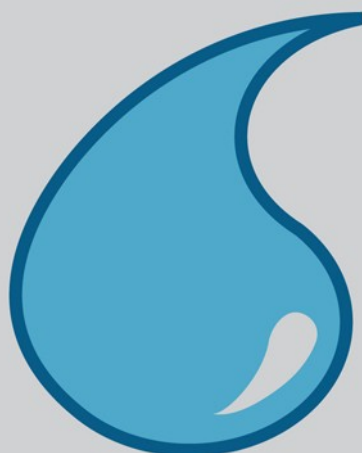


Qualità dell'ambiente urbano
XII Rapporto
Edizione 2016

Focus su
INQUINAMENTO
ATMOSFERICO
NELLE AREE URBANE
ED EFFETTI SULLA SALUTE



INDICE

INTRODUZIONE	1
<i>A cura di Silvia Brini - ISPRA</i>	

1. ASPETTI FENOMENOLOGICI DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

CONSIDERAZIONI INTRODUTTIVE	3
------------------------------------	----------

G. Lanzani - ARPA Lombardia

LA QUALITÀ DELL'ARIA IN ITALIA NEGLI ANNI	5
--	----------

M. Deserti, V. Poluzzi, I. Ricciardelli - ARPAE Emilia – Romagna; A. Di Giosa- ARPA Lazio; F. Stel -ARPA Friuli Venezia Giulia; A. M. Caricchia –ISPRA; M. Grosa -ARPA Piemonte; G. Lanzani, N. Bardizza -ARPA Lombardia.

IL PARTICOLATO ATMOSFERICO: COMPOSIZIONE E PROBLEMATICHE EMERGENTI ALLA LUCE DEI RISULTATI DEI PROGETTI DI SUPERSITO	16
---	-----------

V. Gianelle, E. Cuccia, C. Colombi - ARPA Lombardia; V. Poluzzi, D. Bacco, I. Ricciardelli - ARPAE Emilia-Romagna; B.P. Andreini ARPAE Emilia-Romagna; E. Bini -ARPA Toscana; R. Udisti, F. Lucarelli - Università degli Studi di Firenze

IL CONTRIBUTO DEL TRAFFICO ALL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO	25
--	-----------

A. Bernetti, R. De Lauretis, D. Gaudio - ISPRA

RISCALDAMENTO DOMESTICO A LEGNA E QUALITÀ DELL'ARIA NELLE REGIONI DELL'ARCO ALPINO	34
---	-----------

T. Magri, M. Zublena - ARPA Valle d'Aosta; E. Angelino, A. De Martini - ARPA Lombardia; M. Grosa - Arpa Piemonte; P. Lazzeri, S. Piccolroaz - Provincia Trento; G. Marson - ARPA Veneto.

L'INQUINAMENTO INDUSTRIALE: IL CASO DELLE ACCIAIERIE ALLA LUCE DELLE CAMPAGNE DI MISURA PIÙ RECENTI	46
--	-----------

D. Panont, M. Zublena - ARPA Valle d'Aosta; A. Pillon, S. del Frate - ARPA Friuli VG; T. Pastore, R. Giuia - ARPA Puglia

IL CONTRIBUTO DELL'AGRICOLTURA ALL'INQUINAMENTO DELLA QUALITÀ DELL'ARIA	58
--	-----------

D. Bacco, I. Ricciardelli, A. Trentini- ARPAE Emilia-Romagna; E. Cuccia, M. Lazzarini, V. Gianelle - ARPA Lombardia; G. Marson, S. Patti, L. Zagolin - ARPA Veneto; M. Clemente, M. Grosa - ARPA Piemonte; F. Montanari, A. Petrini - ARPA Friuli VG

LE COMBUSTIONI ALL'APERTO, IMPORTANTI SORGENTI DI PM10 E COMPOSTI TOSSICOLOGICAMENTE RILEVANTI	67
---	-----------

C. Ceppi, S. Spagnolo - ARPA Puglia; M. Monteleone - Università degli Studi di Foggia; G. Marson, L. Zagolin, S. Patti -ARPA Veneto; Furio Forni - Regione Toscana

L'ESPOSIZIONE IN AMBIENTE INDOOR AGLI INQUINANTI ATMOSFERICI	81
---	-----------

S. Zauli Sajani, S. Marchesi, V. Poluzzi - ARPAE Emilia-Romagna, S. Brini, A. Lepore, L. Sinisi - ISPRA, G. Lonati, Politecnico di Milano; A. Spinazzè, A. Cattaneo - Università dell'Insubria

IL PROGETTO LIFE+ AIRUSE: STUDIO DELLA COMPOSIZIONE, DELLE SORGENTI E DELLE STRATEGIE DI RIDUZIONE DEL PM10 E DEL PM2.5 IN DIVERSI AMBIENTI URBANI DEL SUD EUROPA	92
--	-----------

F. Lucarelli, S. Nava, G. Calzolari, R. Udisti - INFN-Firenze e Università di Firenze; X. Querol, F. Amato - IDAEA-CSIC, Barcelona, Spagna, V.L. Gianelle, C. Colombi - ARPA Lombardia, C. Alves - CESAM and University of Aveiro, Portogallo; K. Eleftheriadis - Environmental Radioactivity Laboratory DEMOKRITOS, Athens, Grecia

2. GLI EFFETTI SULLA SALUTE DELL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO

CONSIDERAZIONI INTRODUTTIVE	101
------------------------------------	------------

E. Cadum - ARPA Piemonte; F. Fagioli - Università di Modena e Reggio Emilia; P. Lauriola - ARPAE Emilia-Romagna

MODELLI DI VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE NEGLI STUDI EPIDEMIOLOGICI	105
---	------------

M. Cordioli, A. Ranzi - ARPAE Emilia-Romagna; G. Berti ARPA Piemonte.

L'ESPOSIZIONE IN AMBIENTE INDOOR AGLI INQUINANTI ATMOSFERICI

Stefano Zauli Sajani¹, Stefano Marchesi¹, Vanes Poluzzi¹, Silvia Brini², Arianna Lepore², Luciana Sinisi², Giovanni Lonati³, Andrea Spinazzè⁴, Andrea Cattaneo⁴

¹ Centro Ambiente e Salute, ARPAE Emilia-Romagna ;² Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, Roma; ³ Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Milano; ⁴ Dipartimento di Scienze e Alta Tecnologia – Università dell'Insubria

Introduzione

Gli ultimi decenni hanno visto accumularsi prove sulla nocività degli inquinanti atmosferici. Tali prove derivano principalmente dagli studi che mettono in relazione dati sugli effetti sanitari con le concentrazioni nell'aria ambiente (outdoor) degli inquinanti misurati dalle centraline fisse. Le centraline fisse rappresentano infatti la principale fonte di informazione sulla qualità dell'aria che respiriamo. Esse sono di fondamentale importanza non solo per la valutazione degli effetti sulla salute (studi epidemiologici) ma anche per la verifica del rispetto dei limiti di legge, per la stima dei trend di breve e di lungo periodo e per le verifiche di efficacia dei provvedimenti di risanamento della qualità dell'aria.

Occorre però chiedersi quanto il dato misurato dalle centraline di rilevamento sia rappresentativo dell'esposizione dei singoli cittadini e della popolazione nel suo complesso. Le concentrazioni degli inquinanti variano infatti in modo marcato nello spazio e nel tempo e la nostra esposizione è fortemente legata ai nostri spostamenti, alle nostre attività e ai nostri stili di vita. In particolare, è ben noto che nei paesi occidentali il tempo speso all'aperto è molto limitato e quindi l'esposizione agli inquinanti presenti nell'aria outdoor è di breve durata. La maggior parte del tempo viene invece spesa in ambienti chiusi o *indoor* (ufficio, scuola, casa, palestra, cinema, mezzi di trasporto ecc. – si veda “Linee-guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati” nell'Accordo Stato-Regioni del 2001 per una definizione di ambiente indoor).

Nei luoghi confinati le concentrazioni degli inquinanti possono essere talvolta molto elevate e superiori a quelle misurate outdoor. Le cause di questo sono da ricercare sia nella penetrazione degli inquinanti dall'esterno sia nelle sorgenti emissive proprie dell'ambiente indoor. Tali sorgenti sono molteplici ed eterogenee e possono variare da caso a caso. Quelle più rilevanti sono i processi di combustione (fumo di tabacco, fornelli per cucinare, forni a gas, caminetti, stufe a fiamma libera, candele, incensi ecc) a cui si aggiungono le emissioni che derivano dai mobili di legno nuovi o recentemente restaurati, quelle associate all'uso di detersivi per la casa e di profumi ambientali e, nel caso di ristrutturazioni, le emissioni prodotte da vernici, colle, resine, ecc.

Considerata l'ampiezza della tematica dell'inquinamento indoor, e ancora di più dei fattori di rischio legati agli ambienti indoor, si è quindi deciso di limitare i temi trattati e, per coerenza con il tema complessivo del focus, di prendere in considerazione solo gli inquinanti più critici presenti nell'aria delle nostre città. Non verranno quindi presentati dati relativi agli inquinanti le cui concentrazioni sono negli anni sensibilmente diminuite e quelli presenti esclusivamente negli ambienti indoor. Oggetto di particolare attenzione sarà quindi la stima del contributo indoor all'esposizione personale al biossido di azoto e al particolato.

Nel testo verranno presentati principalmente dati relativi a studi condotti dagli autori. È però possibile trovare ulteriori informazioni in una ampia rassegna pubblicata nel 2010 dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, 2010). Tra gli studi più recenti una certa rilevanza hanno avuto quelli dedicati agli ambienti scolastici e in particolare il progetto SEARCH (<http://www.isprambiente.gov.it/it/progetti/ambiente-e-salute-1/search>), il progetto “Indoor School” (<http://www.ccm-network.it/progetto.jsp?id=node/1232&idP=740>), finanziato dal Centro di Controllo delle Malattie, e il progetto della Regione Toscana, “Studio sul comfort e sugli inquinanti fisici e chimici nella scuola” (<http://www.regione.toscana.it/-/inquinamento-indoor>).

Centraline fisse ed esposizione della popolazione

Che relazione esiste tra i dati rilevati dalle centraline e l'aria che quotidianamente respiriamo? Nonostante le notevoli difficoltà legate al monitoraggio personale, diversi studi hanno indagato questa relazione riscontrando un legame in generale abbastanza debole tra l'esposizione personale (a scala oraria o giornaliera) e i rispettivi dati rilevati dalle centraline fisse. Questo tipo di studi ha infatti evidenziato che, per quanto riguarda l'esposizione giornaliera agli inquinanti atmosferici, la variabilità tra individui è molto marcata (Spinazzè et al. 2014), così come la variabilità nella sua evoluzione temporale, con differenze significative da giorno a giorno. La conseguenza diretta di questa evidenza è che i dati di esposizione personale non mostrano un rapporto fisso con i rilevamenti delle centraline. Per alcuni individui e per alcuni giorni l'esposizione personale è più alta del dato della centralina mentre per altri individui è più bassa. Gli andamenti temporali dei dati di esposizione e delle centraline fisse appaiono quindi poco correlati. Il legame appare più forte se si considera l'andamento temporale della media delle esposizioni personali in una certa popolazione. Gli studi in questo caso sono meno informativi perché il campionamento personale è quasi sempre condotto su gruppi di individui di numerosità molto ridotta, in generale poche decine di soggetti. Dai dati disponibili emerge però un evidente aumento delle correlazioni con i dati di monitoraggio outdoor.

Occorre però anche specificare che le correlazioni tra i dati delle centraline e l'esposizione personale mostrano una certa disomogeneità tra i vari inquinanti. Il PM2.5 in particolare risulta essere quello dove questo legame è più forte (vedi Tabella 27 - Sarnat, 2006). Questo aspetto è rilevante anche rispetto all'interpretazione dei risultati degli studi epidemiologici in quanto è possibile che le relazioni più solide riscontrate tra concentrazioni di PM2.5 e dati sanitari siano da interpretare anche come frutto di un più forte legame tra il dato delle centraline e la reale esposizione della popolazione. Lo studio citato ipotizza anche, viceversa, che le associazioni riscontrate negli studi epidemiologici tra alcuni inquinanti gassosi e gli effetti sanitari possano essere in realtà dovute al legame che esiste tra esposizione personale a tali gas e l'esposizione al particolato fine.

Ciò che emerge dagli studi è quindi che le centraline danno, soprattutto per alcuni inquinanti, delle buone indicazioni sull'andamento temporale della media dell'esposizione della popolazione, mentre abbastanza debole è il legame con l'esposizione giornaliera dei singoli individui.

Le cause della variabilità tra individui dell'esposizione sono molteplici e cercheremo di trattarle brevemente nei paragrafi seguenti.

Tabella 27 - Indice di determinazione lineare per stagione calcolato tra i dati delle centraline fisse e dati di campionamento personale. Fonte: Sarnat et al., 2006

<i>Inquinante</i>	<i>R²</i>	
	<i>Estate</i>	<i>Autunno</i>
<i>PM2.5</i>	0.60	0.47
<i>NO₂</i>	0.14	0.43
<i>O₃</i>	0.24	0.25

Esposizione personale e variabilità spaziale delle concentrazioni outdoor

La prima causa della variabilità dell'esposizione personale è la variabilità spaziale delle concentrazioni outdoor degli inquinanti, in particolare all'interno delle aree urbane. Gli studi su questi aspetti hanno subito un notevole impulso negli ultimi 20 anni, da quando cioè è stato possibile utilizzare nuove tipologie di strumenti con caratteristiche innovative in termini di portabilità e affidabilità.

Occorre innanzitutto dire che il "problema" della variabilità spaziale degli inquinanti all'interno delle aree urbane si pone in maniera molto diversa a seconda dei vari inquinanti. Tale variabilità è per esempio molto marcata per il biossido di azoto. Le campagne di misura ad alta risoluzione spaziale condotte con campionatori passivi in Italia negli ultimi anni hanno mostrato concentrazioni di NO₂ nelle zone più trafficate più elevate anche di 2/3 volte rispetto a cortili e aree adibite a verde (Beelen et al., 2013). Tale variabilità è evidenziata anche dagli studi modellistici. La figura 61 mostra a mo' di esempio i risultati del progetto FUMAPEX e in particolare le concentrazioni di NO₂ stimate in prossimità delle abitazioni di 300 bambini frequentanti due scuole in un quartiere di Bologna.

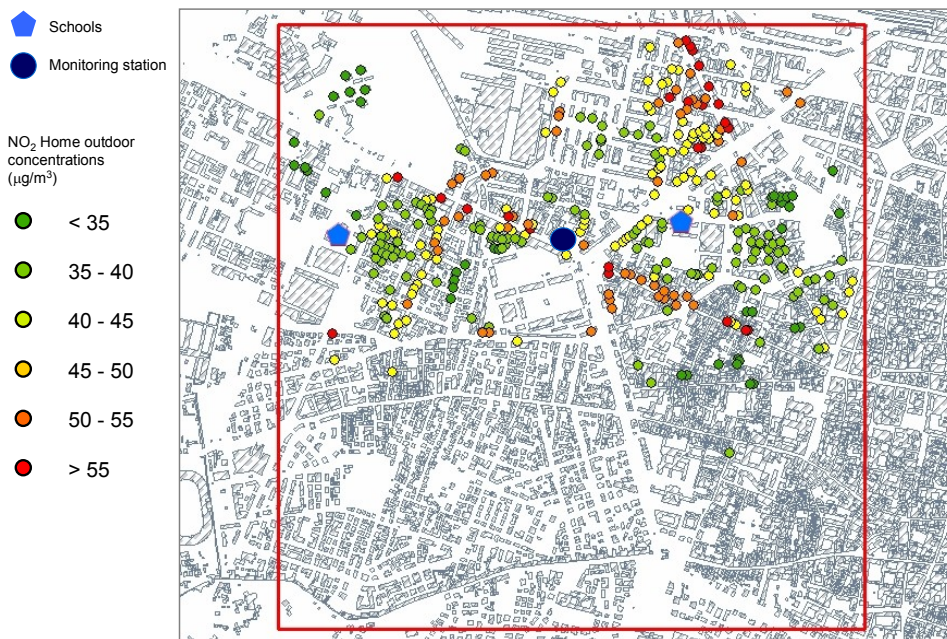


Figura 61 - Concentrazioni di NO_2 stimate in prossimità delle abitazioni di 300 bambini frequentanti due scuole in un quartiere di Bologna.. Fonte: Progetto FUMAPEX

Molto variegata in funzione delle classi dimensionali e delle singole componenti chimiche appare la valutazione della variabilità spaziale per il particolato. Il particolato fine, inteso come $\text{PM}_{2.5}$ mostra per esempio una variabilità molto ridotta all'interno dell'area urbana con differenze tra le diverse zone della città pari al 10-20%. Al contrario, il particolato ultrafine (particelle di diametro inferiore ai 100 nm) mostra differenze molto marcate, paragonabili a quelle riscontrate per il biossido di azoto. La figura 62 mostra a questo proposito alcuni risultati del progetto SUPERSITO relativi alle differenze di concentrazioni di $\text{PM}_{2.5}$ e particelle ultrafini tra una zona ad alto traffico ed una zona residenziale a basso traffico nell'area urbana di Bologna (Zauli Sajani et al., 2015). Molto variegata e legata alle componenti più legate alle emissioni veicolari risulta la variabilità delle singole componenti chimiche del particolato (Zauli Sajani et al., 2015).

Il fattore principale che influisce sulla variabilità spaziale degli inquinanti è infatti il traffico veicolare. Questo risulta vero anche per un inquinante secondario come l'ozono che però mostra con le sorgenti da traffico una relazione opposta rispetto agli altri. La reattività chimica di questo inquinante con gli ossidi di azoto è all'origine di un effetto per certi aspetti anomalo: le zone della città con le più alte concentrazioni di ossidi di azoto tendono ad essere quelle con le più basse concentrazioni di ozono (Fecht et al., 2016). Non è quindi difficile trovare in estate le concentrazioni più elevate di ozono in prossimità di parchi e aree verdi.

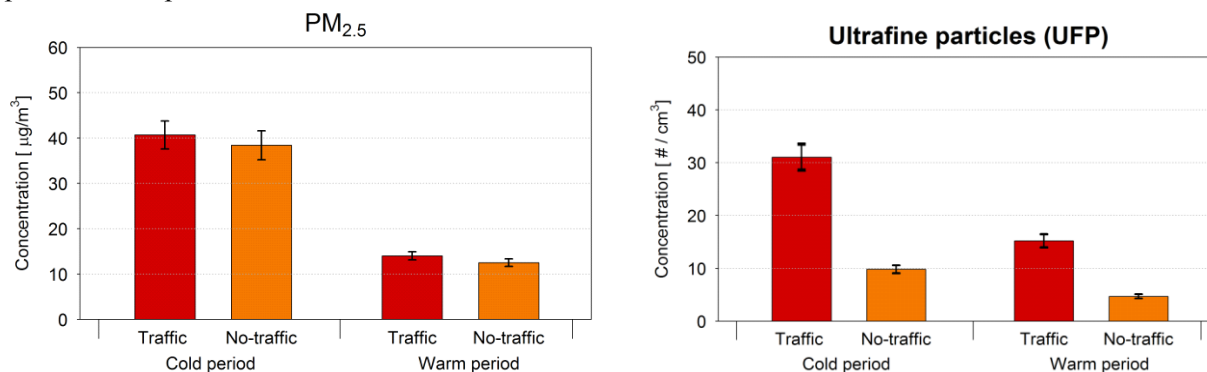


Figura 62 – Variabilità spaziale delle concentrazioni di $\text{PM}_{2.5}$ e particelle ultrafini – Dati progetto SUPERSITO

A fronte infatti di una marcata variabilità spaziale di alcuni parametri e specie chimiche è però emersa una ottima correlazione tra i diversi siti per quasi tutti i parametri considerati (figura 63). Si può quindi concludere che la meteorologia modula temporalmente in modo uniforme anche i parametri di qualità dell'aria che mostrano una maggiore variabilità spaziale. Corollario di questo risultato è che l'esposizione degli individui quando si trovano in ambiente outdoor segue andamenti temporali simili.

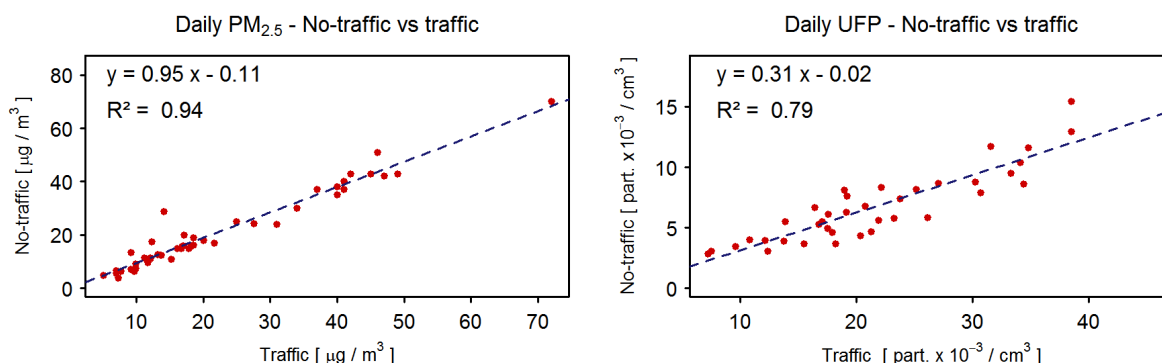


Figura 63 – Grafici a dispersione e rette di regressione tra i dati di PM_{2.5} e UFP misurati in un sito ad alto e uno a basso traffico nell'area urbana di Bologna.-Fonte: Progetto SUPERSITO

Esposizione personale e microambienti

Se la variabilità spaziale degli inquinanti influisce certamente nel determinare l'esposizione a livello individuale è però anche vero che alcuni altri fattori sono altrettanto o spesso più rilevanti. La nostra vita quotidiana è caratterizzata da frequenti spostamenti tra ambienti aperti e confinati con caratteristiche molto diverse dal punto di vista dei livelli di inquinanti presenti. In termini di tempo l'insieme degli ambienti indoor risulta essere di gran lunga il contributo dominante rispetto all'esposizione complessiva. In Italia, secondo diverse ricerche condotte negli ultimi 20 anni, la popolazione trascorre in media circa il 90% del tempo in ambienti indoor. Per alcuni gruppi di persone come bambini, anziani, e malati la percentuale di tempo trascorsa in casa diventa quella preponderante e la percentuale ulteriormente accresciuta.

L'esposizione personale è quindi considerabile come una media ponderata nel tempo delle concentrazioni presenti nei vari ambienti con cui ogni individuo entra in contatto nel corso della giornata. La Figura 64 mostra altri risultati del già citato progetto FUMAPEX. In particolare la figura mostra il contributo di ognuno dei 4 microambienti considerati dal modello. Nel riquadro della stessa figura è poi possibile vedere le frequenze di esposizione media giornaliera nel campione di bambini. Si evidenzia una esposizione pari a circa il doppio per i più bambini più esposti al PM₁₀ rispetto a quelli meno esposti.

Esposizione a PM10

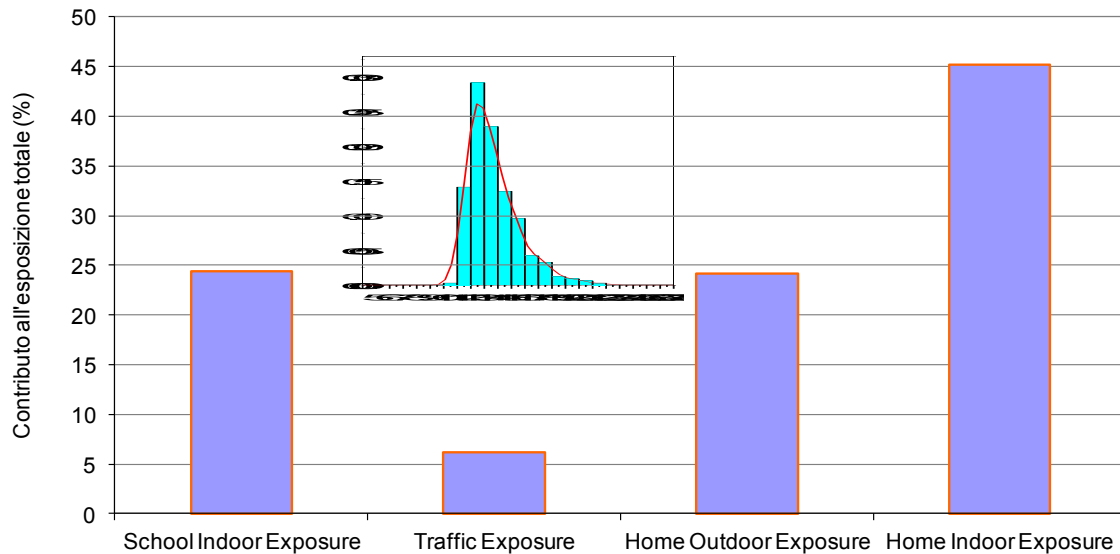


Figura 64 – Contributo dei vari microambienti all'esposizione complessiva al PM10 per un gruppo di bambini. Dati ottenuti nell'ambito del Progetto FUMAPEX. Fonte: Progetto FUMAPEX

Risultati simili, con un approccio però di tipo sperimentale, sono stati ottenuti in uno studio effettuato a Barcellona (progetto "BREATHE", Rivas et al 2015) su 45 bambini (7-10 anni) provenienti da 25 diverse scuole. I risultati di questi studi hanno evidenziato che le concentrazioni più elevate degli inquinanti sono sperimentate dai bambini durante gli spostamenti mentre le concentrazioni più basse sono state trovate all'interno delle abitazioni. Considerato però il diverso tempo passato dai bambini nei diversi microambienti, la casa e la scuola rappresentano i contributi principali all'esposizione complessiva mentre il più alto rapporto tra livelli di esposizione e tempo impiegato è stato osservato per gli spostamenti.

Il ruolo dei mezzi di trasporto

Come detto nel paragrafo precedente l'esposizione durante gli spostamenti può giocare un ruolo rilevante e per questo è stata oggetto negli ultimi 10 anni di attenzioni crescenti. Il mezzo di trasporto è un microambiente decisamente atipico ed eterogeneo. Non è infatti classificabile propriamente né come ambiente indoor né outdoor. L'automobile, il tram, la metropolitana e il bus sono certamente ambienti confinati ma decisamente molto particolari. Gli spostamenti effettuati in bicicletta o a piedi comportano invece una esposizione in ambiente non confinato ma estremamente variabile in funzione della variabilità spaziale delle concentrazioni outdoor.

Il peso dell'esposizione associata agli spostamenti sull'esposizione complessiva è molto variabile a seconda delle caratteristiche specifiche delle aree urbane, del mezzo di trasporto, del tempo impiegato per gli spostamenti (nelle grandi città e per i pendolari questo tempo può essere consistente, spesso superiore alle 2 ore giornaliere) e della modalità di trasporto (attiva nel caso di spostamenti a piedi e, soprattutto, in bicicletta, con conseguente maggiore attività di ventilazione polmonare). Se è difficile quindi trarre conclusioni con validità generale è però possibile avere alcune indicazioni utili.

Un primo elemento di riflessione è legato all'automobile, generalmente percepita, almeno a livello inconscio, come una sorta di protezione dall'inquinamento esterno. Numerosi studi hanno evidenziato che questa percezione è generalmente sbagliata. È infatti ormai assodato che spesso all'interno dell'abitacolo si raggiungono concentrazioni elevate per diversi inquinanti tra cui le particelle ultrafini e altri inquinanti primari da traffico.

Questo è stato confermato anche dai risultati di alcuni progetti di ricerca italiani, tra cui in particolare i progetti UPUPA (Ultrafine particles in urban Piacenza area) e MULAN (Multilevel approach to the study of nanomaterials health and safety). Nell'ambito di questi studi sono stati messi a confronto i livelli di esposizione durante spostamenti analoghi effettuati mediante diversi mezzi di trasporto

(percorsi pedonali, bicicletta, mezzi pubblici, automobile, metropolitana). È emerso che il percorso effettuato in automobile può esporre gli occupanti del veicolo a concentrazioni di monossido di carbonio e di particelle ultrafini più elevate rispetto alle altre modalità di trasporto. La Figura 65 mostra la variabilità dei livelli di concentrazione di particolato ultrafine osservata durante percorsi effettuati con diversi mezzi di trasporto nell'area urbana Piacenza, evidenziando in particolare l'elevata esposizione degli spostamenti con un'automobile utilitaria. Tuttavia, in letteratura diversi studi hanno sottolineato l'influenza della tipologia di veicolo e delle condizioni di ventilazione dell'abitacolo sui livelli di concentrazione associati agli spostamenti in auto. Misure effettuate d'estate a Milano utilizzando un'automobile monovolume con sistema di ventilazione e condizionamento in funzione, hanno mostrato valori di particolato ultrafine più bassi rispetto all'aria ambiente esterna ed ai livelli di esposizione di analoghi spostamenti in bicicletta. (Ozgen et al., 2016).

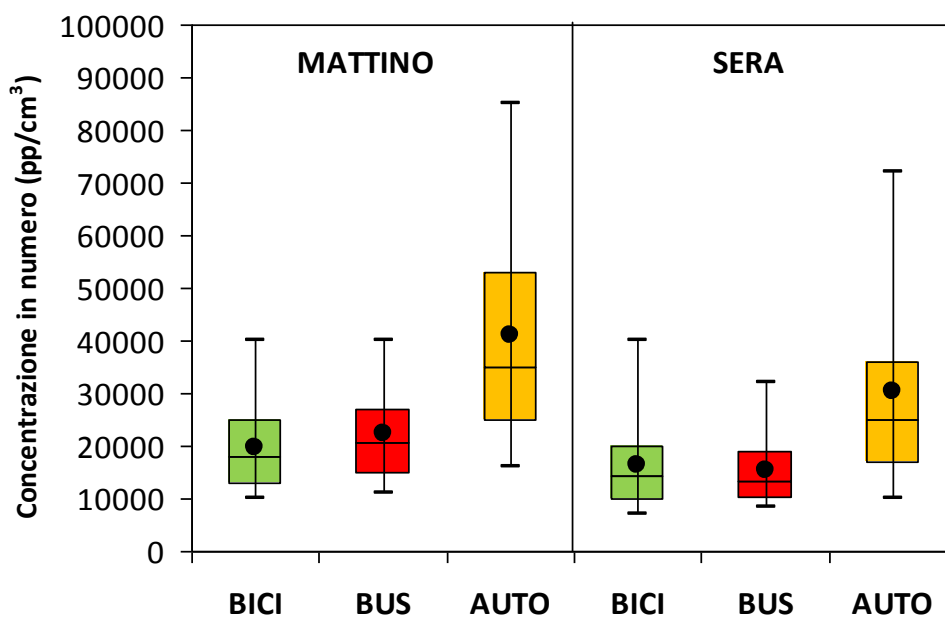


Figura 65 – Livelli di esposizione a particolato ultrafine osservati durante percorsi urbani effettuati d'estate a Piacenza con diversi mezzi di trasporto. Dati ottenuti nell'ambito del Progetto UPUPA -Fonte: Progetto UPUPA

A Barcellona è stata valutata l'esposizione dei cittadini alla concentrazione in numero di particelle per il PM_{2.5} durante percorsi effettuati in tram, in metropolitana, in autobus e a piedi (Moreno et al., 2015). Il percorso con autobus diesel o a piedi in strade trafficate del centro città sono risultate le modalità di spostamento in cui il numero di particelle è più alto. Se invece ci si riferisce alla concentrazione in massa, i valori più alti sono quelli associati ad autobus e metropolitana. Le particelle di dimensioni maggiori si trovano nella metropolitana (intorno ai 90 nm) mentre nell'aria outdoor la dimensione media delle particelle è inferiore di 70 nm.

Numerose evidenze sperimentali riportano valori di concentrazione di PM₁₀ all'interno della metropolitana superiori ai 400 µg/m³ e spesso di gran lunga superiori a quelli rilevati nella corrispondente aria esterna (Brini et al., 2016). Ad esempio a Roma la concentrazione di PM₁₀ rilevata sulla banchina della metropolitana è risultata essere di un ordine di grandezza più alta di quella rilevata simultaneamente nell'aria outdoor (Perrino et al., 2015).

Il contributo dell'ambiente indoor all'esposizione

Se gli spostamenti possono comportare dei picchi di esposizione è però vero che il contributo di gran lunga dominante all'esposizione complessiva è generalmente quello legato agli ambienti indoor e cioè casa, luogo di lavoro, scuola ecc.

Un primo aspetto su cui è importante porre l'attenzione nell'analisi delle condizioni di esposizione in ambiente indoor è il fatto che di per sé le mura e gli infissi di una casa o di un luogo di lavoro rappresentano un fattore di protezione rispetto all'inquinamento di origine outdoor. Anche in questo contesto occorrerebbe specificare più nel dettaglio quanto l'involucro di un edificio rappresenti un

ostacolo per la penetrazione dei vari inquinanti in forma gassosa o particellare ma è però vero che in qualche misura pareti e infissi rappresentano sempre un ostacolo per la penetrazione indoor degli inquinanti.

Il rapporto indoor/outdoor e le trasformazioni chimico-fisiche del particolato tra l'interno e l'esterno di un ambiente privo di sorgenti indoor sono state oggetto di specifiche campagne di misura nell'ambito del progetto Supersito (Zauli Sajani et al., 2015). La Figura 66 mostra le differenze tra i livelli indoor e outdoor di PM_{2.5} e particelle ultrafini. Le concentrazioni indoor sia di PM_{2.5} che di UFP sono risultate molto più basse rispetto all'outdoor, in particolare quando le concentrazioni all'aperto erano alte e le temperature più basse. Un ruolo importante nella riduzione delle concentrazioni di particelle all'interno degli edifici sembrano giocare la deposizione sulle superfici indoor, l'aggregazione delle particelle più fini nel passaggio dall'ambiente outdoor a quello indoor e la volatilizzazione di alcune sostanze con il passaggio dalla fase solida a quella di vapore. Queste dinamiche di trasformazione chimico-fisica influenzano in particolare i rapporti indoor/outdoor dei nitrati, e, in misura minore, dell'ammonio, del potassio e dei solfati.

Risultati analoghi per quanto riguarda il rapporto indoor/outdoor del PM_{2.5} in ambienti privi di sorgenti sono stati ottenuti nell'ambito di una indagine condotta a Milano dall'Agenzia Milanese Mobilità Ambiente (Moroni et al., 2008).

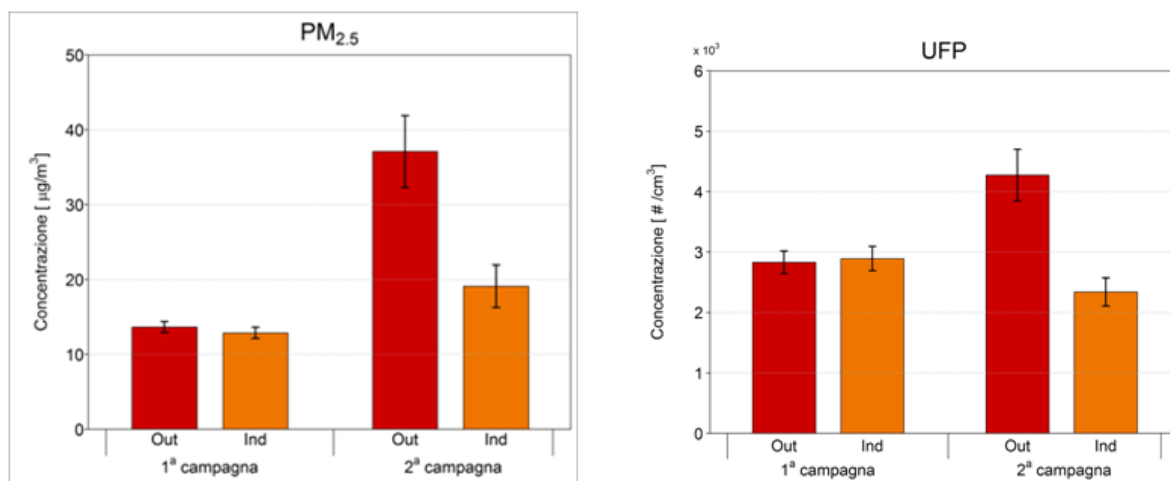


Figura 66 – Concentrazioni indoor e outdoor di PM_{2.5} e UFP nella stagione calda (1° campagna) e nella stagione fredda (2° campagna). Fonte: Progetto SUPERSITO

Come già detto, le nostre case non rappresentano però solo una protezione rispetto all'inquinamento di origine outdoor. Esse rappresentano per diversi inquinanti una importante fonte di emissione. Tra le fonti di inquinanti più comuni troviamo il fumo di tabacco, i processi di combustione, i prodotti per la pulizia e la manutenzione della casa, gli antiparassitari, l'uso di colle, adesivi, solventi ecc..., e l'utilizzo di strumenti di lavoro quali stampanti e fotocopiatrici (Tabella 28). Anche le emissioni dei materiali utilizzati per la costruzione e l'arredamento possono contribuire alla miscela di inquinanti presenti. Limitandoci agli inquinanti ubiquitari anche nell'ambiente outdoor è possibile dire che le sorgenti più importanti sono rappresentate da fornelli di cucina, caldaie e caminetti.

Tabella 28 *Principali sorgenti di emissione in ambiente indoor*

Ambiente	Fonti	Inquinanti
Casa	Fumo di tabacco	Particolato aerodisperso; monossido di carbonio; composti organici volatili; formaldeide.
	Forni a gas e caldaie a gas	Biossido di azoto; monossido di carbonio; biossido di zolfo.
	Forni a legna e caminetti	Particolato aerodisperso; biossido di azoto; monossido di carbonio; biossido di zolfo; idrocarburi policiclici aromatici.
	Materiali da costruzione	Radon; formaldeide; composti organici volatili; amianto.
	Arredamenti e prodotti di consumo	Formaldeide; composti organici volatili; pesticidi.
	Condizionatori e superfici umide	Agenti biologici; particolato aerodisperso.
	Apparecchiature elettriche	Campi elettromagnetici.
Uffici e scuole	Fumo di tabacco	Particolato aerodisperso; monossido di carbonio; composti organici volatili; formaldeide.
	Materiali da costruzione	Radon; formaldeide; composti organici volatili; amianto.
	Arredi	Formaldeide; composti organici volatili.
	Stampanti e fotocopiatrici	Composti organici volatili; ozono.
	Impianti di condizionamento e di ventilazione	Agenti biologici; particolato aerodisperso; biossido di azoto; monossido di carbonio.
	Materiale didattico e di cancelleria	Composti organici volatili.
Mezzi di trasporto	Fumo di tabacco	Particolato aerodisperso; monossido di carbonio; composti organici volatili; formaldeide.
	Inquinanti esterni	Monossido di carbonio; benzene; biossido di azoto; particolato aerodisperso; ozono.
	Condizionatori	Agenti biologici.

Elaborazione: ISPRA, 2009

Nella Tabella 29 sono riportati i risultati di uno studio condotto a Roma sulla variabilità stagionale del rapporto I/O del numero totale di particelle (Di Menno Di Bucchianico et al., 2013).

Tabella 29– *Variazione stagionale dei fattori di infiltrazione misurati in differenti abitazioni -Fonte: (Di Menno Di Bucchianico et al., 2013)*

<i>Indoor/Outdoor particle number concentration ratio vs infiltration factor</i>							
<i>Home 1</i>	<i>I/O_{ratio}</i>	<i>F_{inf}</i>	<i>R²_{Finf}</i>	<i>Home 2</i>	<i>I/O_{ratio}</i>	<i>F_{inf}</i>	<i>R²_{Finf}</i>
<i>Summer</i>	0.97	0.95	0.98	<i>Summer</i>	1.01	0.99	0.97
<i>Autumn</i>	0.99	0.84	0.56	<i>Autumn</i>	1.00	0.70	0.62
<i>Winter</i>	0.68	0.60	0.97	<i>Winter</i>	0.82	0.63	0.37
<i>Spring</i>	1.08	0.92	0.45	<i>Spring</i>	1.00	0.90	0.63
<i>Year</i>	0.97	0.85	0.72	<i>Year</i>	0.97	0.80	0.65

Uno studio condotto in tre scuole di Roma ha messo in evidenza come la qualità dell'aria negli edifici scolastici è fortemente dipendente dai processi di infiltrazione dell'aria outdoor: è stata rilevata una significativa penetrazione dell'aria outdoor sia durante l'inverno che nel periodo primaverile/estivo per quei componenti del PM associati alle particelle più fini (K^+ , EC, SO_4^{2-}) (Tofful e Perrino, 2015). Nella figura 67 vengono rappresentati i contributi delle principali sorgenti di PM_{2.5} indoor e outdoor con riferimento a un appartamento di Roma in estate e in inverno (Perrino et al., 2016). Durante l'estate i principali contributi al PM_{2.5} outdoor sono risultati il particolato originato dal suolo (in media il 30%) e il particolato secondario inorganico (29%) e organico (22%). Il PM indoor è dominato dai composti organici (60%). Durante l'inverno invece i componenti organici sono i principali componenti sia della concentrazione outdoor (51%) che di quella indoor.

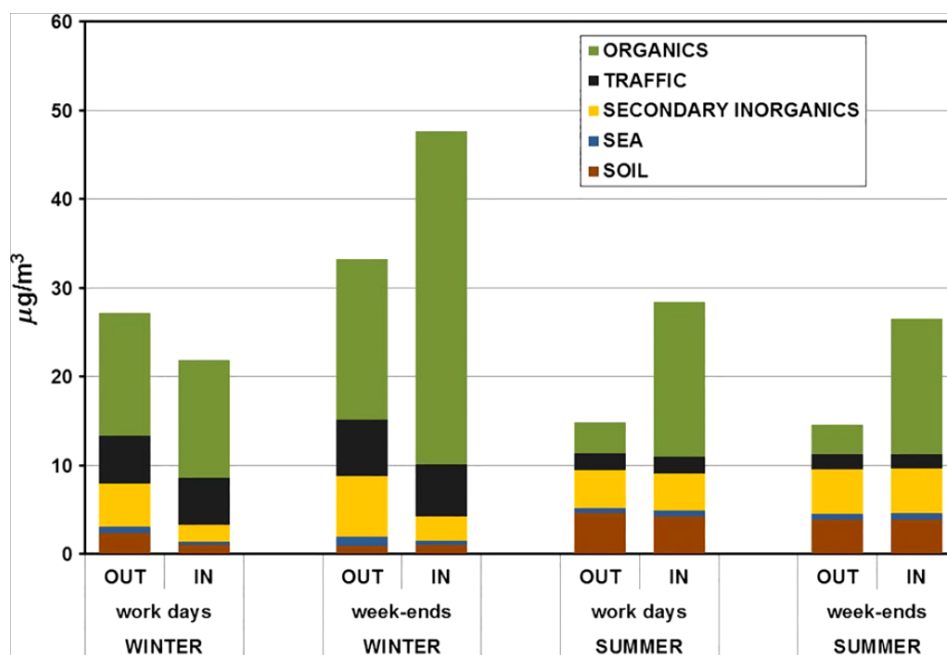


Figura 67 –Principali macro-sorgenti di PM2.5 indoor e outdoor durante i giorni feriali e il weekend in un appartamento di Roma- Fonte: Perrino et al., 2016.

Inquinamento indoor e tasso di ricambio dell'aria

Nei paragrafi precedenti si è cercato di evidenziare come l'ambiente abitativo abbia un ruolo ambivalente e in parte contraddittorio: da un lato protegge dall'inquinamento outdoor e dall'altro è impattata dall'inquinamento indoor. La casa in un certo senso infatti "respira", scambia cioè aria con l'ambiente esterno.

Stupirà a questo proposito che nella maggior parte delle case, anche nel periodo invernale, il ricambio d'aria, anche con finestre chiuse, sia molto consistente tanto da indurre un ricambio completo dell'aria in tutto l'appartamento in un intervallo di tempo pari a qualche ora.

Esistono diversi fattori che influiscono su questo aspetto il primo dei quali è legato alle abitudini personali e cioè alla frequenza e durata di apertura delle finestre, aspetti questi su cui influisce anche il clima tipico dell'area. Non meno importanti sono le caratteristiche costruttive dell'edificio considerato, e in particolare la tipologia di infissi. Le case di nuova costruzione da questo punto di vista si differenziano in modo significativo da quelle delle costruzioni tipiche dei decenni precedenti. L'obiettivo del risparmio energetico ha infatti portato alla costruzione di edifici a tenuta quasi stagna.

Il rischio è che nelle case con scarso scambio di aria con l'esterno l'impatto delle sorgenti indoor possa risultare incrementato in modo considerevole. La Figura 68 esemplifica questo rischio mostrando i risultati del progetto SEARCH 1. Nella prima fase di questo progetto internazionale (SEARCH 1 2007-2009), promosso e finanziato dal Ministero dell'Ambiente con lo scopo di promuovere il miglioramento della qualità dell'aria indoor nelle scuole, per ridurre il rischio di problemi respiratori acuti e cronici e la frequenza delle crisi allergiche in bambini sensibili, sono stati effettuati monitoraggi indoor e outdoor in 13 scuole di 6 Regioni (Lombardia, Emilia-Romagna, Lazio, Piemonte, Sardegna e Sicilia).

Tra i vari obiettivi del progetto c'era anche la valutazione dell'impatto dell'apertura delle finestre sulle concentrazioni indoor di alcuni inquinanti. La figura mostra come la frequente ventilazione delle classi porti ad un incremento delle concentrazioni degli inquinanti di origine outdoor (NO₂ e PM10) e contemporaneamente ad un decremento delle concentrazioni degli inquinanti di origine indoor come la formaldeide.

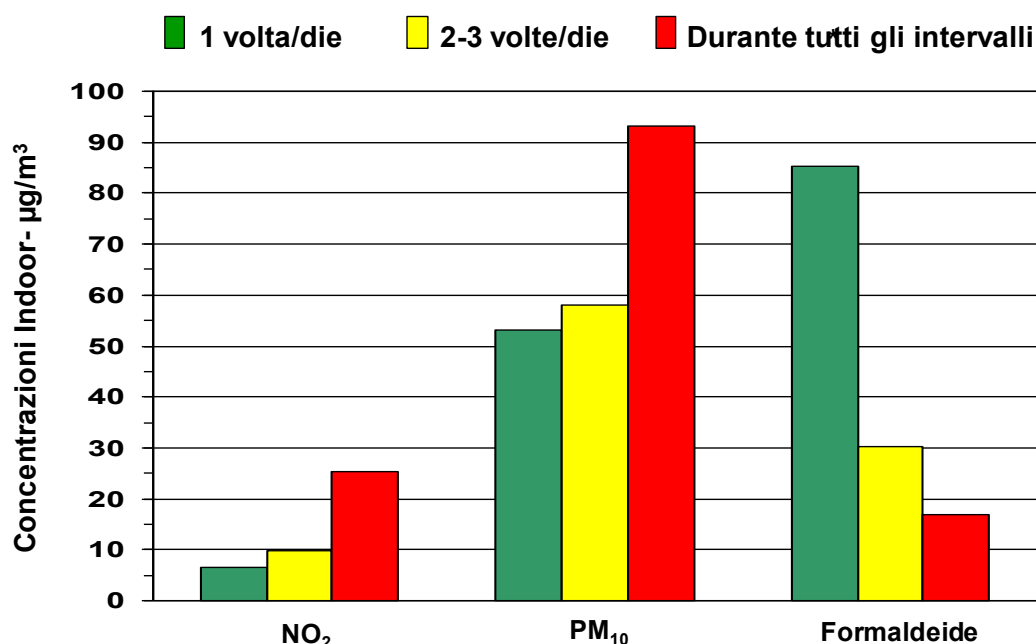


Figura 68 – Concentrazioni medie indoor di NO₂, PM₁₀ e Formaldeide in funzione della frequenza di apertura delle finestre nel campione di scuole coinvolte nel progetto SEARCH.
Fonte: Progetto SEARCH (www.search.rec.org)

Inoltre, nelle fasi successive del SEARCH (SEARCH 2 Project (2010-2013) sono stati indagati sia in Italia che negli altri 9 Paesi partner anche altri fattori di rischio, tra cui il comfort nelle aule e il ruolo delle politiche di sostenibilità nella prevenzione dell'emissioni indoor da materiali e prodotti. Al fine di aumentare la consapevolezza sui rischi indoor in ambiente scolastico nell'ambito del SEARCH 3 è stato sviluppato il sito multimediale AIRPACK (versione inglese e italiana <http://airpack.rec.org/>) con materiale didattico per gli insegnanti e un'area giochi per ragazzi sulla tematica della qualità dell'aria indoor, sulle principali sorgenti inquinanti e sui comportamenti da intraprendere per mitigare i rischi per la salute.

Conclusioni

I fattori di rischio in ambiente indoor hanno una notevole rilevanza per la salute pubblica, sia per l'esistenza di fattori di rischio propri degli ambienti confinati, sia per il contributo indoor all'esposizione agli inquinanti tipici dell'ambiente outdoor. Anche l'Organizzazione Mondiale della Sanità (WHO Euro) e la Comunità Europea (Strategia Europea Ambiente e Salute e Piano d'Azione) hanno riconosciuto il ruolo dell'ambiente indoor in una efficace strategia integrata di riduzione dell'esposizione della popolazione all'inquinamento atmosferico ("The Right to Healthy Indoor Air" – WHO Europe). Se gli ultimi anni hanno visto un miglioramento complessivo dei livelli degli inquinanti - sia in ambiente indoor che outdoor - occorre proseguire con questo sforzo congiunto sfruttando le nuove tecnologie disponibili e rendendo la popolazione più consapevole dell'importanza delle proprie abitudini nel determinare la propria esposizione agli inquinanti atmosferici (in particolare in ambiente indoor).

Un aspetto importante per la difesa della nostra salute è rappresentato proprio dalla ricerca di una riduzione efficace delle sorgenti indoor e del giusto "ritmo di respirazione" delle nostre case. Questo equilibrio dovrebbe essere idealmente trovato con una analisi specifica delle caratteristiche costruttive dell'edificio, della tipologia di sorgenti indoor, della zona in cui l'edificio è collocato insieme alle giuste necessità di ottimizzazione in chiave di risparmio energetico.

BIBLIOGRAFIA

Beelen, R.M.J., Hoek, G., Vienneau, D., et al., 2013. Development of NO₂ and NO_x land use regression models for estimating air pollution exposure in 36 study areas in Europe - The ESCAPE project. *Atmospheric Environment*, 72:10-23.

Brini S., Canepari S., Cattani G., De Maio F., Di Menno di Bucchianico A., Lepore A., 2016. A critical analysis of the literature on the characterization of air in the subway. Poster presentato alla 28° Annual Conference dell'International Society for Environmental Epidemiology: "Old and new risks: challenges for environmental epidemiology". 1-4 September 2016, Rome.

Di Menno Di Bucchianico A., Cattani G., Iglessis M., 2013. Outdoor/indoor particle infiltration factor in residential buildings and its relation with urban air quality. *Environmental Engineering and Management Journal* November 2013, Vol.12, No. S11, Supplement, 209-212

Fecht D, Hansell AL, Morley D, et al., 2016. Spatial and temporal associations of road traffic noise and air pollution in London: Implications for epidemiological studies. *Environ Int.* 88:235-42.

ISPRA, 2010. Inquinamento indoor: aspetti generali e casi studio in Italia. Rapporto 117/2010. ISBN: 978-88-448-0451-0

Moreno, T., Reche, C., Rivas, I., Minguillón, M.C., Martins, V., Vargas, C., Buonanno, G., Parga, J., Pandolfi, M., Brines, M., Ealo, M., Fonseca, AS., Amato, F., Sosa, G., Capdevila, M., de Miguel, E., Querol, X., Gibbons, W., 2015b. Urban air quality comparison for bus, tram, subway and pedestrian commutes in Barcelona. *Environmental Research* 142, 495–510.

Moroni S., Casadei S., 2008. Attività di studio e ricerca sulla valutazione del rischio di esposizione al particolato atmosferico per gli agenti della Polizia Locale di Milano. http://www.milanosimuove.it/wordpress/wp-content/uploads/2011/12/60320018_001.pdf

Ozgen, S., Ripamonti, G., Malandrini, A., Ragetli, M. S., & Lonati, G. (2016). Particle number and mass exposure concentrations by commuter transport modes in Milan, Italy. *AIMS Environmental Science*, 3(2): 168-184

Perrino, C., Marcovecchio, F., Tofful, L., Canepari, S., 2015. Particulate matter concentration and chemical composition in the metro system of Rome, Italy. *Environmental Science and Pollution Research* 22, 9204-14.

Perrino C., Tofful L., Canepari S., 2016. Chemical characterization of indoor and outdoor fine particulate matter in an occupied apartment in Rome, Italy. *Indoor Air*; 26: 558–570.

Rivas I, Viana M, Moreno T, et al., 2014. Child exposure to indoor and outdoor air pollutants in schools in Barcelona, Spain. *Environ Int.* 69:200-212.

Sarnat SE, Coull BA, Schwartz J, Gold DR, Suh HH., 2006. Factors affecting the association between ambient concentrations and personal exposures to particles and gases. *Environ Health Perspect.* 114(5):649-54.

SEARCH 1 project, (2007-2009 -AAVV "Qualità dell'aria a scuola: un dovere di tutti, un diritto dei bambini") MATTM, REC http://search.rec.org/search1/doc/I/SEARCH_1_Booklet_Ita.pdf

SEARCH 2 project (2011-2013) AA.VV. "Making Schools Healthy: Meeting Environment and Health Challenges", MATTM-REC 2013; http://search.rec.org/outcomes/uploads/documents/SearchMakingSchoolsHealthy_Web_Dec2013.pdf

AA.VV. "Targeting indoor air quality in sustainable patterns" MATTM-REC, http://documents.rec.org/publications/TargetingIndoorAirQuality_Web_Dec2013.pdf

SEARCH 3 project (2015): <http://airpack.rec.org/>

Spinazzè, A., Cattaneo, A., Scocca, D.R., Bonzini, M., Cavallo, D.M. Multi-metric measurement of personal exposure to ultrafine particles in selected urban microenvironments (2015) *Atmospheric Environment*, 110, pp. 8-17.

Spinazzè, A., Cattaneo, A., Peruzzo, C., Cavallo, D.M. Modeling population exposure to ultrafine particles in a major Italian urban area. (2014) *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11 (10), pp. 10641-10662.

Spinazzè, A., Cattaneo, A., Garramone, G., Cavallo, D.M. Temporal variation of size-fractionated particulate matter and carbon monoxide in selected microenvironments of the Milan urban area (2013) *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 10 (11), pp. 652-662.

Tofful L. e Perrino C., 2015. Chemical Composition of Indoor and Outdoor PM_{2.5} in Three Schools in the City of Rome. *Atmosphere*, 6, 1422-1443.

Zauli Sajani S, Passoni L, Hiininen O, Poluzzi V, Deserti M, Lauriola P. 2007. "Simulazioni di esposizione a NO₂ e PM₁₀ di bambini residenti nell'area urbana di Bologna" *Epidemiol Prev.* 31(5):253-60.

Zauli Sajani S, Ricciardelli I, Harrison R, et al. 2015. Spatial and indoor/outdoor gradients in urban concentrations of ultrafine particles and PM_{2.5} mass and chemical components. *Atmospheric Environment*, 103:307-320.