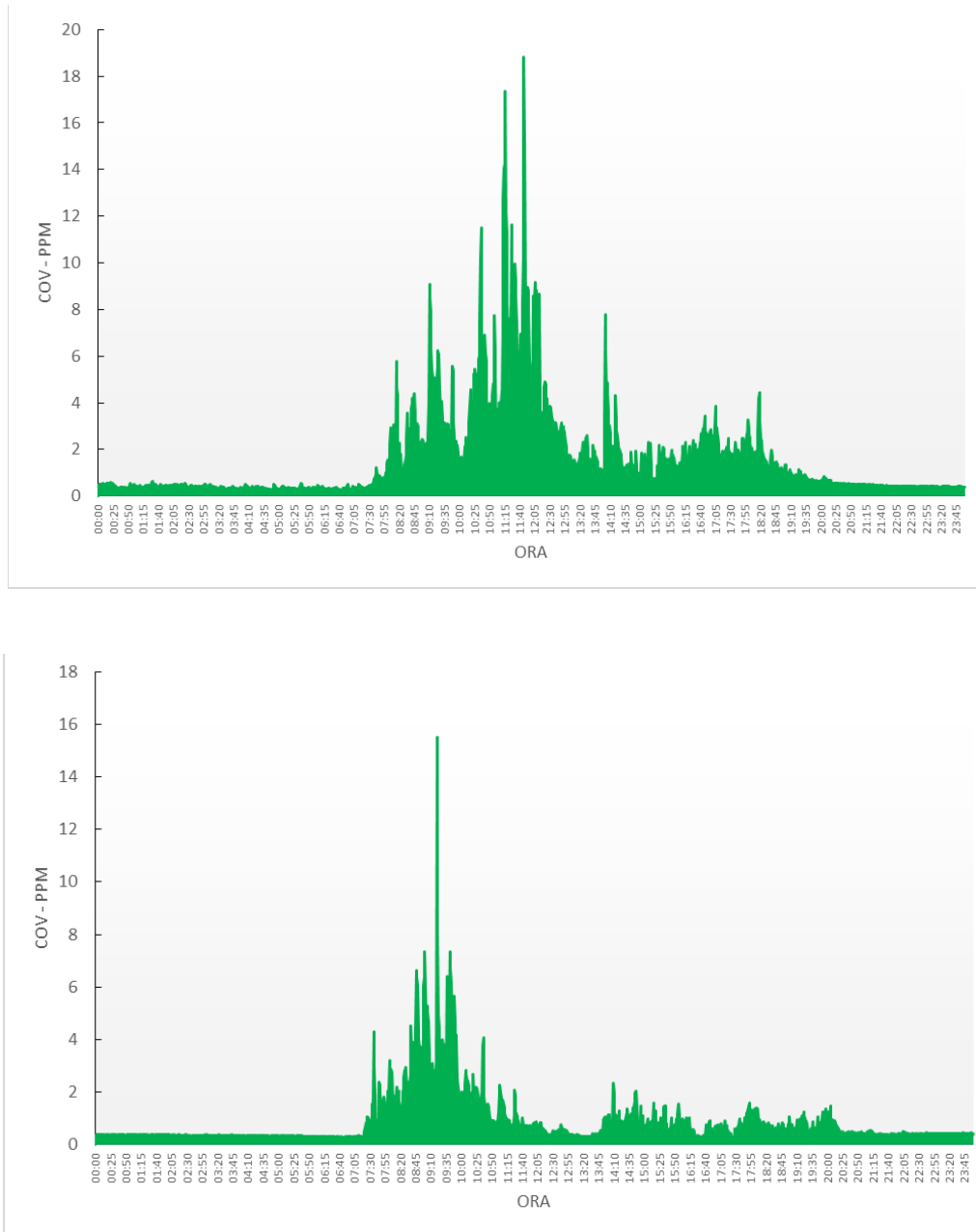


Figura 3 – Risultati delle misure condotte con analizzatore di COV ambientale CORVUS in diverse giornate lavorative in prossimità della zona finiture (punto P1)

Le misure condotte con il CORVUS dimostrano che la concentrazione di COV nella zona finiture è più alta durante il periodo lavorativo della giornata, compreso tra le 6 e le 22 (il ciclo lavorativo prevede due turni di 8 ore), rispetto al periodo notturno di inattività.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



I valori di picco più elevati, compresi tra 4 e 20 ppm, hanno durata molto breve (pochi minuti) e si verificano tra le 7 e le 9, periodo nel quale sono più frequenti le operazioni di finitura condotte sui trasformatori successivo al trattamento di polimerizzazione della resina condotto nei forni.

Un innalzamento dei valori di COV si ha anche nel pomeriggio, sebbene a livelli inferiori rispetto al mattino, in relazione ad operazioni di finitura condotte comunque in maniera meno intensa.

Nel periodo notturno di inattività della produzione, tra le 22 e le 6 del mattino, si osserva un profilo piatto di concentrazione dei COV con un valore di fondo inferiore a 1 ppm.

Nell'ultima fase dell'indagine conoscitiva preliminare sono state condotte delle misure di COV aerodispersi con utilizzo dei campionatori passivi nei punti P1, P2, P3, P5, U, E. I risultati sono riportati nella tabella seguente.

| CAMPAGNA INIZIALE DI INDAGINE CONOSCITIVA | P1 ZONA FINITURE | P2 CABINA CENTRALE | P3 SOPPALCO | P5 USCITA SFIATO AUTOCLAVE | U UFFICIO | E ESTERNO |
|---|--|--------------------|-------------|----------------------------|-----------|-----------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | | | |
| alcool sec-butilico | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,28 | 0,18 | 0,17 |
| metilcicloesano | 162,97 | 48,36 | 66,99 | 17,50 | 6,92 | 0,13 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 82,45 | 23,71 | 33,71 | 39,77 | 1,95 | 0,10 |
| acetato di butile | 1214,37 | 330,44 | 474,18 | 101,36 | 43,62 | 1,94 |
| metilmetacrilato | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 14,72 | 0,24 | 0,23 |
| alcool isobutilico | 714,53 | 217,58 | 308,34 | 20,00 | 27,29 | 0,41 |
| alcool n-butilico | 7,57 | 5,80 | 5,60 | 6,14 | 3,31 | 0,14 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,22 | 0,15 | 0,14 |
| limonene | 72,85 | 18,90 | 26,17 | 0,31 | 4,66 | 0,60 |
| cicloesano | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,09 |
| cicloesano | 34,51 | 33,87 | 19,55 | 25,66 | 5,29 | 0,26 |
| n-decano | 278,95 | 82,30 | 96,94 | 102,05 | 11,76 | 0,47 |
| n-dodecano | 113,38 | 42,01 | 55,27 | 64,47 | 8,30 | 3,33 |
| n-eptano | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,25 | 0,23 |
| n-esano | 3,05 | 8,64 | 3,02 | 2,22 | 1,08 | 0,48 |
| n-nonano | 138,37 | 39,45 | 49,88 | 35,28 | 5,91 | 0,38 |
| n-ottano | 39,56 | 12,44 | 16,46 | 5,66 | 1,96 | 0,29 |
| n-pentano | 8,24 | 8,24 | 7,97 | 2,50 | 2,33 | 0,74 |
| n-undecano | 452,29 | 138,17 | 174,31 | 147,55 | 23,34 | 1,29 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 60,17 | 25,68 | 32,22 | 20,02 | 5,45 | 0,33 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 11,00 | 4,54 | 4,40 | 0,36 | 0,63 | 0,22 |
| benzene | 8,55 | 12,64 | 8,43 | 4,43 | 1,39 | 0,13 |
| etilbenzene | 255,85 | 72,89 | 105,69 | 32,83 | 12,76 | 0,44 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | | | |
|-----------------------|--|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| isopropilbenzene | 51,45 | 12,05 | 14,87 | 15,93 | 2,55 | 0,24 |
| stirene | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 302,88 | 0,18 | 0,17 |
| toluene | 23,44 | 19,83 | 23,85 | 44,73 | 5,89 | 1,07 |
| xileni (o,m,p) | 785,98 | 220,92 | 330,68 | 120,97 | 39,16 | 1,60 |
| acetato di etile | 11,06 | 14,68 | 13,66 | 9,87 | 2,34 | 0,19 |
| acetato di isobutile | 69,86 | 22,50 | 32,65 | 4,89 | 3,38 | 0,10 |
| acetato di isopropile | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,21 | 0,13 | 0,12 |
| acetato di metile | 2,28 | 5,07 | 2,86 | 6,45 | 1,71 | 0,09 |
| acetato di propile | 0,12 | 0,49 | 1,10 | 16,58 | 0,12 | 0,11 |
| metossietile acetato | 22,30 | 6,27 | 8,55 | 0,40 | 0,81 | 0,24 |
| ALDEIDI | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | | | |
| formaldeide | 22,63 | 15,27 | 18,57 | 69,53 | 9,26 | 4,16 |
| acetaldeide | 4,54 | 3,63 | 3,68 | 0,23 | 4,35 | 1,72 |
| acroleina | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,12 | n.r. | n.r. |
| propanale | n.r. | n.r. | n.r. | 1,84 | n.r. | 1,08 |
| benzaldeide | 2,05 | 2,73 | 2,39 | 0,13 | n.r. | n.r. |
| pentanale | 1,29 | 0,82 | 0,83 | 0,14 | 0,82 | n.r. |
| esanale | 20,18 | 13,74 | 11,54 | 3,84 | 5,18 | 4,16 |
| COV TOTALI | 4677 | 1465 | 1956 | 1242 | 245 | 28 |

Le misure con i campionatori passivi confermano che la zona finiture è quella in cui si ha la presenza di COV in concentrazioni più elevate rispetto alle altre zone dell'area produttiva. Le concentrazioni misurate nel punto P2, posizionato al centro dell'ambiente, e nel punto P3, posizionato in zona periferica a pochi metri dal soffitto dell'edificio, risultano tra loro confrontabili, con valori leggermente più elevati nel punto P3. Tale effetto è probabilmente legato ad un fenomeno di accumulo degli inquinanti gassosi nella parte alta della volumetria del capannone a causa della volatilità dei COV e della stratificazione dell'area calda più leggera che tende a stagnare nella parte alta dell'edificio a causa anche della mancanza di un sistema di estrazione dell'aria a soffitto.

Le misure condotte all'uscita dello sfiato dell'autoclave (P5) dimostrano che i vapori che si sviluppano durante il processo di impregnazione dei trasformatori con la resina contengono concentrazioni non rilevanti di COV, ad eccezione dello stirene e della formaldeide, che comunque non danno un contributo sensibile alla somma dei COV totali in rapporto a quanto misurato nell'aria indoor. Pertanto l'autoclave non risulta essere una fonte di emissione significativa per l'ambiente indoor oggetto dell'indagine.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Nel punto E localizzato immediatamente all'esterno del capannone quasi tutti i COV ricercati sono risultati inferiori al limite di rilevabilità del metodo di misura, riscontrando la presenza in tracce di alcune sostanze provenienti dall'ambiente indoor stesso. Si è pertanto esclusa la presenza di fonti di inquinamento esterne per i COV e questo ha trovato conferma anche nelle prove sperimentali successive, in occasione delle quali è stata sempre condotta una misura in parallelo all'esterno.

10.1.7. Risultati delle prove sperimentali condotte nell'area produttiva

Nel progettare le prove sperimentali finalizzate a verificare l'efficacia della fitodepurazione è emersa da subito la problematica legata alla notevole volumetria dell'ambiente indoor dell'area produttiva. È stato dimostrato anche da altri studi che l'utilizzo delle piante per ridurre i livelli di sostanze inquinanti presenti nell'aria può avere successo in ambienti di dimensioni limitate.²³

Considerando che il volume dell'area produttiva è di circa 12000 m³ e che era stato previsto l'utilizzo di un numero minimo di 1 pianta di taglia media (50 cm di altezza) ogni 10 m³ di volume, sarebbe stato necessario impiegare circa 1200 piante con costi troppo elevati rispetto al budget a disposizione per il progetto sperimentale.

Al di là dei costi, la presenza di un numero di piante così elevato all'interno dell'area produttiva presenterebbe delle problematiche di natura logistica in relazione all'onerosità delle operazioni di manutenzione, in particolare per l'irrigazione delle piante stesse. Inoltre, un così elevato numero di piante provocherebbe la presenza di materiale organico all'interno dell'area produttiva (foglie secche, particelle di terriccio, piccoli insetti) che potrebbe creare condizioni favorevoli all'aumento di materiale polverulento in sospensione nell'aria che sarebbe incompatibile con le esigenze di condizioni di pulizia tipiche dell'industria elettrica ed elettronica.

Tenendo conto di tali elementi, quale soluzione pratica da adottare per l'applicazione della fitodepurazione nel contesto specifico si è ipotizzata la costruzione di una struttura aperta all'interno nell'area produttiva in cui condurre le operazioni di finitura, che, a seguito dell'indagine preliminare, sono risultate le più impattanti per l'emissione di COV in ambiente.

La struttura potrebbe essere costituita da scaffali aperti sui quali alloggiare le piante fitodepuranti. In tal modo si verrebbe a creare un microambiente all'interno dell'area produttiva nel quale le piante potrebbero andare a sottrarre dall'aria ambiente i COV generati durante le operazioni di finitura in vicinanza della fonte emissiva, evitando la dispersione di tali composti nel restante ambiente indoor.

²³ DINGLE P., TAPSELL P. & HU S., 2000, "Reducing formaldehyde exposure in office environments using plants",

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Una volta concepita l'idea per l'applicazione operativa della fitodepurazione dell'aria indoor, si è reso necessario verificare la potenziale efficacia della stessa, cercando di creare nella realtà in qualche modo le condizioni di progetto, compatibilmente con le risorse economiche a disposizione e in modo da mantenere condizioni di compatibilità con il ciclo produttivo.

Si è pertanto scelto di realizzare nei pressi della zona finiture una struttura a forma di parallelepipedo poggiante su un pedana (di seguito denominata "cubo"), sulla quale alloggiare un certo numero di piante molto vicine tra loro, in modo da circoscrivere un volume di aria ambiente circondato da piante fitodepuranti. La struttura è stata dotata di impianto di irrigazione automatizzata per le piante (Figura 4).



Figura 4 – Struttura di alloggiamento ("cubo") delle piante utilizzate per il progetto sperimentale di fitodepurazione

Sono state effettuate misure di COV con campionatori passivi contemporaneamente all'interno e all'esterno della struttura con l'obiettivo di valutare un eventuale effetto di abbattimento dei COV da parte delle piante.

Sono state condotte complessivamente 6 prove di misura sperimentali: 2 nel periodo estivo e 4 nel periodo invernale. Il numero di prove sperimentali è stato aumentato nel periodo invernale per poter disporre di una base statistica di dati più ampia.

In ogni campagna di misura i campionatori passivi sono rimasti esposti per 10-15 giorni per i COV e per 7 giorni per le aldeidi, in relazione alle diverse indicazioni del produttore dei campionatori passivi dedicati alle due diverse sostanze.

Per la valutazione dei risultati si fa riferimento alla concentrazione di COV totali misurate contemporaneamente all'interno e all'esterno del "cubo" (Figura 5). I valori di concentrazione dei singoli composti sono riportati nell'Allegato 1.

In generale non si osservano differenze significative tra i valori misurati all'interno del "cubo" e quelli misurati all'esterno. I valori di COV totali nel periodo invernale sono superiori a quelli del

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



periodo estivo, come è logico attendersi in relazione al maggiore ricambio d'aria dell'ambiente indoor attuato nel periodo estivo.

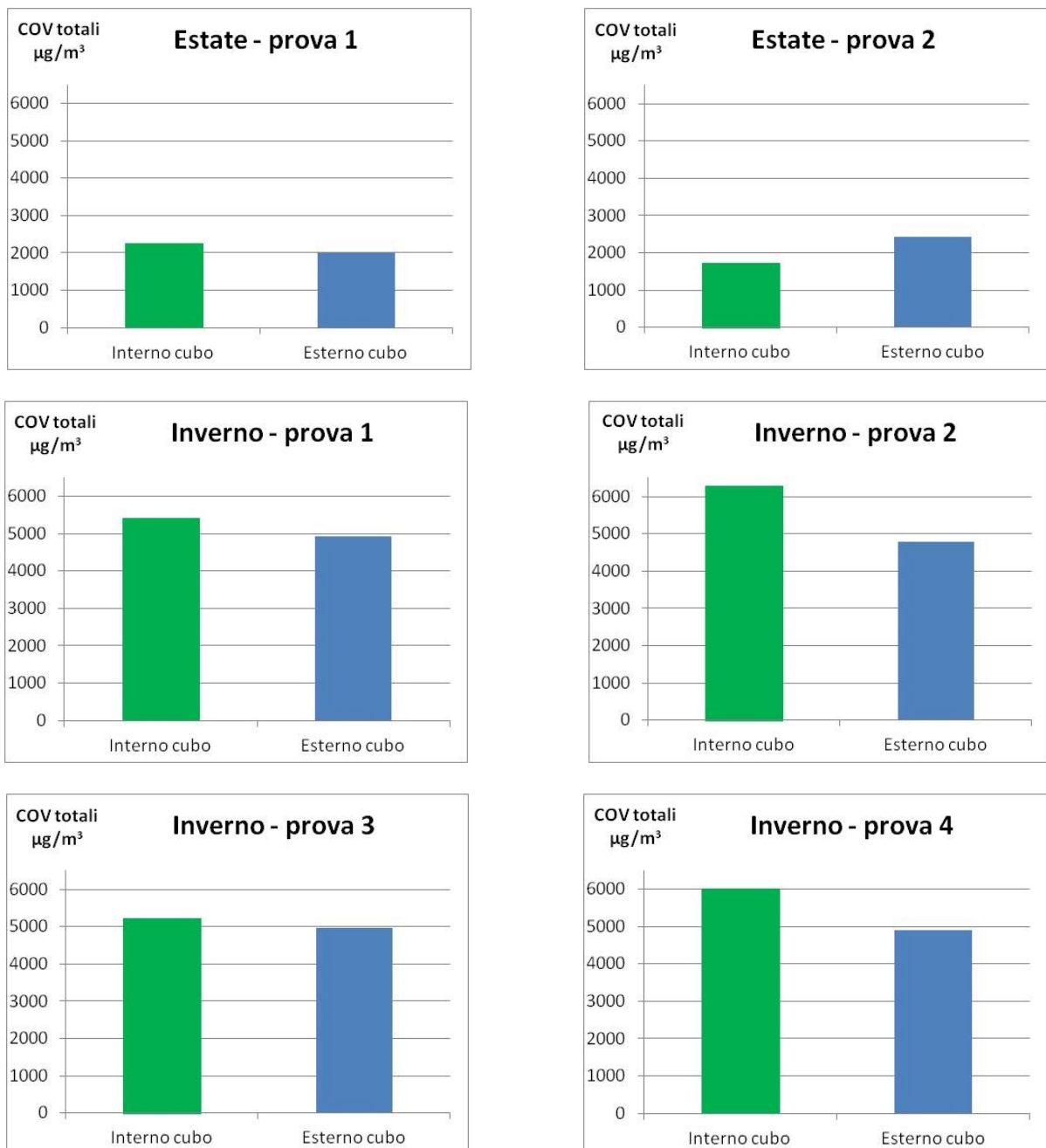


Figura 5 – Risultati delle prove sperimentali condotte all'interno e all'esterno del "cubo". Non si rileva una differenza significativa dei valori di COV totali nei due punti di misura nelle diverse prove

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Pertanto le prove sperimentali non hanno rivelato un effetto di rimozione dei COV dall'ambiente da parte delle piante.

Questo è probabilmente dovuto al fatto che nei pressi dell'area finiture le concentrazioni di COV aumentano bruscamente quando vengono utilizzati solventi e le piante non risultano efficaci nell'abbattimento di picchi di concentrazione. L'azione fitodepurativa riesce ad essere efficace in condizioni più stazionarie, in situazioni in cui le concentrazioni di COV variano molto meno rapidamente.

È necessario inoltre rilevare che l'aria ambiente indoor del reparto produttivo è piuttosto polveroso (concentrazione misurata in ambiente interno pari a $5000 \mu\text{g}/\text{m}^3$) e questo ha provocato la deposizione progressiva di uno strato di polvere sulla superficie delle foglie. Questo potrebbe aver sfavorito il processo di adsorbimento dei COV presenti nell'aria da parte delle foglie.

10.1.8. Risultati delle prove sperimentali condotte nell'ufficio adiacente all'area produttiva

In primo luogo è stato condotto un monitoraggio della concentrazione di COV totali con l'analizzatore PID modello Corvus. I risultati (Figura 6) hanno dimostrato che la concentrazione dei COV rimane inferiore a 0,2 ppm, valore coerente con quanto riscontrato nell'indagine preliminare condotta con i campionatori passivi di tipo diffusivo.

La concentrazione di COV rimane pressoché costante per tutta la giornata, al contrario di quanto riscontrato nell'area produttiva.

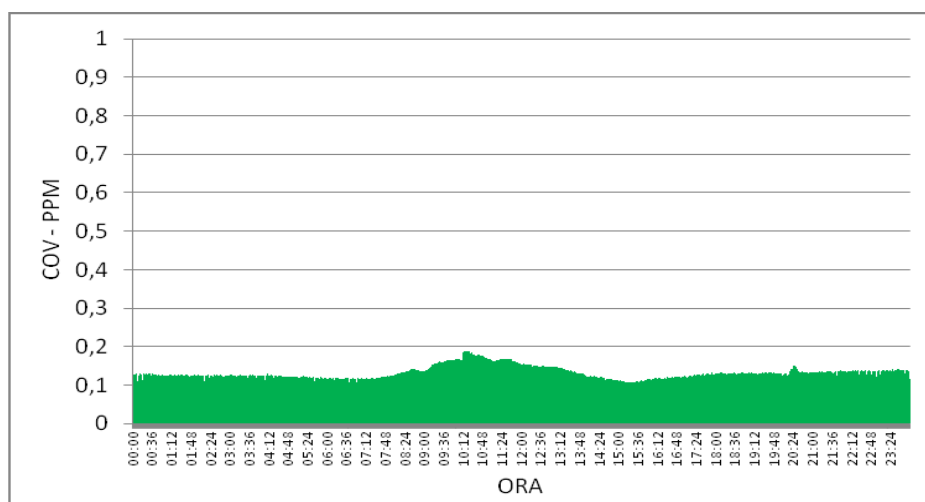


Figura 6 – Risultati delle misure condotte con analizzatore di COV ambientale CORVUS in una giornata lavorativa all'interno dell'ufficio adiacente all'area produttiva (punto U)

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Ai fini della conduzione dell'indagine sperimentale il numero delle piante da alloggiare è stato individuato in relazione alla disponibilità di spazio all'interno del locale, in modo da garantire il normale svolgimento dell'attività lavorativa.

È stato scelto un mix di piante di varia tipologia tra quelle individuate come dotate di capacità fitodepurativa per gli inquinanti aeriformi. Sono state utilizzate piante di medie dimensioni (altezza 50-100 cm) con buona dotazione fogliare.

Nella tabella seguente è riportato l'elenco della tipologia e del numero di piante alloggiate nell'ufficio.

| TIPOLOGIA E NUMERO DI PIANTE ALLOGGiate ALL'INTERNO DELL'UFFICIO | |
|--|----|
| Potus | 9 |
| Ficus | 3 |
| Grasse | 4 |
| Dracena | 3 |
| Calanthea | 2 |
| Defenbachia | 1 |
| TOTALE | 22 |

Considerando che il volume dell'ufficio è di 85 m³, il numero di piante alloggiato è di circa 4 piante di medie dimensioni (altezza 50-100 cm) per m³.

Le prove sperimentali condotte con i campionatori passivi nel periodo estivo hanno dimostrato un effetto evidente di rimozione dei COV da parte delle piante, riscontrando una sensibile diminuzione della concentrazione totale di COV in presenza di piante (Figura 7).

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor

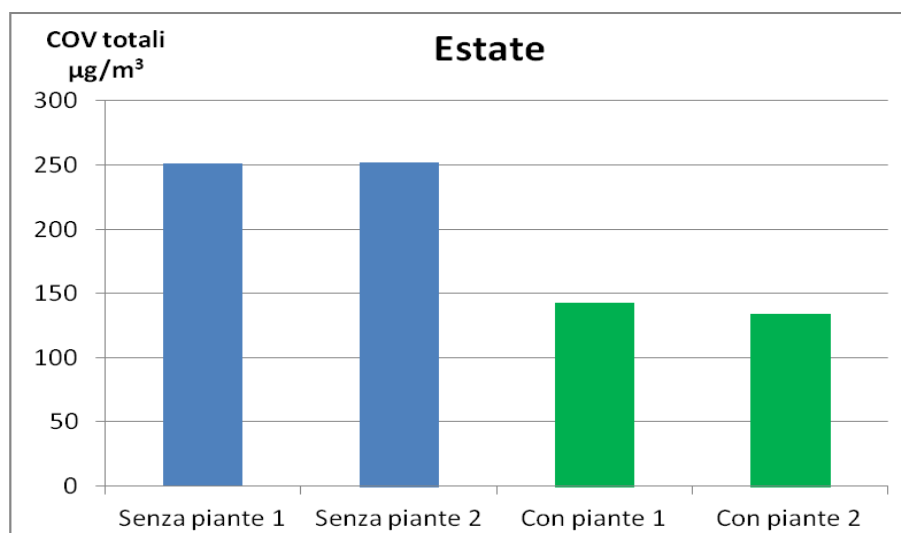


Figura 7 – Risultati delle prove sperimentali condotte all'interno dell'ufficio senza la piante e con le piante nel periodo estivo. Si osserva una evidente diminuzione della concentrazione di COV totali in presenza di piante

Nella tabella seguente vengono riportati i valori medi di COV totali e dei composti presenti in maggiore concentrazione nell'ufficio misurati in assenza di piante e con le piante. L'effetto di fitodepurazione ha comportato una diminuzione del 60-70% per i singoli composti e del 45% per i COV totali.

| UFFICIO ADIACENTE ALL'AREA PRODUTTIVA CAMPAGNA DI MISURA ESTIVA | SENZA PIANTE | CON PIANTE | DIMINUZIONE |
|---|-------------------|-------------------|-------------|
| | µg/m ³ | µg/m ³ | % |
| COV totali | 247 | 135 | -45% |
| acetato di butile | 37 | 15 | -60% |
| alcol isobutilico | 27 | 9 | -68% |
| n-dodecano | 33 | 10 | -71% |
| n-undecano | 28 | 11 | -62% |
| xileni (o.m.p) | 44 | 17 | -61% |

Nel periodo invernale sono state condotte prima le prove sperimentali con le piante e successivamente le prove senza piante. Questa scelta è stata dettata da ragioni logistiche, al fine di limitare lo spostamento delle piante dall'ufficio.

Nella prima prova invernale con le piante la concentrazione di COV è risultata confrontabile rispetto a quanto riscontrato nelle due precedenti prove estive con le piante.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Nella seconda prova invernale con le piante, invece, la concentrazione di COV è risultata sensibilmente più elevata rispetto alle prove precedenti senza piante e confrontabile con il valore misurato nella prima prova invernale successiva senza piante (Figura 8).

Questo significa che nella seconda prova invernale le piante non hanno avuto alcun effetto di rimozione dei COV.

Si osserva inoltre che i valori di COV delle prove invernali senza piante risultano sensibilmente più elevati rispetto ai valori rilevati nelle prove estive senza piante. Questo è sicuramente da imputare alla gestione dei ricambi d'aria del periodo invernale, durante il quale le finestre vengono aperte molto più raramente rispetto al periodo estivo e i periodi giornalieri di apertura delle finestre diminuiscono con il diminuire della temperatura esterna.

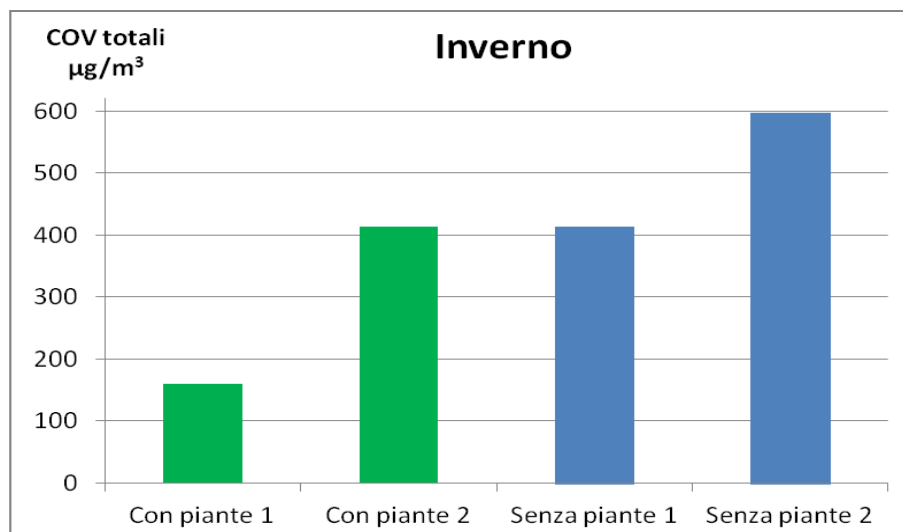


Figura 8 – Risultati delle prove sperimentali condotte all'interno dell'ufficio senza la piante e con le piante nel periodo invernale

Perché nella seconda misura invernale le piante non hanno avuto alcun effetto di rimozione dei COV aerodispersi?

La motivazione appare legata ad una drastica diminuzione delle ore di esposizione solare nella seconda prova. Lo stabilimento industriale è posto nel fondo valle e durante il periodo invernale il sole viene coperto dalla montagna posta a sud per un periodo orario sempre più lungo mano a mano che si abbassa l'altezza del sole sull'orizzonte. A partire da una certa data la traiettoria del sole all'orizzonte si abbassa a tal punto da risultare quasi completamente coperta dal profilo della montagna posta a sud rispetto allo stabilimento. Dall'analisi della traiettoria del sole risulta che tale data cade nella prima settimana di novembre, ovvero proprio in coincidenza dell'inizio della seconda misura con le piante. Pertanto nella seconda misura con le piante il periodo di

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



esposizione dei campionatori passivi è stato caratterizzato da giornate con durata di esposizione solare molto inferiore rispetto alla prima misura invernale con le piante.

Pertanto si può affermare che nell'ufficio le piante hanno dimostrato una efficacia evidente sulla rimozione dei COV e che la radiazione solare ha avuto un effetto determinante sulla capacità di rimozione dei COV da parte delle piante. Nei periodi invernali in cui l'esposizione solare cala drasticamente la capacità di rimozione dei COV aerodispersi da parte delle piante è praticamente nulla.

10.2. GABBIOTTO DI UNA STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE

10.2.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor

L'ambiente indoor è costituito da un gabbiotto annesso ad una stazione di rifornimento di carburante per autotrazione. Il gabbiotto è su un unico piano a livello campagna, ha un'area di circa 25 m² e un volume di circa 75 m³ ed è localizzato a pochi metri dagli erogatori di rifornimento.

10.2.2. Fonti di emissione outdoor

La principale fonte di emissione outdoor è costituita dalla presenza degli erogatori di rifornimento dai quali si hanno emissioni diffuse di vapori di benzina e di gasolio che si sviluppano sia durante le normali operazioni di rifornimento, sia durante le operazioni di caricamento dei serbatoi interrati, sia a seguito di sversamenti accidentali di piccole quantità di carburante.

Un'altra potenziale fonte di emissione locale è costituita dal traffico stradale che scorre sulla statale 26 della Valle d'Aosta lungo la quale è posta la stazione di rifornimento, caratterizzata da un flusso di veicoli piuttosto intenso.

10.2.3. Fonti di emissione indoor

L'ambiente indoor è caratterizzato dalla presenza di una serie di prodotti legati al mercato della cura e manutenzione dell'automobile che contengono solventi e composti organici volatili, costituiti da: liquidi lavavetri, olii minerali, prodotti di pulizia degli interni dell'auto, profumatori diffusivi, salviette umidificate.

Tutti i prodotti sono conservati ordinatamente sugli scaffali che occupano le pareti del locale, in contenitori chiusi. Tuttavia all'interno del locale è percepibile olfattivamente la presenza nell'aria indoor di composti organici volatili riconducibili ai prodotti stoccati.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



10.2.4. Frequentazione

Il locale è frequentato in relazione all'orario di lavoro, previsto dal lunedì al sabato dalle ore 7:30 alle ore 12:30 e dalle ore 15:00 alle ore 19.

Oltre ai gestori della stazione di rifornimento che permangono all'interno del locale per l'intera durata della giornata lavorativa, il locale viene frequentato anche dai clienti che vi permangono per alcuni minuti.

10.2.5. Aerazione

Il locale è dotato di vetrate non apribili, da un condizionatore dell'aria per il raffrescamento estivo, che a detta degli operatori non viene quasi mai utilizzato, e da un ventilconvettore per il riscaldamento invernale.

Il ricambio dell'aria viene condotto mediante l'apertura dell'unica porta di ingresso, che viene aperta frequentemente durante le normali giornate di attività della stazione di servizio per via del passaggio dei clienti e degli operatori stessi. Durante il periodo estivo la porta viene mantenuta sempre aperta.

10.2.6. Risultati dell'indagine conoscitiva preliminare

Nell'indagine conoscitiva preliminare è stata condotta una misura mediante i radielli all'interno del gabbiotto.

| GABBIOTTO STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE INDAGINE INIZIALE | AMBIENTE INDOOR |
|---|--|
| COV | valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| alcool sec-butilico | 0,19 |
| metilcicloesano | 14,57 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,11 |
| acetato di butile | 2,85 |
| metilmetacrilato | 0,25 |
| alcool isobutilico | 0,16 |
| alcool n-butilico | 1,46 |
| alcool terz-butilico | 0,15 |
| limonene | 21,32 |
| cicloesano | 0,10 |
| cicloesano | 13,26 |
| n-decano | 0,51 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | |
|-----------------------|--|
| n-dodecano | 37,19 |
| n-eptano | 6,11 |
| n-esano | 2,11 |
| n-nonano | 1,82 |
| n-ottano | 1,38 |
| n-pentano | 0,26 |
| n-undecano | 5,89 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 9,14 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 2,52 |
| benzene | 5,03 |
| etilbenzene | 5,66 |
| isopropilbenzene | 1,38 |
| stirene | 0,18 |
| toluene | 20,98 |
| xileni (o,m,p) | 11,66 |
| acetato di etile | 0,13 |
| acetato di isobutile | 0,11 |
| acetato di isopropile | 0,14 |
| acetato di metile | 0,09 |
| acetato di propile | 0,12 |
| metossietile acetato | 0,26 |
| ALDEIDI | valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| formaldeide | 7,09 |
| acetaldeide | 6,26 |
| acroleina | 0,08 |
| propanale | n. d. |
| benzaldeide | n. d. |
| pentanale | n. d. |
| esanale | 1,25 |
| COV TOTALI | 182 |

Dall'indagine iniziale emerge la presenza di alcuni composti in concentrazione compresa tra 10 e 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, comprendenti sia idrocarburi (metilcicloesano, cicloesano, n-dodecano) che composti organici presumibilmente legati ai prodotti esposti all'interno del gabbiotto (limonene, toluene, xileni).



10.2.7. Risultati delle prove sperimentali

Nelle figure seguenti sono riportati i grafici relativi alle prove sperimentali condotte nel locale indoor rispettivamente nel periodo estivo e in quello invernale.

I valori misurati nelle prove del periodo estivo sono molto variabili e non mostrano differenze tra i valori misurati in assenza e in presenza delle piante (Figura 9).

In particolare è risultato molto elevato il valore di COV misurato in estate nella prima prova con le piante, dovuto a concentrazioni più alte di oltre un ordine di grandezza per tutti i composti rilevati nelle prove precedenti. In particolare il valore del benzene in tale prova è risultato pari a circa $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a fronte di valori rilevati nelle altre prove compresi tra 3 e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Tale aumento di valori è stato ricondotto al fatto che, d'abitudine, i gestori della stazione di rifornimento provvedono a fine giornata e portare all'interno del locale il bidone dei rifiuti che durante l'orario di lavoro viene tenuto all'esterno. È presumibile che, in occasione della misura in questione, nel bidone fossero presenti rifiuti particolarmente contaminati, quali ad esempio carta e stracci bagnati di carburante oppure contenitori di prodotti per auto contenenti del prodotto residuo, provocando l'emissione di COV nell'ambiente indoor nei periodi di chiusura dell'attività con conseguente aumento delle concentrazioni medie rilevate con i campionatori diffusivi.

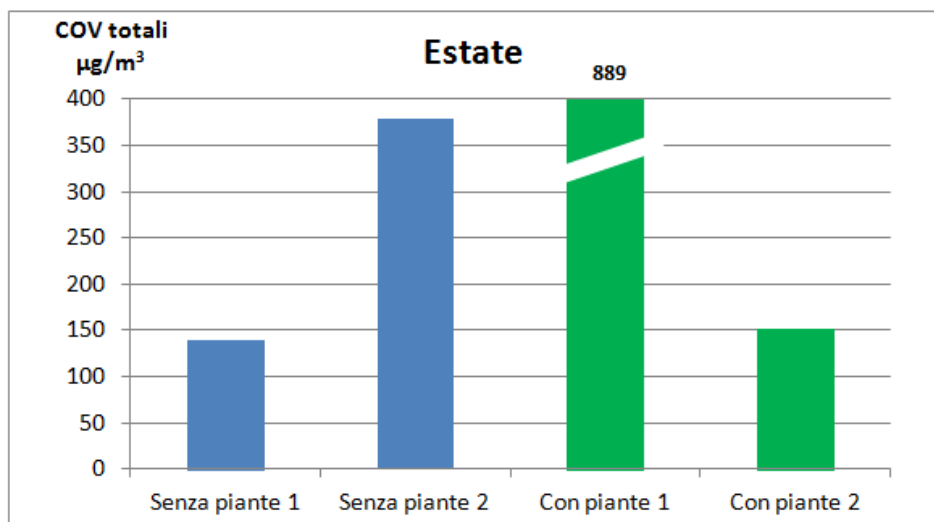


Figura 9 – Risultati delle prove sperimentali condotte all'interno del gabbiotto del benzinaio senza la piante e con le piante nel periodo estivo. I risultati della prova con piante n. 1 è stata influenzata dal rilascio di COV da parte di materiali contaminati nel bidone dei rifiuti portato all'interno del gabbiotto durante il periodo notturno di chiusura dell'attività.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Nelle prove invernali è stato eliminato l'elemento di interferenza, istruendo appositamente gli operatori sul tenere il bidone dei rifiuti all'esterno del gabbiotto anche nei periodi di chiusura dell'attività.

I valori di COV nelle prove invernali presentano una variabilità molto inferiore rispetto alle prove estive, ma non mostrano un effetto di rimozione dei COV da parte delle piante (Figura 10).

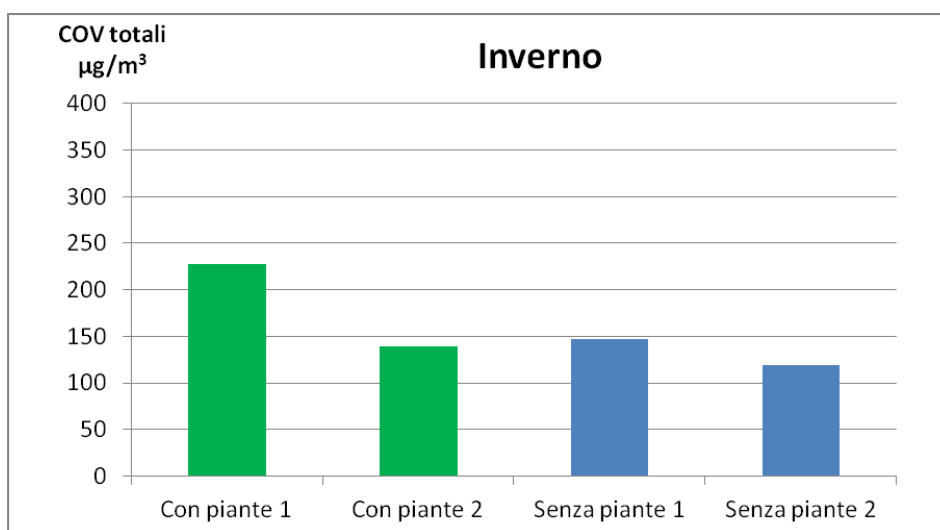


Figura 10 – Risultati delle prove sperimentali condotte all'interno del gabbiotto del benzinaio senza la piante e con le piante nel periodo invernale. Non si osservano variazioni consistenti dei valori di COV in presenza delle piante

Si rileva che non si osservano differenze sensibili tra i valori misurati nel periodo estivo e quelli misurati nel periodo invernale, pertanto la diversa gestione delle aperture del locale in relazione alla stagione non è un elemento di influenza per la qualità dell'aria indoor in questo caso.

Per quanto riguarda l'esposizione al benzene, che costituisce il rischio principale per chi lavora nelle stazioni di rifornimento di carburante, escludendo la prima prova con le piante del periodo estivo caratterizzata come già detto dal fenomeno di inquinamento dovuto alla presenza del bidone di rifiuti, i valori di benzene misurati sono risultati compresi tra 3 e 10 µg/m³, con un valore medio di 5 µg/m³, di molto inferiore al valore limite previsto di esposizione professionale di 3,25 mg/m³ (3250 µg/m³) previsto dal Dlgs 81/2008 e pari al valore limite previsto dal DLgs 155/2010 per la qualità dell'aria esterna.



10.3. SALONE DI UN PARRUCCHIERE

10.3.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor

L'ambiente indoor è costituito da un salone di un parrucchiere con un'area di circa 30 m² e un volume di circa 90 m³, localizzato in prossimità di una strada interna di un piccolo paese situato alla periferia di Aosta, in una zona in cui vi sono molte case e alcune piccole attività commerciali (bar, tabaccaio).

10.3.2. Fonti di emissione outdoor

La principale fonte di emissione outdoor è costituita dal traffico veicolare della strada sulla quale si affaccia il locale, caratterizzata comunque da una intensità di transito medio-alta nel periodo centrale della giornata.

Una ulteriore fonte è costituita dagli impianti di riscaldamento domestico degli edifici civili vicini.

10.3.3. Fonti di emissione indoor

La presenza di COV nell'ambiente indoor è da ricondurre all'utilizzo di prodotti specifici dell'attività di parrucchiere, quali olii, creme, lacche spray ecc.

All'interno del locale è percepibile olfattivamente, anche se in maniera leggera, la presenza nell'aria indoor di composti organici volatili riconducibili a tali prodotti.

10.3.4. Frequentazione

Il locale è frequentato in relazione all'orario di lavoro, previsto dal martedì al sabato dalle ore 9 alle ore 18 con orario continuato.

10.3.5. Aerazione

Il locale è dotato di vetrate non apribili e da un sistema di condizionatore dell'aria per il raffrescamento estivo e da termosifoni per il riscaldamento invernale.

Il ricambio dell'aria viene condotto mediante l'apertura dell'unica porta di ingresso. Durante il periodo estivo la porta viene mantenuta sempre aperta.

10.3.6. Risultati dell'indagine conoscitiva

Sono state condotte due misurazioni all'interno del locale per indagare la presenza di COV legati all'attività di parrucchiere.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Il valore di COV totali è maggiore in inverno che in estate, come è logico attendersi in relazione alla minore aerazione del locale (Figura 11).

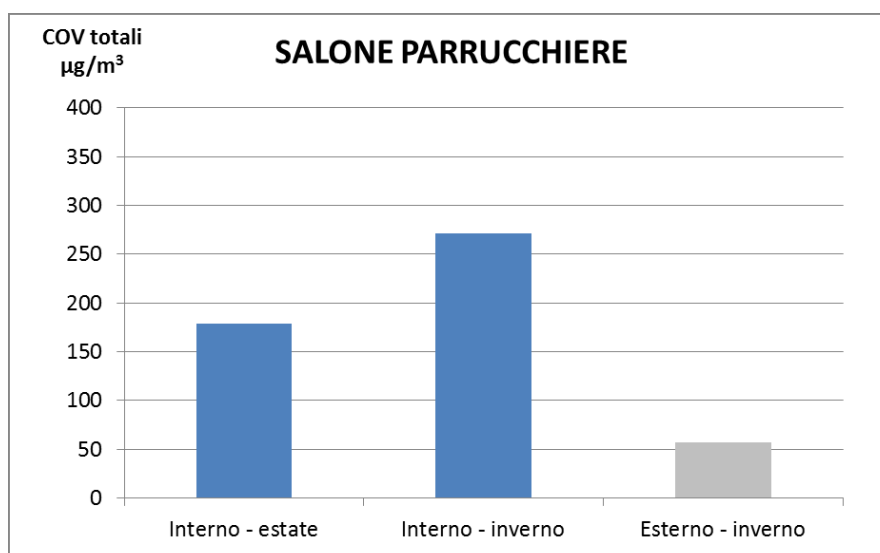


Figura 11 – Risultati delle indagini conoscitive condotte nel salone del parrucchiere

I valori dei singoli composti sono risultati nella quasi totalità dei casi inferiori a 10 µg/m³, ad eccezione di limonene (valori tra 12 e 37 µg/m³), n-dodecano (24-90 µg/m³), n-undecano (2-66 µg/m³), isopropilbenzene (8-18 µg/m³), toluene (6-15 µg/m³).

I valori misurati dei singoli COV sono riportati nella tabella seguente.

| SALONE PARRUCCHIERE | INDAGINE CONOSCITIVA - INTERNO - ESTATE | INDAGINE CONOSCITIVA - INTERNO - INVERNO | INDAGINE CONOSCITIVA - ESTERNO - INVERNO |
|--|---|--|--|
| COV | Valori in µg/m³ | | |
| alcool sec-butilico | 0,19 | 2,83 | 1,72 |
| metilcicloesano | 0,33 | 0,13 | 0,13 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,11 | 1,84 | 0,18 |
| acetato di butile | 2,57 | 3,54 | 0,31 |
| metilmetacrilato | 0,25 | 0,18 | 0,18 |
| alcool isobutilico | 0,96 | 3,88 | 0,25 |
| alcool n-butilico | 1,30 | 2,34 | 0,24 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,23 | 0,23 |
| limonene | 12,23 | 36,61 | 0,84 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | |
|-----------------------|------------|------------|--------------------------|
| cicloesano | 0,10 | 0,15 | 0,15 |
| cicloesano | 0,29 | 4,52 | 3,94 |
| n-decano | 0,51 | 4,58 | 0,49 |
| n-dodecano | 90,16 | 23,61 | 6,30 |
| n-eptano | 0,25 | 0,26 | 3,53 |
| n-esano | 0,52 | 1,10 | 0,98 |
| n-nonano | 0,41 | 0,82 | 4,10 |
| n-ottano | 0,31 | 1,31 | 7,43 |
| n-pentano | 0,66 | 3,30 | 2,13 |
| n-undecano | 2,21 | 65,59 | 1,84 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 8,88 | 4,88 | 1,39 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 4,07 | 0,37 | 0,37 |
| benzene | 1,63 | 3,44 | 2,95 |
| etilbenzene | 0,62 | 1,74 | 1,16 |
| isopropilbenzene | 8,51 | 17,64 | 0,23 |
| stirene | 0,18 | 3,48 | 0,29 |
| toluene | 5,82 | 14,89 | 8,19 |
| xileni (o,m,p) | 2,22 | 7,08 | 6,63 |
| acetato di etile | 0,13 | 6,56 | 0,21 |
| acetato di isobutile | 0,11 | 0,18 | 0,18 |
| acetato di isopropile | 0,14 | 0,21 | 0,21 |
| acetato di metile | 0,09 | 0,15 | 0,15 |
| acetato di propile | 0,12 | 0,19 | 0,19 |
| metossietile acetato | 0,26 | 0,41 | 0,41 |
| ALDEIDI | | | |
| formaldeide | 14,11 | 12,03 | Misura non effettuata |
| acetaldeide | 16,25 | 18,49 | |
| acroleina | 0,22 | 0,12 | |
| propanale | 0,00 | 2,28 | |
| benzaldeide | 0,00 | 0,44 | |
| pentanale | 0,00 | 4,40 | |
| esanale | 1,77 | 15,35 | |
| COV TOTALI | 179 | 271 | 58 |



10.4. SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE

10.4.1. Caratteristiche dell'ambiente indoor

L'ambiente indoor è costituito da una scuola dell'infanzia di nuova costruzione, realizzato con caratteristiche costruttive innovative e a consumo di energia "quasi zero". Per la costruzione sono stati utilizzati materiali secondo criteri della "bioedilizia" (legno, lana di legno mineralizzata, gessofibra, linoleum naturale realizzato a partire da olio naturale – olio di lino – con esclusione di sostanze di sintesi).

Le caratteristiche dimensionali dell'edificio sono riportate di seguito:

| Riepilogo locali | | | | | |
|------------------|-----------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|
| 1 | WC | 88.51 | m ³ | 20.69 | m ² |
| 2 | Aula 1 | 138.22 | m ³ | 39.88 | m ² |
| 3 | Salone | 283.00 | m ³ | 61.34 | m ² |
| 4 | Aula | 138.22 | m ³ | 39.88 | m ² |
| 5 | Zona sonno | 113.45 | m ³ | 32.40 | m ² |
| 6 | Aula insegnanti | 66.57 | m ³ | 15.04 | m ² |
| 7 | Ripostiglio | 6.13 | m ³ | 1.36 | m ² |
| 8 | Antibagno | 8.89 | m ³ | 3.42 | m ² |
| 9 | Deposito | 8.21 | m ³ | 3.16 | m ² |
| 10 | WC disabili | 10.02 | m ³ | 3.85 | m ² |
| 11 | Ingresso | 134.15 | m ³ | 30.59 | m ² |
| TOTALE | | 995.35 | m³ | 251.59 | m² |

10.4.2. Fonti di emissione outdoor

La scuola è situata in un piccolo paese della valle centrale della Valle d'Aosta, in una zona residenziale leggermente periferica rispetto al centro storico. Le fonti di emissione outdoor sono pertanto costituite prevalentemente dagli impianti di riscaldamento domestici delle abitazioni vicine, alimentati a legna e gasolio. La strada che porta alla scuola è molto poco frequentata.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



10.4.3. Fonti di emissione indoor

La presenza di COV nell'ambiente indoor è da ricondurre al rilascio da parte dei materiali di costruzione interni, degli arredi e dei materiali utilizzati per l'attività scolastica (pennarelli, colle).

10.4.4. Frequentazione

Il locale è frequentato dalle insegnanti e da bambini di età compresa tra 3 e 5 anni in relazione all'orario scolastico, dal lunedì al venerdì dalle ore 8.30 alle ore 16.30.

10.4.5. Aerazione

L'edificio è dotato di un impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC). L'impianto è costituito da 2 macchine di ventilazione con portata variabile da 50 a 570 m³/h.

La portata totale di progetto dell'aria di rinnovo è pari a 540 m³/h e garantisce un ricambio pari a 0,54 volumi/ora.

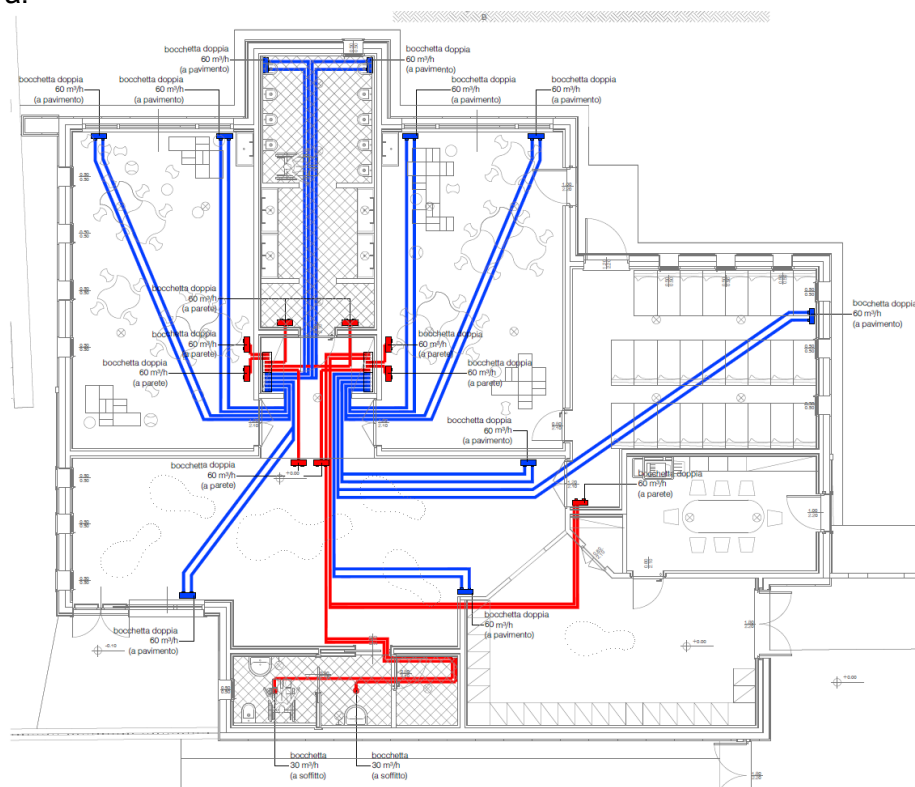


Figura 12 – Pianta di progetto dell'impianto di ventilazione meccanizzata della scuola per l'infanzia

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



10.4.6. Risultati dell'indagine conoscitiva

Sono state eseguite tre campagne di misura per valutare il livello di inquinamento dell'aria indoor. La prima campagna è stata effettuata con l'impianto VMC spento, mentre la seconda e la terza con l'impianto di VMC funzionante, in modo da valutare l'effetto dell'impianto VMC sulla IAQ. I valori misurati sono riportati nella tabella seguente.

| SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE | PROVA CON VMC SPENTA | PRIMA PROVA CON VMC ACCESA | SECONDA PROVA CON VMC ACCESA |
|---|--|----------------------------|------------------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | |
| alcool sec-butilico | 0,19 | 0,20 | 1,42 |
| metilcicloesano | 24,80 | 6,06 | 3,23 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,12 | 0,12 | 8,27 |
| acetato di butile | 0,21 | 0,21 | 3,73 |
| metilmetacrilato | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| alcool isobutilico | 0,16 | 0,17 | 1,11 |
| alcool n-butilico | 0,16 | 0,17 | 1,80 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| limonene | 149,85 | 31,83 | 80,62 |
| cicloesano | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| cicloesano | 56,44 | 14,49 | 9,19 |
| n-decano | 14,58 | 2,32 | 1,24 |
| n-dodecano | 41,36 | 27,11 | 11,33 |
| n-eptano | 5,04 | 1,10 | 0,55 |
| n-esano | 13,99 | 0,23 | 4,36 |
| n-nonano | 4,75 | 0,66 | 0,40 |
| n-ottano | 10,84 | 2,05 | 1,21 |
| n-pentano | 188,28 | 53,09 | 28,11 |
| n-undecano | 32,65 | 4,37 | 3,56 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 7,49 | 0,25 | 0,25 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 1,25 | 0,25 | 0,25 |
| benzene | 11,54 | 6,49 | 3,47 |
| etilbenzene | 11,52 | 2,67 | 2,04 |
| isopropilbenzene | 2,52 | 0,16 | 0,16 |
| stirene | 10,48 | 0,20 | 1,75 |
| toluene | 2730,00 | 636,64 | 345,95 |
| xileni (o,m,p) | 14,93 | 2,87 | 1,60 |
| acetato di etile | 0,14 | 0,14 | 3,21 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | |
|-----------------------|-------------|------------|------------|
| acetato di isobutile | 0,12 | 0,12 | 3,81 |
| acetato di isopropile | 0,14 | 0,15 | 0,15 |
| acetato di metile | 0,10 | 0,10 | 5,87 |
| acetato di propile | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| metossietile acetato | 0,27 | 0,28 | 1,24 |
| ALDEIDI | | | |
| formaldeide | 43,93 | 24,25 | 13,26 |
| acetaldeide | 175,32 | 58,96 | 36,13 |
| acroleina | 2,88 | 0,66 | 0,15 |
| propanale | 32,06 | 10,60 | 8,69 |
| benzaldeide | 1,33 | 0,63 | 0,30 |
| pentanale | 66,04 | 18,00 | 7,64 |
| esanale | 314,45 | 80,46 | 31,83 |
| COV TOTALI | 3970 | 989 | 628 |

Nella prima misura condotta con l'impianto VMC spento è stata rilevata una concentrazione di COV totali pari a circa 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valore piuttosto elevato, se confrontato con i valori misurati negli altri ambienti indoor indagati (ufficio adiacente all'area produttiva, gabbotto della stazione di rifornimento carburante, salone di un parrucchiere) in cui le concentrazioni sono risultate comprese tra 140 e 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Questo è legato sia alle emissioni delle fonti indoor, sia all'effetto di accumulo degli inquinanti nell'ambiente per via della totale mancanza di ricambio dell'aria nelle condizioni di effettuazione della prima misura.

In particolare destano interesse il valore di concentrazione di benzene (circa 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), toluene (2730 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e formaldeide (circa 44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Con l'attivazione dell'impianto VMC le concentrazioni di COV totali sono diminuite sensibilmente, in misura del 75% nella prima misura e dell'85% nella seconda misura.

L'ulteriore miglioramento riscontrato nella seconda misura è da ricondurre a un effetto di progressiva diminuzione della quantità di sostanze rilasciate dalle fonti interne, costituite prevalentemente dai materiali e dai rivestimenti delle strutture di nuova realizzazione.

Nell'ultima misura condotta la concentrazione di COV totali si è ridotta a circa 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valore comunque generalmente superiore a quelli misurati negli altri ambienti indoor indagati.

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor

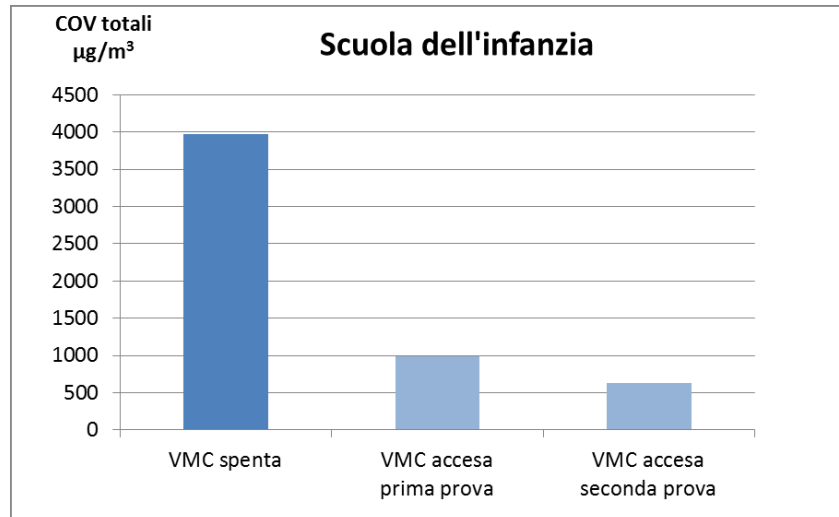


Figura 13 – Diminuzione progressiva della concentrazione di COV totali nell'ambiente indoor a seguito dell'attivazione dell'impianto di ventilazione meccanica controllata (VMC) e della diminuzione dell'effetto di rilascio da parte dei materiali e degli arredi interni

| SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE | VARIAZIONE TRA VMC SPENTA E VMC ACCESA (PRIMA PROVA) | VARIAZIONE TRA VMC SPENTA E VMC ACCESA (SECONDA PROVA) |
|---|--|--|
| COV | % | % |
| metilcicloesano | -76% | -87% |
| limonene | -79% | -46% |
| cicloesano | -74% | -84% |
| n-decano | -84% | -91% |
| n-dodecano | -34% | -73% |
| n-eptano | -78% | -89% |
| n-esano | -98% | -69% |
| n-nonano | -86% | -92% |
| n-ottano | -81% | -89% |
| n-pentano | -72% | -85% |
| n-undecano | -87% | -89% |
| 1,2,4-trimetilbenzene | -97% | -97% |
| 1,3,5-trimetilbenzene | -80% | -80% |
| benzene | -44% | -70% |
| etilbenzene | -77% | -82% |
| isopropilbenzene | -94% | -94% |
| stirene | -98% | -83% |
| toluene | -77% | -87% |
| xileni (o,m,p) | -81% | -89% |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| ALDEIDI | % | % |
|-------------------|-------------|-------------|
| formaldeide | -45% | -70% |
| acetaldeide | -66% | -79% |
| acroleina | -77% | -95% |
| propanale | -67% | -73% |
| benzaldeide | -53% | -77% |
| pentanale | -73% | -88% |
| esanale | -74% | -90% |
| COV TOTALI | -75% | -84% |

10.5. CONFRONTO TRA I VALORI MISURATI NEI DIVERSI AMBIENTI INDOOR E NELL'ARIA ESTERNA

Uno degli aspetti di interesse è il confronto dei valori di concentrazione degli inquinanti misurati nei diversi ambienti indoor.

A tal fine nella tabella seguente vengono confrontati gli intervalli e i valori medi di concentrazione di COV totali e dei composti organici considerati più significativi rilevati nelle diverse misurazioni della campagna di misura.

| | AZIENDA PRODUZIONE TRASFORMATORI AREA PRODUTTIVA | AZIENDA PRODUZIONE TRASFORMATORI UFFICIO ADIACENTE ALL'AREA PRODUTTIVA | GABBIOTTO STAZIONE RIFORNIMENTO CARBURANTE | SALONE PARRUCCHIERE | SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE (VMC in funzione) |
|-------------|---|---|---|----------------------------|---|
| | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3$ |
| COV totali | 1465 ÷ 6278 (media 3936) | 134 ÷ 598 (media 290) | 120 ÷ 889 (media 264) | 179 ÷ 271 (media 225) | 628 ÷ 989 (media 809) |
| Benzene | 2,8 ÷ 23,9 (media 8,5) | 0,9 ÷ 7,3 (media 3,0) | 3,1 ÷ 100 (media 15,8) | 1,6 ÷ 3,4 (media 2,5) | 3,5 ÷ 6,5 (media 5,0) |
| Toluene | 5,9 ÷ 39,3 (media 22,6) | 2,5 ÷ 35,4 (media 11,7) | 8,8 ÷ 174,5 (media 33,8) | 5,8 ÷ 14,9 (media 10,4) | 346 ÷ 637 (media 491) |
| Xileni | 221 ÷ 1713 (media 865) | 15 ÷ 131 (media 60) | 6 ÷ 128 (media 24) | 2,2 ÷ 7,1 (media 5) | 1,6 ÷ 2,9 (media 2,2) |
| Formaldeide | 15,3 ÷ 37,5 (media 26) | 7,2 ÷ 15,8 (media 11) | 4,0 ÷ 16,2 (media 8) | 12,0 ÷ 14,1 (media 13) | 13,3 ÷ 24,3 (media 19) |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



È inoltre di interesse confrontare i valori misurati negli ambienti indoor con i corrispondenti valori misurati nell'aria esterna, considerando che per ogni misura indoor è stata condotta in contemporanea una misura in aria esterna in diretta prossimità dell'ambiente indoor oggetto di indagine.

A tale proposito nei grafici seguenti vengono confrontati i valori medi misurati nell'aria indoor dei diversi ambienti con i corrispondenti valori medi misurati nell'aria esterna.

La presenza di inquinanti nell'aria esterna è determinata dalla presenza di fonti di emissione esterne, costituite principalmente dal traffico veicolare e dal riscaldamento domestico.

Nel caso del benzinaio e del parrucchiere il traffico veicolare risulta avere un impatto maggiore rispetto agli altri casi in quanto tali esercizi si trovano rispettivamente lungo una statale molto frequentata e una strada urbana del centro abitato mediamente frequentata.

Nel caso dell'attività produttiva, pur trovandosi in una zona industriale della città, l'edificio è localizzato a una certa distanza dalle strade, per cui l'impatto delle fonti esterne è inferiore a quello che si ha nel caso del benzinaio e del parrucchiere.

Nel caso della scuola dell'infanzia, invece, le fonti esterne risultano avere un impatto minore rispetto agli altri casi in quanto la scuola è localizzata lontano da strade frequentate e in periferia rispetto al centro abitato.

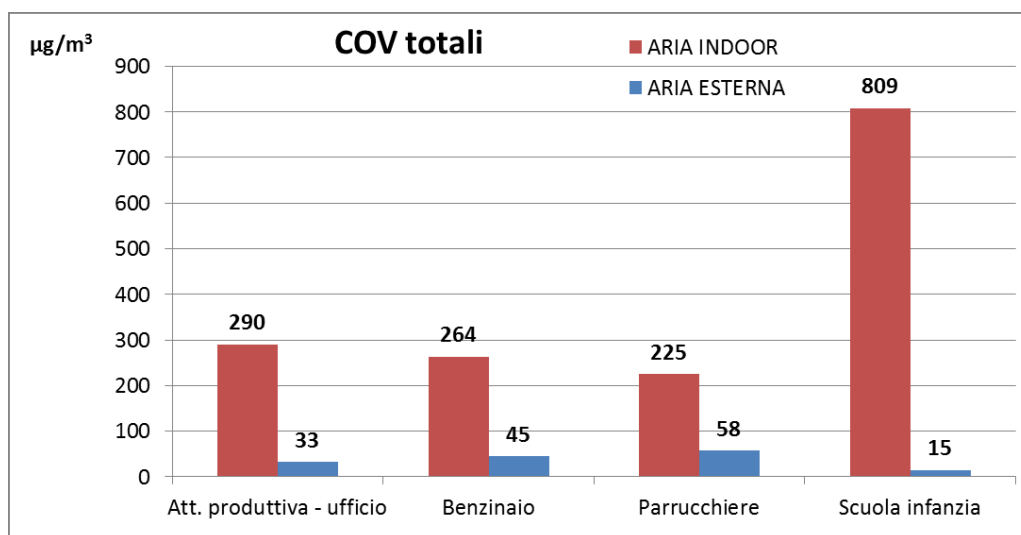


Figura 14 – Confronto tra i valori medi di concentrazione di COV totali rilevati nei diversi ambienti e i corrispondenti valori rilevati nell'aria esterna. I valori indoor sono sempre sensibilmente più elevati di quelli rilevati nell'aria esterna

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor

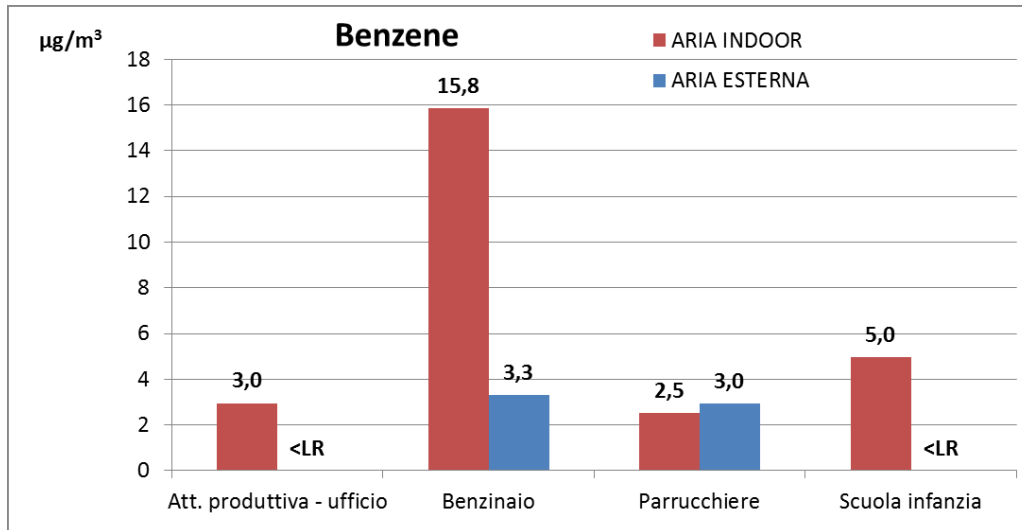


Figura 15 – Confronto tra i valori medi di concentrazione di benzene rilevati nei diversi ambienti e i corrispondenti valori rilevati nell'aria esterna. Nel caso del benzinaio, oltre al traffico veicolare, c'è anche l'influenza delle emissioni derivanti dall'utilizzo degli erogatori di rifornimento carburante. La normativa francese prevede un valore di riferimento di $5 \mu\text{m}^3$ e un valore obiettivo di $2 \mu\text{m}^3$ per il benzene. L'OMS indica dei valori guida in relazione a determinati livelli di rischio (es. $1,7 \mu\text{m}^3$ per un livello di rischio pari a 10^{-5})

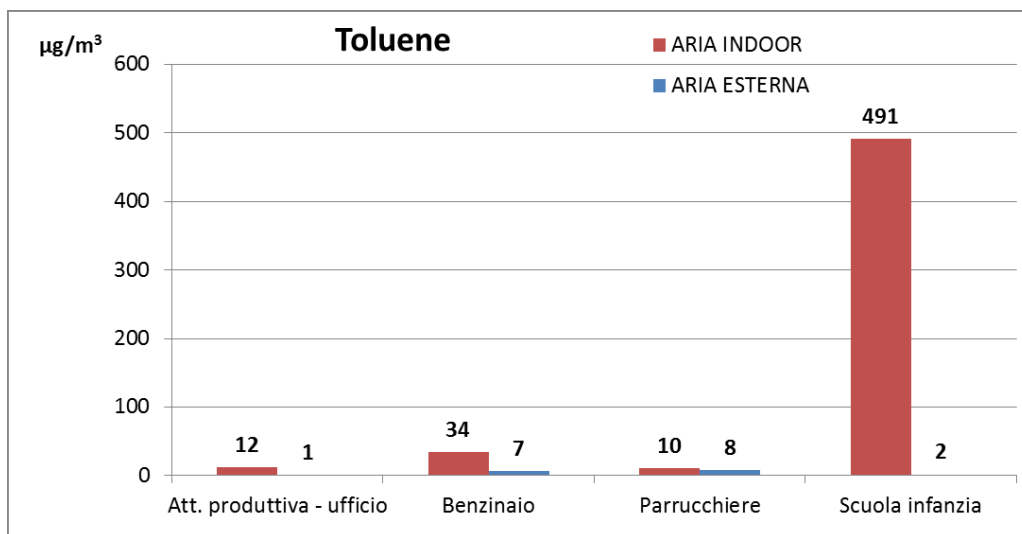


Figura 16 – Confronto tra i valori medi di concentrazione di toluene rilevati nei diversi ambienti e i corrispondenti valori rilevati nell'aria esterna. Per il toluene nel report dello studio europeo INDEX viene indicato un valore guida di 15mg/m^3 per il breve periodo e un valore guida di $300 \mu\text{g/m}^3$ per il lungo periodo

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor

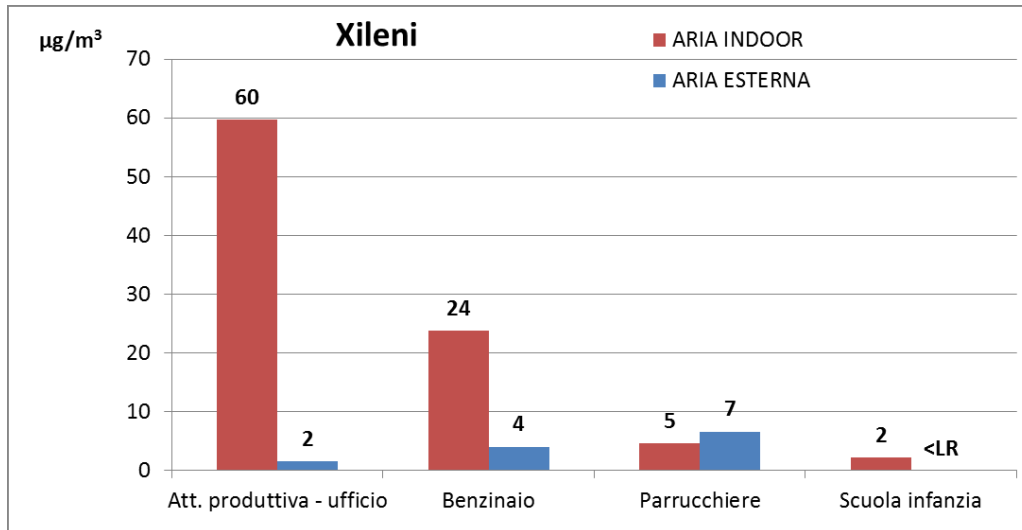


Figura 17 – Confronto tra i valori medi di concentrazione di xileni rilevati nei diversi ambienti e i corrispondenti valori rilevati nell'aria esterna. Per gli xileni nel report dello studio europeo INDEX viene indicato un valore guida di 20 mg/m³ per il breve periodo e un valore guida di 200 µg/m³ per il lungo periodo

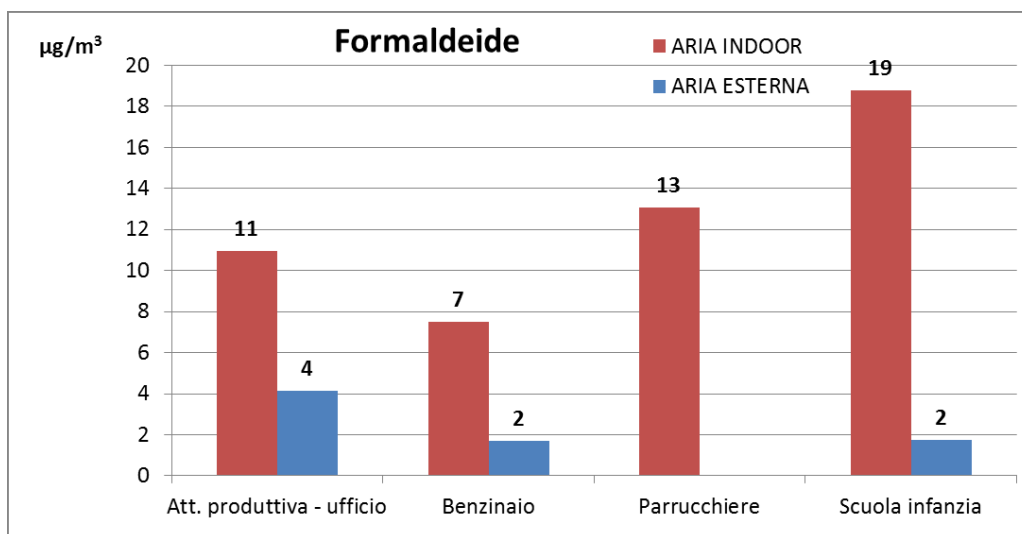


Figura 18 – Confronto tra i valori medi di concentrazione di formaldeide rilevati nei diversi ambienti e i corrispondenti valori rilevati nell'aria esterna. La normativa francese prevede un valore di riferimento di 30 µg/m³ e un valore obiettivo di 10 µg/m³ per la formaldeide. L'OMS indica un valore guida pari a 100 µg/m³. Nel report dello studio europeo INDEX viene indicato un valore guida di 30 mg/m³ per il breve periodo (30 minuti)



11. CONCLUSIONI

Il progetto sperimentale è stato condotto in condizioni reali, verificando l'applicabilità della fitodepurazione in relazione ad una serie di fattori contingenti quali le caratteristiche delle fonti di emissione (che nella realtà sono variabili e discontinue), le dimensioni dei locali, la logistica di alloggiamento delle piante, le comuni pratiche di ventilazione dei locali, le attività svolte correntemente all'interno dei locali stessi.

Questo rende il progetto differente rispetto ad altri studi sperimentali sulla fitodepurazione dell'aria indoor reperibili in letteratura, nei quali le prove sono state condotte in condizioni controllate di laboratorio.

L'ambiente indoor in cui la fitodepurazione si è dimostrata più efficace è costituito dall'ufficio adiacente all'area produttiva di produzione dei trasformatori.

I livelli di COV nell'ufficio sono influenzati dal trafileamento dell'aria ambiente interna dall'adiacente area produttiva, in cui vengono utilizzati prodotti al solvente e la concentrazione di COV totali è di un ordine di grandezza maggiore rispetto all'ambiente indoor dell'ufficio.

Dalle prove sperimentali risulta che grazie l'effetto depurativo delle piante ha consentito di diminuire la concentrazione di COV totali del 45% circa e per i composti presenti in maggiore concentrazione (acetato di butile, alcool isobutilico, n-dodecano, n-undecano, xileni) la diminuzione è stata del 60-70%.

Tale effetto positivo è stato ottenuto alloggiando un numero di piante pari a circa 4 piante/m³, utilizzando piante di medie dimensioni (altezza 50-100 cm).

Nel periodo invernale l'efficacia dell'azione fitodepurativa è stata inficiata dalla mancanza di luce solare, a causa dell'effetto di schermatura da parte delle montagne a seguito dell'abbassamento progressivo della linea di orizzonte del sole.

L'ambiente dell'ufficio si è dimostrato adatto all'azione depurativa in quanto caratterizzato da concentrazioni di COV costanti nel tempo: la fonte emissiva è esterna all'ufficio e l'apporto di COV è dovuto al rimescolamento dell'aria negli ambienti interni attraverso l'apertura delle porte interne.

Probabilmente le piante riescono ad avere un'azione efficace di rimozione dei COV in quanto riescono a stabilire una condizione di equilibrio nei meccanismi di assorbimento e rilascio di sostanze con l'aria dell'ambiente indoor, arrivando ad una concentrazione di COV nell'ambiente inferiore a quella che si ha in condizione di assenza di piante.

Nel caso dell'area produttiva, invece, non si è osservato alcun effetto di rimozione dei COV da parte delle piante. Questo è dovuto principalmente al fatto che l'ambiente è molto ampio e questo ha impedito di alloggiare un numero adeguato di piante in rapporto al volume indoor. Inoltre, la concentrazione dei COV nella zona in cui è stata fatta la sperimentazione è molto variabile, con

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



presenza di picchi di concentrazione di breve durata in occasione delle operazioni di sgrassaggio e finitura dei semilavorati, con successiva diluizione e dispersione degli inquinanti all'interno dell'ambiente molto voluminoso.

In questo caso sarebbe necessario captare gli inquinanti con adeguati sistemi di aspirazione ed eventualmente convogliarli ad un eventuale biofiltro, sfruttando l'azione fitodepurativa in un vero e proprio impianto di abbattimento.

Anche nel caso del benzinaio non è emerso un effetto visibile dell'azione fitodepurativa. Anche in questo caso, così come nel caso dell'attività produttiva indagata, è probabile che l'azione fitodepurativa sia stata impedita sia dalla presenza di picchi di concentrazione dovuti alla presenza di fonti emissive indoor, come ad esempio la pratica di ricovero notturno all'interno del locale del bidone contenente rifiuti contaminati da benzina e prodotti a base COV, sia dall'aerazione del locale condotta in maniera non controllata, influenzata dalla continua apertura e chiusura della porta di ingresso per il passaggio dei clienti, provocando l'ingresso di inquinanti dall'aria esterna.

L'indagine condotta nella scuola dell'infanzia di nuova costruzione ha rivelato la presenza di una fonte emissiva interna costituita dal rilascio di COV da parte dei materiali costruttivi interni (es. legno impregnato o verniciato), pur se realizzati secondo i criteri di bioedilizia.

In questo caso l'azione della ventilazione meccanizzata ha permesso di ridurre le concentrazioni di COV all'interno del locale di oltre l'80%.

Il confronto tra i valori misurati negli ambienti indoor e i corrispondenti valori misurati nell'aria esterna ha rivelato che la concentrazione di COV negli ambienti indoor è sempre risultata sensibilmente maggiore di quella dell'aria esterna, a conferma di quanto noto dalla letteratura.

Il miglioramento della qualità dell'aria indoor costituisce una nuova frontiera nel campo della protezione della salute umana nell'accezione più estesa, comprendente non solo gli effetti tossicologici delle sostanze presenti nell'aria ma anche gli effetti collaterali da parte di tali sostanze sul benessere fisico e psichico. A tale proposito recenti studi hanno dimostrato che la presenza anche in basse concentrazioni di COV nell'aria indoor influenzano negativamente la capacità di concentrazione e la produttività di studenti e lavoratori che conducono lavori di concetto.

I risultati del progetto confermano che, nel caso di ambienti indoor caratterizzati dalla presenza di COV in concentrazioni più elevate rispetto all'aria esterna, è possibile migliorare sensibilmente la qualità dell'aria indoor attraverso l'alloggiamento di piante da interni con riconosciute capacità fitodepurative.

Si tratta comunque di una tecnica complementare a tutte quelle azioni di miglioramento della qualità dell'aria indoor che comprendono principalmente la rimozione o il contenimento delle fonti emissive interne e l'adozione di un adeguato sistema di ricambio dell'aria, meglio se attuato attraverso impianti di ventilazione meccanizzata (VMC) ben progettati.



12. TABELLE DEI RISULTATI

Nota: nel caso di valori inferiori al limite di rilevabilità strumentale (LR) viene riportato un valore pari alla metà del limite di rilevabilità (LR/2).

AREA PRODUTTIVA

| TIPO DI PROVA | CAMPIONAMENTO | INIZIO | FINE | DURATA (giorni) |
|----------------------------------|---------------|------------|------------|-----------------|
| Indagine conoscitiva iniziale | COV | 11/05/2015 | 25/05/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 11/05/2015 | 18/05/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – estate - 1 | COV | 17/08/2015 | 31/08/2015 | 15 |
| | Aldeidi | 17/08/2015 | 24/08/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – estate - 2 | COV | 31/08/2015 | 14/09/2015 | 14 |
| Prova sperimentale – inverno - 1 | COV | 26/10/2015 | 04/11/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 26/10/2015 | 02/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno - 2 | COV | 04/11/2015 | 13/11/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 04/11/2015 | 09/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno - 3 | COV | 13/11/2015 | 23/11/2015 | 10 |
| | Aldeidi | 13/11/2015 | 20/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno - 4 | COV | 23/11/2015 | 03/12/2015 | 10 |
| | Aldeidi | 20/11/2015 | 27/11/2015 | 7 |

| AREA PRODUTTIVA INDAGINE CONOSCITIVA INIZIALE | P1 ZONA FINITURE | P2 CABINA CENTRALE | P3 SOPPALCO | P5 USCITA SFIATO AUTOCLAVE | U UFFICIO | E ESTERNO |
|--|--|--------------------------|----------------|-------------------------------------|--------------|--------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | | | |
| alcool sec-butilico | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,28 | 0,18 | 0,17 |
| metilcicloesano | 162,97 | 48,36 | 66,99 | 17,50 | 6,92 | 0,13 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 82,45 | 23,71 | 33,71 | 39,77 | 1,95 | 0,10 |
| acetato di butile | 1214,37 | 330,44 | 474,18 | 101,36 | 43,62 | 1,94 |
| metilmetacrilato | 0,24 | 0,24 | 0,24 | 14,72 | 0,24 | 0,23 |
| alcool isobutilico | 714,53 | 217,58 | 308,34 | 20,00 | 27,29 | 0,41 |
| alcool n-butilico | 7,57 | 5,80 | 5,60 | 6,14 | 3,31 | 0,14 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,22 | 0,15 | 0,14 |
| limonene | 72,85 | 18,90 | 26,17 | 0,31 | 4,66 | 0,60 |
| cicloesanone | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,15 | 0,10 | 0,09 |
| cicloesano | 34,51 | 33,87 | 19,55 | 25,66 | 5,29 | 0,26 |
| n-decano | 278,95 | 82,30 | 96,94 | 102,05 | 11,76 | 0,47 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | | | |
|-----------------------|--|-------------|-------------|-------------|------------|-----------|
| n-dodecano | 113,38 | 42,01 | 55,27 | 64,47 | 8,30 | 3,33 |
| n-eptano | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,26 | 0,25 | 0,23 |
| n-esano | 3,05 | 8,64 | 3,02 | 2,22 | 1,08 | 0,48 |
| n-nonano | 138,37 | 39,45 | 49,88 | 35,28 | 5,91 | 0,38 |
| n-ottano | 39,56 | 12,44 | 16,46 | 5,66 | 1,96 | 0,29 |
| n-pentano | 8,24 | 8,24 | 7,97 | 2,50 | 2,33 | 0,74 |
| n-undecano | 452,29 | 138,17 | 174,31 | 147,55 | 23,34 | 1,29 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 60,17 | 25,68 | 32,22 | 20,02 | 5,45 | 0,33 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 11,00 | 4,54 | 4,40 | 0,36 | 0,63 | 0,22 |
| benzene | 8,55 | 12,64 | 8,43 | 4,43 | 1,39 | 0,13 |
| etilbenzene | 255,85 | 72,89 | 105,69 | 32,83 | 12,76 | 0,44 |
| isopropilbenzene | 51,45 | 12,05 | 14,87 | 15,93 | 2,55 | 0,24 |
| stirene | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 302,88 | 0,18 | 0,17 |
| toluene | 23,44 | 19,83 | 23,85 | 44,73 | 5,89 | 1,07 |
| xileni (o,m,p) | 785,98 | 220,92 | 330,68 | 120,97 | 39,16 | 1,60 |
| acetato di etile | 11,06 | 14,68 | 13,66 | 9,87 | 2,34 | 0,19 |
| acetato di isobutile | 69,86 | 22,50 | 32,65 | 4,89 | 3,38 | 0,10 |
| acetato di isopropile | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,21 | 0,13 | 0,12 |
| acetato di metile | 2,28 | 5,07 | 2,86 | 6,45 | 1,71 | 0,09 |
| acetato di propile | 0,12 | 0,49 | 1,10 | 16,58 | 0,12 | 0,11 |
| metossietile acetato | 22,30 | 6,27 | 8,55 | 0,40 | 0,81 | 0,24 |
| ALDEIDI | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | | | |
| formaldeide | 22,63 | 15,27 | 18,57 | 69,53 | 9,26 | 4,16 |
| acetaldeide | 4,54 | 3,63 | 3,68 | 0,23 | 4,35 | 1,72 |
| acroleina | 0,02 | 0,02 | 0,02 | 0,12 | n.r. | n.r. |
| propanale | n.r. | n.r. | n.r. | 1,84 | n.r. | 1,08 |
| benzaldeide | 2,05 | 2,73 | 2,39 | 0,13 | n.r. | n.r. |
| pentanale | 1,29 | 0,82 | 0,83 | 0,14 | 0,82 | n.r. |
| esanale | 20,18 | 13,74 | 11,54 | 3,84 | 5,18 | 4,16 |
| COV TOTALI | 4677 | 1465 | 1956 | 1242 | 245 | 28 |

| AREA PRODUTTIVA ESTATE | PROVA 1 DENTRO AL CUBO | PROVA 1 FUORI DAL CUBO | PROVA 2 DENTRO AL CUBO | PROVA 2 FUORI DAL CUBO |
|---|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
| alcool sec-butilico | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| metilcicloesano | 58,15 | 77,76 | 41,97 | 85,49 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| acetato di butile | 767,47 | 705,47 | 496,95 | 664,90 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|--------|--------|-----------------------|--------|
| metilmetacrilato | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| alcool isobutilico | 0,16 | 0,16 | 242,61 | 402,06 |
| alcool n-butilico | 0,15 | 0,15 | 3,99 | 5,34 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| limonene | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| cicloesano | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| cicloesano | 10,68 | 10,22 | 15,41 | 22,06 |
| n-decano | 228,02 | 183,03 | 143,92 | 167,78 |
| n-dodecano | 53,86 | 58,20 | 32,47 | 43,52 |
| n-eptano | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| n-esano | 1,95 | 2,01 | 3,92 | 3,71 |
| n-nonano | 88,36 | 72,92 | 58,47 | 70,53 |
| n-ottano | 15,57 | 0,19 | 12,27 | 20,76 |
| n-pentano | 2,24 | 2,65 | 2,59 | 3,05 |
| n-undecano | 241,13 | 180,64 | 159,47 | 190,56 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 58,43 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 0,23 | 0,23 | 0,23 | 0,23 |
| benzene | 2,79 | 2,79 | 3,16 | 4,67 |
| etilbenzene | 120,85 | 122,06 | 88,09 | 125,80 |
| isopropilbenzene | 35,06 | 0,15 | 23,37 | 29,67 |
| stirene | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| toluene | 8,00 | 9,74 | 5,87 | 7,51 |
| xileni (o,m,p) | 502,17 | 521,78 | 365,45 | 522,17 |
| acetato di etile | 7,04 | 7,10 | 8,36 | 9,74 |
| acetato di isobutile | 0,11 | 0,11 | 18,86 | 39,74 |
| acetato di isopropile | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| acetato di metile | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| acetato di propile | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| metossietile acetato | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 26,74 | 24,43 | Misure non effettuate | |
| acetaldeide | 3,14 | 2,92 | | |
| acroleina | 0,15 | 0,15 | | |
| propanale | 2,89 | 2,43 | | |
| benzaldeide | 2,86 | 2,87 | | |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| pentanale | 0,18 | 0,18 | | |
| esanale | 22,41 | 15,54 | | |
| COV TOTALI | 2263 | 2008 | 1729 | 2421 |

| AREA PRODUTTIVA INVERNO | PROVA 1 DENTRO AL CUBO | PROVA 1 FUORI DAL CUBO | PROVA 2 DENTRO AL CUBO | PROVA 2 FUORI DAL CUBO |
|---|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| COV | Valori in µg/m³ | | | |
| alcool sec-butilico | 0,28 | 0,28 | 0,28 | 0,28 |
| metilcicloesano | 50,84 | 59,44 | 78,47 | 63,78 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,17 | 0,17 | 0,17 | 0,17 |
| acetato di butile | 1376,52 | 1230,27 | 1573,33 | 1135,35 |
| metilmetacrilato | 0,18 | 0,18 | 1,73 | 1,65 |
| alcool isobutilico | 791,05 | 804,46 | 1093,43 | 861,49 |
| alcool n-butilico | 0,24 | 0,24 | 14,83 | 12,21 |
| alcool terz-butilico | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,22 |
| limonene | 162,06 | 141,65 | 0,31 | 0,31 |
| cicloesanone | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| cicloesano | 21,99 | 25,33 | 36,85 | 30,24 |
| n-decano | 438,17 | 360,14 | 445,00 | 326,33 |
| n-dodecano | 116,14 | 106,47 | 71,12 | 64,42 |
| n-eptano | 6,01 | 7,56 | 0,26 | 0,26 |
| n-esano | 6,10 | 6,88 | 13,14 | 10,55 |
| n-nonano | 158,08 | 136,04 | 228,56 | 161,05 |
| n-ottano | 23,86 | 22,89 | 26,96 | 19,74 |
| n-pentano | 14,30 | 15,35 | 15,86 | 14,83 |
| n-undecano | 462,43 | 387,15 | 290,22 | 230,68 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 283,91 | 242,61 | 74,50 | 56,13 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 56,78 | 51,10 | 0,36 | 0,36 |
| benzene | 23,87 | 9,90 | 11,48 | 9,15 |
| etilbenzene | 273,28 | 250,51 | 326,42 | 251,38 |
| isopropilbenzene | 0,23 | 0,23 | 102,49 | 74,34 |
| stirene | 0,29 | 0,29 | 0,28 | 0,28 |
| toluene | 28,60 | 33,13 | 39,30 | 34,13 |
| xileni (o,m,p) | 1076,64 | 1002,89 | 1713,05 | 1301,19 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| acetato di etile | 0,20 | 0,20 | 17,01 | 16,03 |
| acetato di isobutile | 0,18 | 0,18 | 38,07 | 31,18 |
| acetato di isopropile | 0,21 | 0,21 | 0,21 | 0,21 |
| acetato di metile | 0,15 | 0,15 | 8,29 | 7,88 |
| acetato di propile | 0,19 | 0,19 | 2,79 | 2,32 |
| metossietile acetato | 0,40 | 0,40 | 0,40 | 0,40 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 29,12 | 28,25 | 35,45 | 37,52 |
| acetaldeide | 3,14 | 2,90 | 4,16 | 4,31 |
| acroleina | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| propanale | 2,62 | 2,44 | 3,20 | 3,28 |
| benzaldeide | 0,76 | 0,77 | 0,78 | 0,87 |
| pentanale | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| esanale | 7,84 | 7,06 | 8,94 | 8,98 |
| COV TOTALI | 5418 | 4939 | 6278 | 4774 |

| AREA PRODUTTIVA INVERNO | PROVA 3 DENTRO AL CUBO | PROVA 3 FUORI DAL CUBO | PROVA 4 DENTRO AL CUBO | PROVA 4 FUORI DAL CUBO |
|---|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
| alcool sec-butilico | 13,47 | 14,92 | 14,35 | 15,42 |
| metilcicloesano | 49,76 | 58,23 | 55,31 | 55,31 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 67,55 | 64,45 | 66,57 | 53,95 |
| acetato di butile | 1242,33 | 1160,80 | 1339,15 | 1067,49 |
| metilmetacrilato | 0,16 | 0,16 | 1,76 | 2,50 |
| alcool isobutilico | 795,62 | 801,67 | 1103,12 | 924,24 |
| alcool n-butilico | 10,07 | 11,02 | 12,41 | 11,79 |
| alcool terz-butilico | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| limonene | 117,55 | 98,59 | 139,34 | 110,51 |
| cicloesanone | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| cicloesano | 18,98 | 21,14 | 23,38 | 24,66 |
| n-decano | 509,21 | 433,37 | 592,61 | 464,48 |
| n-dodecano | 37,56 | 45,42 | 39,03 | 43,04 |
| n-eptano | 4,50 | 4,94 | 3,76 | 3,64 |
| n-esano | 6,60 | 7,31 | 6,61 | 6,78 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| n-nonano | 257,20 | 232,94 | 277,40 | 205,66 |
| n-ottano | 16,70 | 17,14 | 17,76 | 15,59 |
| n-pentano | 8,06 | 8,47 | 8,75 | 8,97 |
| n-undecano | 111,62 | 112,59 | 116,70 | 92,78 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 89,91 | 83,39 | 87,24 | 88,15 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 0,33 | 0,33 | 0,32 | 0,32 |
| benzene | 7,75 | 7,31 | 6,74 | 8,21 |
| etilbenzene | 243,21 | 239,79 | 266,70 | 226,19 |
| isopropilbenzene | 117,67 | 100,40 | 146,45 | 94,99 |
| stirene | 278,76 | 313,13 | 101,61 | 95,97 |
| toluene | 31,16 | 32,42 | 21,10 | 20,79 |
| xileni (o,m,p) | 1064,86 | 968,35 | 1443,00 | 1147,84 |
| acetato di etile | 17,92 | 25,09 | 28,84 | 29,73 |
| acetato di isobutile | 30,69 | 32,91 | 33,52 | 32,07 |
| acetato di isopropile | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 |
| acetato di metile | 4,13 | 4,78 | 4,05 | 4,25 |
| acetato di propile | 0,17 | 0,17 | 3,21 | 3,32 |
| metossietile acetato | 18,72 | 17,47 | 20,09 | 15,99 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 26,66 | 27,95 | 22,96 | 23,41 |
| acetaldeide | 4,14 | 4,20 | 2,86 | 2,83 |
| acroleina | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| propanale | 4,63 | 4,54 | 2,48 | 2,36 |
| benzaldeide | 0,75 | 0,76 | 2,06 | 2,35 |
| pentanale | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| esanale | 8,95 | 8,66 | 4,82 | 4,20 |
| COV TOTALI | 5218 | 4966 | 6017 | 4911 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



UFFICIO ADIACENTE ALL'AREA PRODUTTIVA

| TIPO DI PROVA | CAMPIONAMENTO | INIZIO | FINE | DURATA (giorni) |
|---|---------------|------------|------------|-----------------|
| Indagine conoscitiva iniziale | COV | 11/05/2015 | 25/05/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 11/05/2015 | 18/05/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – estate – senza piante 1 | COV | 15/06/2015 | 30/06/2015 | 15 |
| | Aldeidi | 15/06/2015 | 24/06/2015 | 9 |
| Prova sperimentale – estate – senza piante 2 | COV | 20/07/2015 | 03/08/2015 | 14 |
| Prova sperimentale – estate – con piante 1 | COV | 17/08/2015 | 31/08/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 17/08/2015 | 24/08/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – estate – con piante 2 | COV | 31/08/2015 | 14/09/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 10/09/2015 | 18/09/2015 | 8 |
| Prova sperimentale – inverno – con piante 1 | COV | 26/10/2015 | 04/11/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 26/10/2015 | 02/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno – con piante 2 | COV | 04/11/2015 | 13/11/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 02/11/2015 | 09/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno – senza piante 1 | COV | 13/11/2015 | 23/11/2015 | 10 |
| | Aldeidi | 13/11/2015 | 20/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno – senza piante 2 | COV | 23/11/2015 | 03/12/2015 | 10 |
| | Aldeidi | 20/11/2015 | 27/11/2015 | 7 |

| UFFICIO ADIACENTE ALL'AREA PRODUTTIVA ESTATE | PROVA 1 CON PIANTE | PROVA 2 CON PIANTE | PROVA 1 SENZA PIANTE | PROVA 2 SENZA PIANTE |
|--|--|--------------------|----------------------|----------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
| alcool sec-butilico | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| metilcicloesano | 0,20 | 4,44 | 2,74 | 2,61 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 2,54 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| acetato di butile | 32,80 | 41,86 | 16,83 | 12,88 |
| metilmetacrilato | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| alcool isobutilico | 26,94 | 0,20 | 0,20 | 8,66 |
| alcool n-butilico | 4,31 | 0,20 | 0,20 | 3,42 |
| alcool terz-butilico | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| limonene | 6,31 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| cicloesanone | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| cicloesano | 3,34 | 11,08 | 3,71 | 2,96 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|------------|--------------------------|------------|------------|
| n-decano | 1,58 | 23,69 | 8,47 | 6,60 |
| n-dodecano | 53,48 | 12,65 | 9,58 | 9,51 |
| n-eptano | 0,20 | 1,19 | 0,20 | 0,20 |
| n-esano | 0,20 | 3,14 | 1,80 | 1,69 |
| n-nonano | 6,35 | 7,42 | 2,69 | 1,88 |
| n-ottano | 1,92 | 1,68 | 0,90 | 0,79 |
| n-pentano | 2,02 | 5,53 | 1,25 | 1,65 |
| n-undecano | 27,20 | 29,49 | 11,11 | 10,66 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 3,91 | 11,51 | 4,51 | 0,20 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| benzene | 0,95 | 3,15 | 1,13 | 0,85 |
| etilbenzene | 8,97 | 17,46 | 6,04 | 5,25 |
| isopropilbenzene | 2,41 | 3,02 | 1,23 | 0,83 |
| stirene | 0,20 | 0,20 | 2,61 | 0,20 |
| toluene | 3,84 | 13,90 | 2,48 | 3,47 |
| xileni (o,m,p) | 33,07 | 54,26 | 18,91 | 14,80 |
| acetato di etile | 2,17 | 3,58 | 2,19 | 2,92 |
| acetato di isobutile | 2,11 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| acetato di isopropile | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| acetato di metile | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| acetato di propile | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| metossietile acetato | 1,08 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 10,71 | Misure non effettuate | 15,80 | 14,76 |
| acetaldeide | 4,56 | | 4,07 | 3,46 |
| acroleina | 0,20 | | 0,20 | 0,20 |
| propanale | 0,20 | | 0,20 | 1,36 |
| benzaldeide | 1,83 | | 1,21 | 1,18 |
| pentanale | 1,83 | | 1,21 | 1,18 |
| esanale | 4,11 | | 7,35 | 6,49 |
| COV TOTALI | 251 | 252 | 142 | 134 |

| | | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| UFFICIO ADIACENTE ALL'AREA PRODUTTIVA INVERNO | PROVA 1 SENZA PIANTE | PROVA 2 SENZA PIANTE | PROVA 1 CON PIANTE | PROVA 2 CON PIANTE |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
|--|------------------------------------|--------|--------|--------|
| alcool sec-butilico | 0,20 | 0,20 | 1,81 | 7,03 |
| metilcicloesano | 1,48 | 5,41 | 4,06 | 6,68 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,20 | 0,20 | 4,31 | 5,93 |
| acetato di butile | 18,84 | 49,75 | 40,38 | 66,19 |
| metilmetacrilato | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 3,54 |
| alcool isobutilico | 8,42 | 36,45 | 21,78 | 44,42 |
| alcool n-butilico | 0,20 | 5,28 | 2,23 | 4,10 |
| alcool terz-butilico | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| limonene | 10,75 | 13,05 | 13,00 | 19,70 |
| cicloesanone | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| cicloesano | 3,90 | 6,05 | 2,05 | 8,72 |
| n-decano | 8,66 | 29,07 | 30,88 | 42,71 |
| n-dodecano | 9,18 | 12,44 | 6,93 | 12,63 |
| n-eptano | 0,20 | 2,11 | 1,20 | 5,74 |
| n-esano | 0,99 | 3,36 | 0,94 | 5,01 |
| n-nonano | 3,05 | 14,19 | 16,35 | 20,09 |
| n-ottano | 0,70 | 2,07 | 1,98 | 2,69 |
| n-pentano | 3,16 | 6,14 | 1,94 | 13,03 |
| n-undecano | 13,17 | 24,77 | 12,04 | 15,50 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 4,73 | 6,23 | 7,36 | 10,38 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 1,13 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| benzene | 4,30 | 4,53 | 3,03 | 7,29 |
| etilbenzene | 8,08 | 22,51 | 21,92 | 27,35 |
| isopropilbenzene | 0,20 | 6,38 | 9,00 | 9,90 |
| stirene | 0,20 | 0,20 | 19,27 | 15,81 |
| toluene | 6,32 | 15,17 | 18,57 | 35,37 |
| xileni (o,m,p) | 25,69 | 108,25 | 112,48 | 131,18 |
| acetato di etile | 0,20 | 4,97 | 4,00 | 20,01 |
| acetato di isobutile | 0,20 | 1,90 | 2,05 | 9,33 |
| acetato di isopropile | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| acetato di metile | 0,20 | 2,36 | 0,58 | 0,20 |
| acetato di propile | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 2,39 |
| metossietile acetato | 0,20 | 0,20 | 2,82 | 3,53 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| ALDEIDI | | | | |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| formaldeide | 8,81 | 9,65 | 11,47 | 7,19 |
| acetaldeide | 2,50 | 3,18 | 5,29 | 3,01 |
| acroleina | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| propanale | 0,82 | 0,83 | 2,18 | 1,38 |
| benzaldeide | 0,58 | 0,56 | 0,74 | 0,89 |
| pentanale | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| esanale | 3,74 | 3,80 | 5,02 | 3,24 |
| COV TOTALI | 161 | 413 | 414 | 598 |

GABBIOTTO DELLA STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE

| TIPO DI PROVA | CAMPIONAMENTO | INIZIO | FINE | DURATA (giorni) |
|---|---------------|------------|------------|-----------------|
| Indagine conoscitiva iniziale | COV | 20/05/2015 | 03/06/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 20/05/2015 | 29/05/2015 | 9 |
| Prova sperimentale – estate – senza piante 1 | COV | 30/07/2015 | 13/08/2015 | 14 |
| Prova sperimentale – estate – senza piante 2 | COV | 17/08/2015 | 31/08/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 17/08/2015 | 24/08/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – estate – con piante 1 | COV | 10/09/2015 | 25/09/2015 | 15 |
| | Aldeidi | 10/09/2015 | 18/09/2015 | 8 |
| Prova sperimentale – estate – con piante 2 | COV | 30/09/2015 | 12/10/2015 | 12 |
| | Aldeidi | 30/09/2015 | 08/10/2015 | 8 |
| Prova sperimentale – inverno – con piante 1 | COV | 26/10/2015 | 04/11/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 26/10/2015 | 02/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno – con piante 2 | COV | 04/11/2015 | 13/11/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 02/11/2015 | 09/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno – senza piante 1 | COV | 13/11/2015 | 23/11/2015 | 10 |
| | Aldeidi | 13/11/2015 | 20/11/2015 | 7 |
| Prova sperimentale – inverno – | COV | 23/11/2015 | 03/12/2015 | 10 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|----------------|---------|------------|------------|---|
| senza piante 2 | Aldeidi | 20/11/2015 | 28/11/2015 | 8 |
|----------------|---------|------------|------------|---|

| GABBIOTTO STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE ESTATE | INDAGINE INIZIALE - INTERNO | PROVA 1 SENZA PIANTE - INTERNO | PROVA 1 SENZA PIANTE - ESTERNO | PROVA 2 SENZA PIANTE - INTERNO | PROVA 2 SENZA PIANTE - ESTERNO |
|--|--|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | | |
| alcool sec-butilico | 0,19 | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,18 |
| metilcicloesano | 14,57 | 7,73 | 0,45 | 12,63 | 0,74 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| acetato di butile | 2,85 | 2,86 | 0,20 | 3,77 | 0,20 |
| metilmetacrilato | 0,25 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| alcool isobutilico | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| alcool n-butilico | 1,46 | 0,15 | 0,15 | 0,16 | 0,15 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| limonene | 21,32 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| cicloesanone | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| cicloesano | 13,26 | 11,03 | 4,74 | 23,92 | 4,77 |
| n-decano | 0,51 | 1,87 | 0,31 | 4,52 | 0,31 |
| n-dodecano | 37,19 | 22,26 | 3,34 | 34,88 | 3,84 |
| n-eptano | 6,11 | 4,79 | 2,51 | 8,93 | 2,46 |
| n-esano | 2,11 | 4,21 | 1,91 | 5,66 | 1,94 |
| n-nonano | 1,82 | 1,09 | 0,17 | 1,85 | 0,35 |
| n-ottano | 1,38 | 0,65 | 0,19 | 1,44 | 0,19 |
| n-pentano | 0,26 | 27,75 | 8,57 | 40,60 | 8,50 |
| n-undecano | 5,89 | 6,06 | 0,83 | 14,24 | 0,33 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 9,14 | 4,55 | 2,26 | 6,90 | 1,27 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 2,52 | 1,94 | 1,17 | 2,14 | 0,23 |
| benzene | 5,03 | 3,07 | 2,29 | 4,24 | 2,48 |
| etilbenzene | 5,66 | 2,56 | 1,17 | 3,50 | 1,05 |
| isopropilbenzene | 1,38 | 1,83 | 0,15 | 2,19 | 0,15 |
| stirene | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 | 0,18 |
| toluene | 20,98 | 16,56 | 8,04 | 19,40 | 7,17 |
| xileni (o,m,p) | 11,66 | 7,53 | 4,25 | 10,17 | 3,70 |
| acetato di etile | 0,13 | 8,98 | 0,13 | 6,64 | 0,83 |
| acetato di isobutile | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 | 0,11 |
| acetato di isopropile | 0,14 | 0,13 | 0,13 | 0,14 | 0,13 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | | |
|----------------------|------------|--------------------------|--------------------------|------------|-----------|
| acetato di metile | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 |
| acetato di propile | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| metossietile acetato | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 |
| ALDEIDI | | | | | |
| formaldeide | 7,09 | Misure non effettuate | Misure non effettuate | 16,17 | 1,68 |
| acetaldeide | 6,26 | | | 141,93 | 0,71 |
| acroleina | 0,08 | | | 0,15 | 1,81 |
| propanale | n. d. | | | 1,65 | 0,13 |
| benzaldeide | n. d. | | | 0,71 | 0,03 |
| pentanale | n. d. | | | 0,19 | 0,19 |
| esanale | 1,25 | | | 8,97 | 0,36 |
| COV TOTALI | 182 | | | 140 | 45 |

| GABBOTTO STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE ESTATE | PROVA 1 CON PIANTE - INTERNO | PROVA 1 CON PIANTE - ESTERNO | PROVA 2 CON PIANTE - INTERNO | PROVA 2 CON PIANTE - ESTERNO |
|---|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
| alcol sec-butilico | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,21 |
| metilcicloesano | 20,28 | 0,74 | 3,95 | 0,48 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,13 |
| acetato di butile | 0,19 | 0,20 | 0,23 | 0,23 |
| metilmetacrilato | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,13 |
| alcol isobutilico | 0,15 | 0,16 | 0,18 | 0,18 |
| alcol n-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,18 | 0,18 |
| alcol terz-butilico | 0,14 | 0,15 | 0,16 | 0,16 |
| limonene | 29,66 | 1,73 | 17,90 | 1,26 |
| cicloesanone | 0,09 | 0,10 | 0,11 | 0,11 |
| cicloesano | 82,81 | 5,23 | 6,64 | 1,67 |
| n-decano | 2,20 | 0,31 | 1,40 | 0,35 |
| n-dodecano | 21,85 | 4,34 | 13,61 | 5,35 |
| n-eptano | 88,77 | 3,59 | 6,02 | 1,84 |
| n-esano | 24,10 | 1,58 | 3,70 | 1,11 |
| n-nonano | 5,38 | 0,35 | 1,19 | 0,19 |
| n-ottano | 13,37 | 0,69 | 1,02 | 0,21 |
| n-pentano | 59,79 | 6,70 | 20,54 | 5,48 |
| n-undecano | 8,53 | 2,02 | 4,07 | 0,89 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 42,83 | 2,48 | 7,28 | 1,58 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 18,26 | 0,87 | 2,44 | 0,26 |
| benzene | 100,38 | 5,27 | 10,56 | 5,77 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|------------|-----------|------------|------------|
| etilbenzene | 39,36 | 1,82 | 3,39 | 1,16 |
| isopropilbenzene | 5,32 | 0,15 | 1,49 | 0,17 |
| stirene | 0,17 | 0,18 | 0,21 | 0,21 |
| toluene | 174,48 | 9,38 | 17,50 | 6,09 |
| xileni (o,m,p) | 128,21 | 6,09 | 12,07 | 4,02 |
| acetato di etile | 0,12 | 0,13 | 0,15 | 0,15 |
| acetato di isobutile | 0,11 | 0,11 | 0,13 | 0,13 |
| acetato di isopropile | 0,13 | 0,13 | 0,15 | 0,15 |
| acetato di metile | 0,09 | 0,09 | 0,11 | 0,11 |
| acetato di propile | 0,11 | 0,12 | 0,14 | 0,14 |
| metossietile acetato | 0,25 | 0,26 | 0,29 | 0,29 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 10,14 | 1,63 | 6,85 | 1,37 |
| acetaldeide | 2,36 | 0,27 | 1,75 | 2,66 |
| acroleina | 0,14 | 0,14 | 0,13 | 9,42 |
| propanale | 1,01 | 0,12 | 0,65 | 12,46 |
| benzaldeide | 0,55 | 0,02 | 0,32 | 9,09 |
| pentanale | 0,16 | 0,17 | 0,15 | 34,03 |
| esanale | 6,57 | 0,36 | 3,93 | 60,11 |
| COV TOTALI | 889 | 58 | 151 | 169 |

| GABBIOTTO STAZIONE DI RIFORMIMENTO CARBURANTE INVERNO | PROVA 1 CON PIANTE - INTERNO | PROVA 1 CON PIANTE - ESTERNO | PROVA 2 CON PIANTE - INTERNO | PROVA 2 CON PIANTE - ESTERNO |
|---|-----------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| COV | Valori in µg/m³ | | | |
| alcool sec-butilico | 0,28 | 0,28 | 0,29 | 0,29 |
| metilcicloesano | 6,81 | 0,48 | 9,37 | 0,79 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,17 | 0,17 | 0,74 | 0,18 |
| acetato di butile | 0,75 | 0,30 | 0,74 | 0,32 |
| metilmetacrilato | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,18 |
| alcool isobutilico | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,25 |
| alcool n-butilico | 0,24 | 0,24 | 0,25 | 0,25 |
| alcool terz-butilico | 0,22 | 0,22 | 0,23 | 0,23 |
| limonene | 49,92 | 1,16 | 15,25 | 0,32 |
| cicloesanone | 0,14 | 0,14 | 0,15 | 0,15 |
| cicloesano | 15,43 | 4,77 | 12,43 | 1,76 |
| n-decano | 2,44 | 0,47 | 1,42 | 0,49 |
| n-dodecano | 17,68 | 4,36 | 12,51 | 5,33 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| n-eptano | 6,18 | 1,70 | 0,27 | 0,87 |
| n-esano | 4,17 | 1,49 | 2,31 | 1,15 |
| n-nonano | 1,23 | 0,26 | 0,83 | 0,27 |
| n-ottano | 1,16 | 0,29 | 0,30 | 0,30 |
| n-pentano | 31,74 | 10,03 | 14,23 | 4,59 |
| n-undecano | 4,52 | 0,51 | 4,17 | 0,53 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 13,79 | 1,52 | 5,27 | 1,22 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 4,44 | 0,36 | 1,62 | 0,37 |
| benzene | 6,94 | 3,60 | 4,11 | 2,27 |
| etilbenzene | 4,75 | 1,02 | 2,32 | 0,78 |
| isopropilbenzene | 0,22 | 0,22 | 0,66 | 0,23 |
| stirene | 0,28 | 0,28 | 0,29 | 0,29 |
| toluene | 21,16 | 11,26 | 12,81 | 4,80 |
| xileni (o,m,p) | 19,12 | 3,68 | 11,25 | 3,84 |
| acetato di etile | 0,20 | 0,20 | 8,14 | 0,21 |
| acetato di isobutile | 0,17 | 0,17 | 0,18 | 0,18 |
| acetato di isopropile | 0,21 | 0,21 | 0,22 | 0,22 |
| acetato di metile | 0,14 | 0,14 | 3,55 | 0,15 |
| acetato di propile | 0,19 | 0,19 | 0,19 | 0,19 |
| metossietile acetato | 0,39 | 0,39 | 0,41 | 0,41 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 4,89 | 1,43 | 5,19 | 1,85 |
| acetaldeide | 2,93 | 0,29 | 1,73 | 0,30 |
| acroleina | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| propanale | 0,39 | 0,12 | 0,66 | 0,13 |
| benzaldeide | 0,30 | 0,03 | 0,37 | 0,03 |
| pentanale | 0,18 | 0,18 | 0,19 | 0,19 |
| esanale | 3,18 | 0,13 | 3,56 | 0,14 |
| COV TOTALI | 228 | 53 | 139 | 36 |

| GABBOTTO STAZIONE DI RIFORNIMENTO CARBURANTE INVERNO | PROVA 1 SENZA PIANTE - INTERNO | PROVA 1 SENZA PIANTE - ESTERNO | PROVA 2 SENZA PIANTE - INTERNO | PROVA 2 SENZA PIANTE - ESTERNO |
|--|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | |
| alcool sec-butilico | 4,70 | 2,10 | 4,07 | 1,73 |
| metilcicloesano | 5,28 | 0,98 | 3,84 | 0,89 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,48 | 0,18 | 0,16 | 0,18 |
| acetato di butile | 1,05 | 0,32 | 0,52 | 0,32 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | |
|-----------------------|------------|-----------|------------|-----------|
| metilmetacrilato | 0,16 | 0,18 | 0,16 | 0,18 |
| alcol isobutilico | 0,67 | 0,25 | 0,22 | 0,25 |
| alcol n-butilico | 0,21 | 0,25 | 0,22 | 0,25 |
| alcol terz-butilico | 0,20 | 0,23 | 0,20 | 0,23 |
| limonene | 16,26 | 0,32 | 21,81 | 0,32 |
| cicloesano | 0,13 | 0,15 | 0,13 | 0,15 |
| cicloesano | 9,95 | 2,63 | 8,86 | 1,76 |
| n-decano | 1,98 | 0,49 | 1,67 | 0,49 |
| n-dodecano | 12,24 | 3,55 | 10,84 | 4,54 |
| n-eptano | 3,38 | 1,12 | 2,87 | 0,74 |
| n-esano | 2,69 | 0,86 | 1,67 | 0,34 |
| n-nonano | 0,80 | 0,27 | 0,63 | 0,27 |
| n-ottano | 0,36 | 0,30 | 0,27 | 0,30 |
| n-pentano | 22,15 | 5,23 | 15,52 | 3,74 |
| n-undecano | 3,55 | 0,53 | 4,00 | 1,12 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 4,01 | 1,20 | 3,66 | 0,79 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 0,32 | 0,37 | 0,33 | 0,37 |
| benzene | 4,41 | 2,47 | 3,84 | 2,47 |
| etilbenzene | 2,08 | 0,93 | 1,48 | 0,63 |
| isopropilbenzene | 0,90 | 0,23 | 1,33 | 0,23 |
| stirene | 0,25 | 0,29 | 0,26 | 0,29 |
| toluene | 12,92 | 5,12 | 8,81 | 3,63 |
| xileni (o,m,p) | 8,10 | 4,51 | 5,86 | 2,48 |
| acetato di etile | 3,18 | 0,21 | 1,98 | 0,21 |
| acetato di isobutile | 2,89 | 1,10 | 2,60 | 1,76 |
| acetato di isopropile | 0,19 | 0,22 | 0,19 | 0,22 |
| acetato di metile | 4,92 | 0,15 | 0,13 | 0,15 |
| acetato di propile | 0,17 | 0,19 | 0,85 | 0,19 |
| metossietile acetato | 0,35 | 0,41 | 0,36 | 0,41 |
| ALDEIDI | | | | |
| formaldeide | 5,66 | 1,75 | 3,99 | 2,18 |
| acetaldeide | 2,82 | 0,30 | 2,48 | 0,30 |
| acroleina | 0,15 | 0,15 | 0,13 | 0,15 |
| propanale | 1,09 | 0,87 | n.d. | 0,13 |
| benzaldeide | 0,36 | 0,03 | 0,29 | 0,03 |
| pentanale | 0,18 | 0,19 | 0,16 | 0,19 |
| esanale | 5,69 | 13,04 | 3,18 | 0,14 |
| COV TOTALI | 147 | 54 | 120 | 35 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



SALONE DI UN PARRUCCHIERE

| TIPO DI PROVA | CAMPIONAMENTO | INIZIO | FINE | DURATA (giorni) |
|---------------|---------------|------------|------------|-----------------|
| Prova estate | COV | 20/05/2015 | 03/06/2015 | 14 |
| | Aldeidi | 20/05/2015 | 29/05/2015 | 9 |
| Prova inverno | COV | 24/11/2015 | 03/12/2015 | 9 |
| | Aldeidi | 24/11/2015 | 03/12/2015 | 9 |

| SALONE PARRUCCHIERE | INDAGINE CONOSCITIVA - INTERNO - ESTATE | INDAGINE CONOSCITIVA - INTERNO - INVERNO | INDAGINE CONOSCITIVA - ESTERNO - INVERNO |
|--|--|--|--|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | |
| alcool sec-butilico | 0,19 | 2,83 | 1,72 |
| metilcicloesano | 0,33 | 0,13 | 0,13 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,11 | 1,84 | 0,18 |
| acetato di butile | 2,57 | 3,54 | 0,31 |
| metilmetacrilato | 0,25 | 0,18 | 0,18 |
| alcool isobutilico | 0,96 | 3,88 | 0,25 |
| alcool n-butilico | 1,30 | 2,34 | 0,24 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,23 | 0,23 |
| limonene | 12,23 | 36,61 | 0,84 |
| cicloesanone | 0,10 | 0,15 | 0,15 |
| cicloesano | 0,29 | 4,52 | 3,94 |
| n-decano | 0,51 | 4,58 | 0,49 |
| n-dodecano | 90,16 | 23,61 | 6,30 |
| n-eptano | 0,25 | 0,26 | 3,53 |
| n-esano | 0,52 | 1,10 | 0,98 |
| n-nonano | 0,41 | 0,82 | 4,10 |
| n-ottano | 0,31 | 1,31 | 7,43 |
| n-pentano | 0,66 | 3,30 | 2,13 |
| n-undecano | 2,21 | 65,59 | 1,84 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 8,88 | 4,88 | 1,39 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 4,07 | 0,37 | 0,37 |
| benzene | 1,63 | 3,44 | 2,95 |
| etilbenzene | 0,62 | 1,74 | 1,16 |
| isopropilbenzene | 8,51 | 17,64 | 0,23 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | |
|-----------------------|------------|------------|-----------------------|
| stirene | 0,18 | 3,48 | 0,29 |
| toluene | 5,82 | 14,89 | 8,19 |
| xileni (o,m,p) | 2,22 | 7,08 | 6,63 |
| acetato di etile | 0,13 | 6,56 | 0,21 |
| acetato di isobutile | 0,11 | 0,18 | 0,18 |
| acetato di isopropile | 0,14 | 0,21 | 0,21 |
| acetato di metile | 0,09 | 0,15 | 0,15 |
| acetato di propile | 0,12 | 0,19 | 0,19 |
| metossietile acetato | 0,26 | 0,41 | 0,41 |
| ALDEIDI | | | |
| formaldeide | 14,11 | 12,03 | Misura non effettuata |
| acetaldeide | 16,25 | 18,49 | |
| acroleina | 0,22 | 0,12 | |
| propanale | 0,00 | 2,28 | |
| benzaldeide | 0,00 | 0,44 | |
| pentanale | 0,00 | 4,40 | |
| esanale | 1,77 | 15,35 | |
| COV TOTALI | 179 | 271 | 58 |

SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE

| TIPO DI PROVA | CAMPIONAMENTO | INIZIO | FINE | DURATA (giorni) |
|--|---------------|------------|------------|-----------------|
| Prova ventilazione meccanizzata spenta – locale non frequentato | COV | 11/09/2015 | 24/09/2015 | 13 |
| | Aldeidi | 11/09/2015 | 18/09/2015 | 7 |
| Prima prova ventilazione meccanizzata accesa – normale frequentazione del locale | COV | 09/10/2015 | 22/10/2015 | 13 |
| | Aldeidi | 09/10/2015 | 16/10/2015 | 7 |
| Seconda prova ventilazione meccanizzata accesa – normale frequentazione del locale | COV | 23/11/2015 | 03/12/2015 | 10 |
| | Aldeidi | 23/11/2015 | 30/11/2015 | 7 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| SCUOLA DELL'INFANZIA DI NUOVA COSTRUZIONE | PROVA CON VMC SPENTA | PRIMA PROVA CON VMC ACCESA | SECONDA PROVA CON VMC ACCESA | PRIMA PROVA ESTERNO | SECONDA PROVA ESTERNO |
|---|--|----------------------------|------------------------------|---------------------|-----------------------|
| COV | Valori in $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | | | | |
| alcool sec-butilico | 0,19 | 0,20 | 1,42 | 0,20 | 0,20 |
| metilcicloesano | 24,80 | 6,06 | 3,23 | 0,08 | 0,08 |
| propilen glicole monometil etere acetato | 0,12 | 0,12 | 8,27 | 0,12 | 0,12 |
| acetato di butile | 0,21 | 0,21 | 3,73 | 0,21 | 0,21 |
| metilmetacrilato | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 |
| alcool isobutilico | 0,16 | 0,17 | 1,11 | 0,17 | 0,17 |
| alcool n-butilico | 0,16 | 0,17 | 1,80 | 0,17 | 0,17 |
| alcool terz-butilico | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| limonene | 149,85 | 31,83 | 80,62 | 0,22 | 0,22 |
| cicloesanone | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 | 0,10 |
| cicloesano | 56,44 | 14,49 | 9,19 | 0,26 | 0,26 |
| n-decano | 14,58 | 2,32 | 1,24 | 0,33 | 0,33 |
| n-dodecano | 41,36 | 27,11 | 11,33 | 4,67 | 4,67 |
| n-eptano | 5,04 | 1,10 | 0,55 | 0,18 | 0,18 |
| n-esano | 13,99 | 0,23 | 4,36 | 0,23 | 0,23 |
| n-nonano | 4,75 | 0,66 | 0,40 | 0,18 | 0,18 |
| n-ottano | 10,84 | 2,05 | 1,21 | 0,20 | 0,20 |
| n-pentano | 188,28 | 53,09 | 28,11 | 0,21 | 0,21 |
| n-undecano | 32,65 | 4,37 | 3,56 | 0,36 | 0,36 |
| 1,2,4-trimetilbenzene | 7,49 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 1,3,5-trimetilbenzene | 1,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| benzene | 11,54 | 6,49 | 3,47 | 0,15 | 0,15 |
| etilbenzene | 11,52 | 2,67 | 2,04 | 0,16 | 0,16 |
| isopropilbenzene | 2,52 | 0,16 | 0,16 | 0,16 | 0,16 |
| stirene | 10,48 | 0,20 | 1,75 | 0,20 | 0,20 |
| toluene | 2730,00 | 636,64 | 345,95 | 1,66 | 1,66 |
| xileni (o,m,p) | 14,93 | 2,87 | 1,60 | 0,38 | 0,38 |
| acetato di etile | 0,14 | 0,14 | 3,21 | 0,14 | 0,14 |
| acetato di isobutile | 0,12 | 0,12 | 3,81 | 0,12 | 0,12 |
| acetato di isopropile | 0,14 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| acetato di metile | 0,10 | 0,10 | 5,87 | 0,10 | 0,10 |
| acetato di propile | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 |
| metossietile acetato | 0,27 | 0,28 | 1,24 | 0,28 | 0,28 |
| ALDEIDI | | | | | |
| formaldeide | 43,93 | 24,25 | 13,26 | 1,62 | 1,74 |

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



| | | | | | |
|-------------------|-------------|------------|------------|-----------|-----------|
| acetaldeide | 175,32 | 58,96 | 36,13 | 0,29 | 0,29 |
| acroleina | 2,88 | 0,66 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| propanale | 32,06 | 10,60 | 8,69 | 0,12 | 0,12 |
| benzaldeide | 1,33 | 0,63 | 0,30 | 0,03 | 0,03 |
| pentanale | 66,04 | 18,00 | 7,64 | 0,18 | 0,18 |
| esanale | 314,45 | 80,46 | 31,83 | 0,77 | 0,57 |
| COV TOTALI | 3970 | 989 | 628 | 15 | 15 |

BIBLIOGRAFIA

- Baosheng K, Shibata S, Sawada A, Oyabu T, Kimura H (2009) Air purification capability of potted *Phoenix roebelenii* and its installation effect in indoor space. *Sensor Mater* 21:445–455
- Dela Cruz M, Christensen JH, Thomsen JD, Muller R (2014) Can ornamental plants remove volatile organic compounds from indoor air? – A review. *Environ Sci Pollut Res* 21: 13909-13928
- Kim KJ, Il JeongM, LeeDW, Song JS, Kim HD, Yoo EH, Jeong SJ, Han SW, Kays SJ, Lim YW, Kim HH (2010) Variation in formaldehyde removal efficiency among indoor plant species. *Hortscience* 45: 1489–1495
- Liu YJ, Mu YJ, Zhu YG, Ding H, Arens NC (2007) Which ornamental plant species effectively remove benzene from indoor air? *Atmos Environ* 41:650–654
- Gao Y, Cheng Z, Ling W, Huang J (2010) Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae contribute to the uptake of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant roots. *Bioresour Technol* 101:6895–6901
- Orwell RL, Wood RL, Tarran J, Torpy F, Burchett MD (2004) Removal of benzene by the indoor plant/substrate microcosm and implications for air quality. *Water Air Soil Pollut* 157:193–207
- Sabljic A, Guesten H, Schoenherr J, Riederer M (1990) Modeling plant uptake of airborne organic chemicals: 1. Plant cuticle/water partitioning and molecular connectivity. *Environ Sci Technol* 24: 1321–1326
- Schmitz H, Hilgers U, Weidner M (2000) Assimilation and metabolism of formaldehyde by leaves appear unlikely to be of value for indoor air purification. *New Phytol* 147:307–315
- Sriprapat W, Thiravetyan P (2013) Phytoremediation of BTEX from indoor air by *Zamioculcas zamiifolia*. *Water Air Soil Pollut* 224: 1482

Progetto sperimentale sulla fitodepurazione dell'aria indoor



Xu ZJ, Wang L, Hou HP (2011) Formaldehyde removal by potted plant–soil systems. *J Hazard Mater* 192:314–318

Yang DS, Pennisi SV, Son KC, Kays SJ (2009) Screening indoor plants for volatile organic pollutant removal efficiency. *Hortscience* 44: 1377–1381

Zhou JH, Qin FF, Su J, Liao J-W, Xu H-L (2011) Purification of formaldehyde-polluted air by indoor plants of Araceae, Agavaceae and Liliaceae. *J Food Agric Environ* 9: 1012–1018