

OUTDOOR E INDOOR, COM'È L'ARIA A SCUOLA?

NELL'AMBITO DEL PROGETTO RIO, ARPAE EMILIA-ROMAGNA HA STUDIATO LE CONCENTRAZIONI DI OSSIDI DI AZOTO OUTDOOR E INDOOR IN UNA SCUOLA MEDIA DELL'AREA URBANA DI BOLOGNA. I RISULTATI EVIDENZIANO UN CARATTERE PROTETTIVO DELL'EDIFICIO E LE CORRELAZIONI CON METEOROLOGIA E DATI SUI FLUSSI DI TRAFFICO.

L'inquinamento dell'aria *indoor* e *outdoor* è uno dei fattori di rischio ambientale più rilevante per la salute pubblica. Per tale motivo le attività di monitoraggio e ricerca sono indirizzate a identificare azioni efficaci per la riduzione dell'esposizione della popolazione e per il controllo delle sorgenti di emissione. Le principali criticità sanitarie sono conseguenza sia dell'inquinamento *outdoor* delle aree urbane, luoghi caratterizzati da alta densità e numerosità della popolazione, sia dell'inquinamento che si trova negli ambienti *indoor* (abitazioni, uffici, scuole, ospedali, palestre, mezzi di trasporto ecc.) a causa dell'alta esposizione dei cittadini per l'elevato numero di ore giornaliere di permanenza negli ambienti chiusi.

In Italia i bambini e i ragazzi in età scolare trascorrono negli edifici scolastici un tempo importante della loro giornata, dalle 4 alle 8 ore. Si stima che il 15% della popolazione, pari a circa 10.000.000 persone, fra alunni e docenti, studi o lavori ogni giorno in circa 45.000 edifici pubblici su tutto il territorio nazionale (Rapporto Iss-Istisan 13/39, https://bit.ly/istisan13_39).

Numerose ricerche hanno evidenziato come l'inquinamento dell'aria interna (*indoor*), insieme al confort microclimatico, sia un determinante importante per la salute di studenti, lavoratori e soprattutto per i gruppi più vulnerabili quali bambini, adolescenti, soggetti allergici e asmatici. La presenza di inquinanti nell'aria *indoor* delle aule e degli ambienti scolastici è determinata non solo dall'inquinamento esterno, ma anche dalle caratteristiche strutturali dell'edificio scolastico, dalla presenza di potenziali sorgenti inquinanti, come ad esempio i materiali di arredo, costruzione e sostanze usate nelle operazioni di pulizia e manutenzione. La conoscenza di tali fattori di rischio per la salute è fondamentale per una loro gestione. La scuola, quindi, deve essere intesa non solo



come luogo di prevenzione, ma come veicolo e motore di educazione sanitaria e ambientale per gli alunni e le famiglie.

Il progetto Rio

Al fine di sviluppare una coscienza ambientale e sanitaria su tali temi, diversi sono stati i progetti e gli studi sviluppati. Uno di questi è lo studio denominato Rio (*Rapporto indoor/outdoor*), sviluppato da Arpae Emilia-Romagna in collaborazione col Comune di Bologna, il cui intento è stato quello di aumentare la conoscenza relativa agli inquinanti atmosferici, in particolare alla concentrazione di NO_x (ossidi di azoto) sia nelle aree esterne che nelle aree interne degli istituti scolastici. Le evidenze ottenute possono far scaturire importanti indicazioni per una gestione ottimale degli ambienti scolastici, al fine di migliorare la qualità dell'aria per gli occupanti, con particolare riferimento a orari e modalità di apertura e chiusura degli infissi in relazione alla variabilità giornaliera dei livelli di inquinamento, flussi di traffico, condizioni climatiche e tempi di riequilibrio delle concentrazioni *indoor-outdoor*, come meglio approfondito nel seguito. Il progetto Rio è nato dal dialogo all'interno del *Laboratorio Aria*, un percorso sperimentale di confronto

e collaborazione per creare attenzione intorno al tema della qualità dell'aria, frutto della sinergia tra Comune, Università, Asl, Città metropolitana di Bologna e Arpae Emilia-Romagna. Attraverso il *Laboratorio Aria* si intende accrescere la consapevolezza del problema dell'inquinamento in città, creando un flusso informativo costante, facendo dialogare i diversi sistemi e le tecnologie di misurazione e monitoraggio della qualità dell'aria già attivi e stimolando comportamenti che riducano l'impatto e i rischi per la salute. L'iniziativa è stata premiata nel 2019 con l'inserimento tra le C40 - Cities100 (https://bit.ly/Cities100_Bologna), un riconoscimento alle cento migliori buone pratiche provenienti dalle città di tutto il mondo che si sono contraddistinte per avere implementato azioni significative a livello locale indirizzate a contrastare i cambiamenti climatici e progettato uno sviluppo più sostenibile e *green*. Le attività realizzate si inseriscono in un contesto di forte sensibilità sul tema scuole e inquinamento, grazie anche alle attività promosse da *Aria pesa*, una rete civica composta da associazioni e comitati di cittadini bolognesi, uniti dall'impegno comune sulle tematiche ambientali. In particolare, con il Progetto Rio si è voluto studiare il rapporto delle

concentrazioni di NO_x fra un'area interna e un'area esterna alla scuola, maggiormente interessata dal traffico veicolare, come ad esempio l'area di sosta dei veicoli a servizio dell'istituto. La domanda a cui si è voluto dare risposta era: "L'edificio scolastico è protettivo rispetto agli ossidi di azoto?". Lo studio ha previsto la misura di NO_x (cioè NO e NO₂) con campionamenti ad alta risoluzione temporale di un minuto, in:

1. un punto di misura situato nelle immediate vicinanze della scuola (IC12 ubicato in via Popolonia n. 11 a Bologna, dove sono posizionate la scuola elementare O. Marella e la scuola media di I grado Farini), privilegiando, per la scelta del sito, l'area con il maggior impatto da traffico veicolare
2. in un punto posizionato all'interno dell'istituto.

Per le misure outdoor è stato utilizzato il laboratorio mobile di rilevamento della qualità dell'aria del Comune di Bologna, il quale è stato posizionato in un'area prospiciente l'entrata della scuola, adibita a zona di sosta delle auto. Per le misurazioni all'interno dell'istituto è stata individuata una stanza, non fruibile per le attività scolastiche, che è stata considerata rappresentativa di una aula di studio, sebbene di dimensioni ridotte (circa 15 m²) rispetto alla normale metratura di una aula utilizzata per le lezioni.

La strumentazione, che è stata impiegata all'interno della scuola, consisteva in un analizzatore di NO_x della Teledyne modello T200 con risoluzione temporale di 1 minuto, mentre nell'area esterna al perimetro dell'edificio scolastico è stato posizionato il laboratorio mobile, dove alloggiavano un analizzatore di NO_x modello Api 200E con risoluzione temporale di 1 minuto e la stazione per la rilevazione dei principali parametri meteorologici.

La campagna di misura è durata circa un mese, dal 15 novembre all'11 dicembre 2019. I dati grezzi sono stati aggregati per ottenere medie orarie, eliminando le ore la cui disponibilità di dati al minuto era inferiore al 75%. Inoltre, ai fini delle elaborazioni, i dati sotto il limite di quantificazione sono stati sostituiti con i valori riferiti alla metà del limite stesso (1q/2=4μg/m³).

Va specificato che, incidentalmente, circa dalle ore 16 del 25 novembre alle ore 10 del 27 novembre è stata lasciata aperta la finestra della stanza all'interno della scuola. L'esatto momento di apertura della finestra non è noto, ma dalle osservazioni si può ragionevolmente ipotizzare che sia avvenuto nel pomeriggio del 25 novembre, circa alle ore 16. Tale

FIG. 1
CONCENTRAZIONE DI NO

Andamento delle concentrazioni di NO indoor e outdoor alla scuola Farini. Le linee nera e rossa tratteggiata indicano il periodo in cui la finestra era aperta o si suppone che fosse stata lasciata aperta.

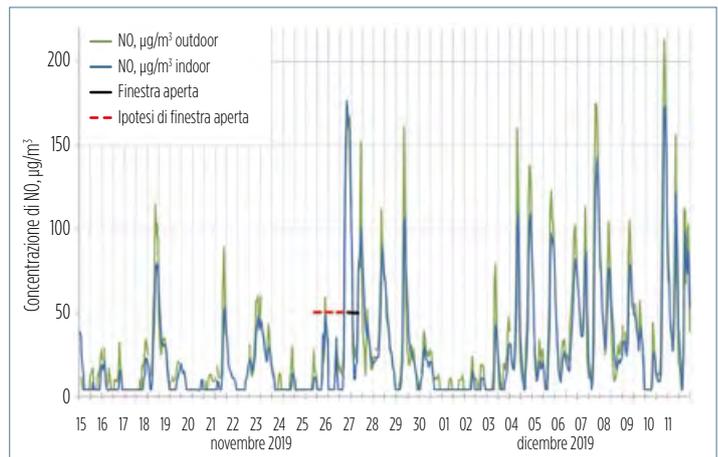


FIG. 2
CONCENTRAZIONE DI NO₂

Andamento delle concentrazioni di NO₂ indoor e outdoor alla scuola Farini. Le linee nera e rossa tratteggiata indicano il periodo in cui la finestra era aperta o si suppone che fosse stata lasciata aperta.

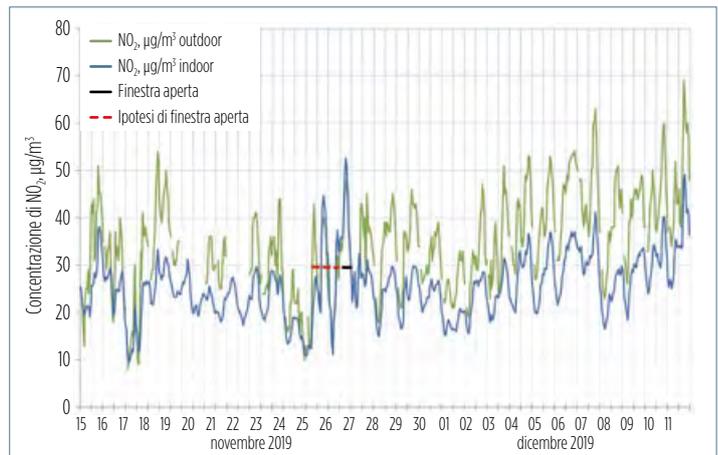


FIG. 3
ANDAMENTO NO

Andamento delle concentrazioni di NO indoor, NO outdoor alla scuola Farini e l'andamento del rapporto out/in nella prima settimana di studio. I numeri all'interno del grafico indicano l'orario di misura in corrispondenza dei picchi più rilevanti.

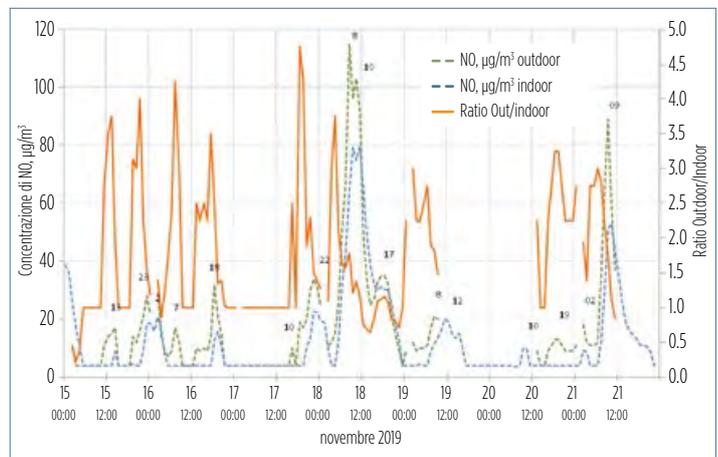
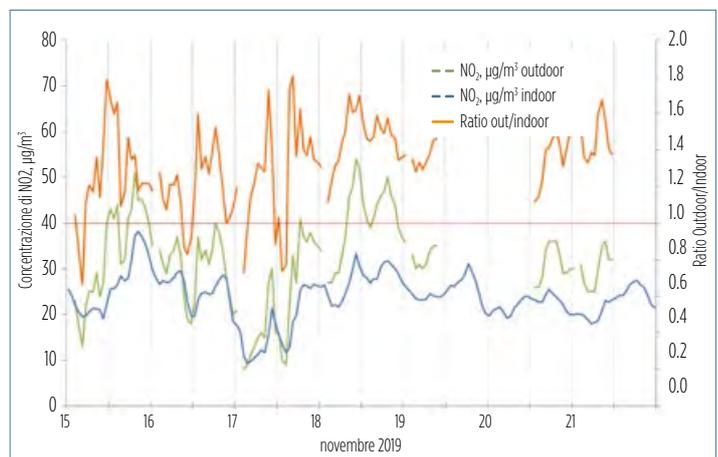


FIG. 4
ANDAMENTO NO₂

Andamento delle concentrazioni di NO₂ indoor, NO₂ outdoor alla scuola Farini e l'andamento del rapporto out/in nella prima settimana di studio.



informazione è particolarmente utile per la successiva analisi dei dati ottenuti.

Concentrazioni di NO e NO₂

Nelle figure 1 e 2 sono mostrati gli andamenti delle concentrazioni di NO e NO₂ nell'area esterna e interna all'edificio scolastico. Nei grafici è riportato anche il periodo durante il quale la finestra era aperta, evidenziando come, in questo lasso di tempo, gli analiti presi in considerazione tendano a convergere e ad andare verso un equilibrio tra l'indoor e l'outdoor.

Generalmente, tuttavia, si osserva come, quasi sempre, i dati outdoor risultino maggiori di quelli indoor, inducendo a ipotizzare un effetto "protettivo" dell'istituto scolastico. Il rapporto out/in medio di tutto il periodo è infatti rispettivamente 1,3 e 1,4 per NO e NO₂, medie ottenute escludendo il periodo di apertura della finestra.

Nelle figure 3 e 4 sono riportati gli andamenti delle concentrazioni di NO, NO₂ e del loro rapporto out/in nella prima settimana di indagine a titolo di esempio. Dal 15 al 21 novembre si osservano valori quasi sempre maggiori nell'outdoor sia per NO che per NO₂, con valori di ratio out/in fino a 4,5 per NO, e valori minori, fino a 1,8, per NO₂. Tali differenze, evidenziate anche nelle settimane successive, sono probabilmente imputabili agli aspetti termodinamici e cinetici di formazione e distruzione dei due composti. Interessante notare che il ratio out/in tende a 1 nel periodo in cui la finestra risulta aperta, dimostrando come i due inquinanti considerati tendano rapidamente, in queste condizioni, a un equilibrio.

Fra i parametri meteorologici misurati, gli eventi di pioggia sono risultati i più interessanti ai fini della comprensione della concentrazione osservata degli analiti. In particolare, l'effetto maggiore si è notato su NO₂, probabilmente a causa della sua solubilità in acqua molto maggiore (1,5 g/l a 293K) rispetto a quella di NO (0,056 g/l a 293K). In figura 5 è mostrato il grafico dell'andamento della concentrazione di NO₂ e degli eventi di pioggia nella prima settimana di studio. Come evidenziato nei riquadri arancio, si sono verificati almeno quattro eventi con precipitazioni significative. Durante i primi tre eventi, relativi ai giorni 15, 16 e 17 novembre, al momento di massima precipitazione si è osservata una diminuzione della concentrazione di NO₂ a causa della sua dissoluzione in

FIG. 5
ANDAMENTO NO₂
E PIOGGIA, PRIMA
SETTIMANA

Andamento delle concentrazioni di NO₂ indoor, NO₂ outdoor e della pioggia (LM= laboratorio mobile nel sito di studio) durante la prima settimana di misura. I numeri all'interno del grafico sono la somma dei mm di pioggia dell'evento precipitativo.

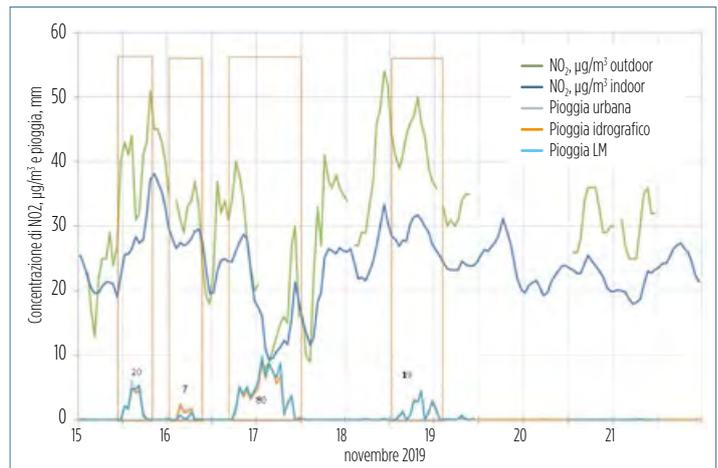


FIG. 6
ANDAMENTO NO₂
E PIOGGIA, SECONDA
SETTIMANA

Andamento delle concentrazioni di NO₂ indoor, NO₂ outdoor e della pioggia (LM= laboratorio mobile nel sito di studio) durante la seconda settimana di misura.

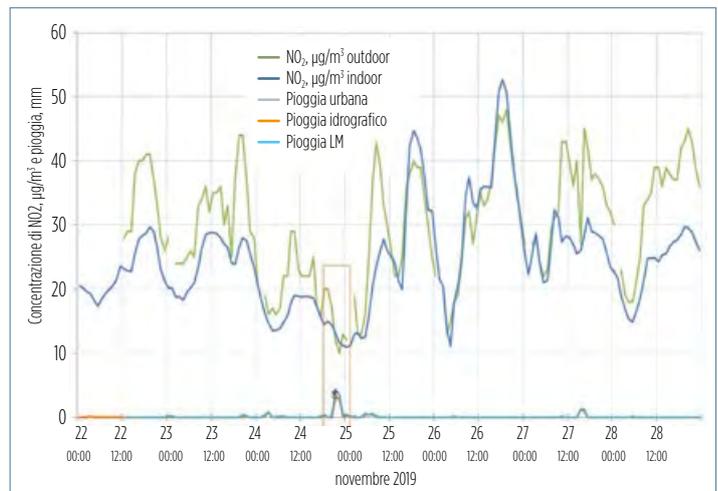
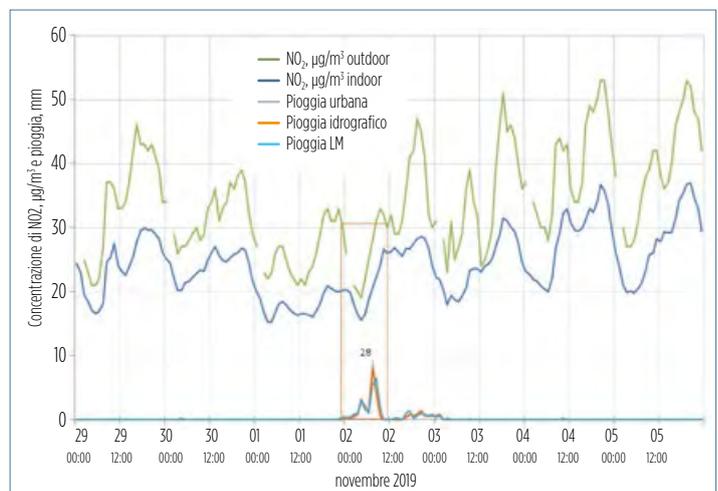


FIG. 7
ANDAMENTO NO₂
E PIOGGIA, TERZA
SETTIMANA

Andamento delle concentrazioni di NO₂ indoor, NO₂ outdoor e della pioggia (LM= laboratorio mobile nel sito di studio) durante la terza settimana di misura. I numeri all'interno del grafico sono la somma dei mm di pioggia dell'evento precipitativo.



acqua e alla sua conseguente rimozione dalla fase gas. Immediatamente dopo il momento della massima precipitazione, la concentrazione ha evidenziato un rapido aumento a causa del processo inverso. Tale fenomenologia non risulta però più così evidente durante l'ultimo evento precipitativo – caratterizzato da 19 mm di pioggia nella seconda parte della giornata del 18 novembre – dove la concentrazione di NO₂ ha visto un aumento durante il massimo della precipitazione. L'unico evento di pioggia della seconda settimana sembra causare

una diminuzione di concentrazione (figura 6). Da notare infine che l'evento di pioggia della terza settimana (figura 7), non sembra avere nessun effetto sulla concentrazione di NO₂. Sebbene sia quindi evidente l'importante ruolo degli eventi precipitativi in tali processi, per poterli interpretare al meglio dovrebbero essere considerati anche altri parametri, quali i flussi di massa emessi durante le rush hour, l'altezza del pbl (Planetary boundary layer), la velocità e la direzione del vento. In tabella 1 sono riportate le correlazioni

(R) delle concentrazioni di NO, NO₂ e NO_x fra *outdoor* e *indoor*. I valori di R variano da 0,85 a 0,94 se si considera tutto il periodo, tralasciando la fase in cui la finestra era stata lasciata aperta. Le correlazioni migliorano ulteriormente se si considera solamente il periodo in cui la finestra era aperta, raggiungendo valori compresi tra 0,97 e 0,99 (tabella 2).

Flussi di traffico

Sono stati inoltre indagati gli andamenti delle concentrazioni in relazione ai flussi di traffico nell'area circostante la scuola nel periodo dal 25 novembre al 1 dicembre 2019. Tre spire magnetiche, necessarie per il conteggio degli autoveicoli, erano posizionate in aree circostanti la scuola: una spira si trovava in via Lenin fra via Felsina e via Bartolini (distanza dalla scuola 150-750 m), una seconda spira in via Lenin fra via Bartolini e via Emilia Levante (distanza dalla scuola 750-850 m) in direzione nord e una terza in direzione sud.

Nei giorni lavorativi, i picchi di concentrazione di NO sembrano non coincidere con i flussi di traffico rilevati nelle immediate vicinanze (via Felsina), ma sembrano risentire maggiormente del traffico della zona di via Lenin fra via Emilia Levante e via Bartolini in direzione nord o, forse, di una zona più ad alto traffico quale la tangenziale che dista dalla scuola solo 500 metri.

Ai fini della localizzazione delle principali emissioni della zona è importante anche sottolineare la presenza della centrale termica della scuola, la cui distanza dall'edificio scolastico è di circa 40 metri. Si è valutato infine se negli orari di entrata e uscita degli alunni dalle scuole, cioè 8.00-13.35 per la scuola media e 8.30-16.30 per la scuola elementare, si fossero osservati picchi di concentrazione di inquinanti, soprattutto per il primario NO. Entrambe le scuole svolgono le lezioni dal lunedì al venerdì. Durante la prima settimana (figura 3) sono stati osservati due picchi evidenti di NO principalmente nelle ore di *rush hour* (le ore della giornata in cui le città sono maggiormente congestionate dal traffico, per es. al mattino e alla sera per gli spostamenti verso/da il luogo di lavoro) mattutine del 18 e 21 novembre, dalle 8 alle 10 circa, che potrebbero essere in parte riconducibili anche alle entrate degli studenti. Analogamente, per la seconda settimana sono stati rilevati tre picchi, due mattutini e uno serale coincidente con gli orari di spostamenti lavorativi. Per la terza settimana, due picchi di concentrazione

sono stati osservati alla mattina, alle ore 8, e forse coincidenti con l'entrata degli alunni nella scuola, mentre nelle ore serali sono stati misurati altri due picchi un po' troppo tardivi (ore 20-21) per essere attribuiti alle *rush hours*. Infine, nell'ultima settimana le concentrazioni di NO sono state maggiormente variabili rispetto alle tre settimane precedenti e hanno presentato alti valori di concentrazione: la maggior parte degli eventi di picco sono stati comunque registrati nelle ore di punta. In generale, i picchi sono stati spesso rilevati in corrispondenza delle ore di maggior traffico lavorativo, soprattutto alla mattina. Vista la coincidenza dell'entrata degli alunni nella scuola (ore 8 e 8.30) con le *rush hour* non è possibile distinguere se i picchi siano dovuti al maggior transito di auto nel parcheggio dell'istituto oppure al traffico delle arterie stradali adiacenti alla scuola.

L'analisi dei dati al minuto non ha mostrato elevati picchi di concentrazione di NO nei periodi di entrata/uscita dalla scuola: evidenze di aumenti di concentrazione sono maggiormente presenti alla mattina (per esempio aumenti di concentrazione di breve durata riconducibili a un inquinamento molto locale sono presenti il 25, 26, 27 e 28 novembre), a conferma che il maggior afflusso di studenti di entrambe le scuole fra le 8 e le 8.30 può incidere sulla concentrazione di NO. Nell'orario di uscita degli alunni alle ore 13.35 e ore 16.30 non sono evidenti importanti aumenti di concentrazione di NO: ciò potrebbe essere dovuto al minor numero di alunni rispetto a quello di entrata della mattina. Un'altra ipotesi è che parte degli alunni delle medie alle ore 13.35 tornino a casa a piedi. È bene osservare che, essendo via Popolonia una strada a fondo chiuso, le auto difficilmente si addentrano fin davanti all'entrata della scuola: ciò potrebbe spiegare la scarsa presenza di picchi di concentrazione nei periodi di entrata/uscita di scuola degli alunni.

Conclusioni

Le misure eseguite all'esterno e all'interno dell'edificio scolastico hanno messo in evidenza le seguenti osservazioni:
- i rapporti medi di concentrazione out/in per tutto il periodo indagato sono simili per NO e NO₂, rispettivamente 1,3 e 1,4, indicando un carattere "protettivo" dell'edificio; in particolare per bassi valori di NO i rapporti orari out/in aumentano indicando una maggiore protezione rispetto alle ore con maggiori/alte concentrazioni. Per NO₂

R	NO indoor	NO ₂ indoor	NO _x indoor
NO outdoor	0,94	-	-
NO ₂ outdoor	-	0,85	-
NO _x outdoor	-	-	0,94

TAB. 1 CORRELAZIONI

Correlazioni delle concentrazioni di NO, NO₂ e NO_x fra in e outdoor durante tutto il periodo di misura, escluso il periodo in cui la finestra era aperta.

R	NO indoor	NO ₂ indoor	NO _x indoor
NO outdoor	0,99	-	-
NO ₂ outdoor	-	0,97	-
NO _x outdoor	-	-	0,97

TAB. 2 CORRELAZIONI

Correlazioni delle concentrazioni di NO, NO₂ e NO_x fra in e outdoor del solo periodo di apertura della finestra.

i rapporti dei dati orari sono più lineari, indipendentemente dalle concentrazioni rilevate
- sia per NO che per NO₂ le correlazioni fra misure esterne ed interne sono molto buone (R=0,85-0,94). Le correlazioni tendono all'unità per il periodo in cui la finestra è stata lasciata accidentalmente aperta: l'equilibrio tra i due sistemi viene raggiunto rapidamente
- sebbene gli eventi precipitativi sembrano giocare un ruolo importante per comprendere gli andamenti delle concentrazioni di NO₂, al fine di interpretare i fenomeni che accadono, risultano necessari anche altri parametri quali i flussi di massa emessi, l'altezza del pbl, la velocità e la direzione del vento
- non sono state osservate buone correlazioni fra i flussi di traffico orari in corrispondenza delle tre spire magnetiche posizionate nell'intorno della scuola e le concentrazioni di NO e NO₂
- l'analisi dei dati al minuto di NO negli orari di entrata/uscita (ore 8-8.30, 13.35 e 16.30) degli alunni dell'istituto comprensivo statale n. 12 ha evidenziato possibili picchi di concentrazione alle ore 8-8.30, ma vista la coincidenza degli orari con le *rush hour* non è stato possibile discriminare l'effettiva causa.

Silvia Ferrari¹, Marco Trepiccione¹, Luca Malaguti¹, Andrea Aldrovandi¹, Andrea Mecati¹, Vanes Poluzzi¹, Cristina Volta¹, Giovanni Fini², Valentino Ventrella²

1. Arpae Emilia-Romagna

2. Comune di Bologna