

PROGETTO PULVIRUS

UN'ALLEANZA SCIENTIFICA PER IL FUTURO NATA IN TEMPI DRAMMATICI

Nel periodo iniziale della pandemia di Covid-19 è circolata l'ipotesi della connessione tra il virus Sars-cov-2 e la presenza di elevate concentrazioni di particolato nell'atmosfera. In quel momento i meccanismi di diffusione del contagio non erano ben chiari e ignote erano le interazioni con problemi molto studiati come l'inquinamento dell'aria. Sorgevano quindi molte domande e la comunità scientifica si è da subito messa in azione per cercare le risposte più plausibili.

Proprio in quel momento è nato il progetto Pulvirus, prodotto della collaborazione fra le principali istituzioni tecnico-scientifiche del Paese che agiscono a livello nazionale e a livello locale e che hanno la responsabilità di informare i decisori politici e l'opinione pubblica: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (Enea), Sistema nazionale per la protezione dell'ambiente (Snpa) e Istituto superiore di sanità (Iss).

Il progetto, partito nella primavera del 2020 e concluso a luglio 2022, si è configurato da subito come un'alleanza scientifica inedita e innovativa, che può diventare un esempio a livello nazionale e internazionale. L'obiettivo è stato quello di approfondire il legame fra inquinamento atmosferico e Covid-19, le interazioni fisico-chimiche-biologiche fra polveri atmosferiche e virus, gli effetti del *lockdown* sulle concentrazioni atmosferiche degli inquinanti e dei gas serra. I risultati di Pulvirus sono stati presentati a Roma il 24 ottobre 2022. In questo servizio di *Ecoscienza* ne presentiamo una sintesi dando la parola alle ricercatrici e ai ricercatori che hanno direttamente collaborato nei team al lavoro sui 6 obiettivi principali individuati.

“Abbiamo avviato una collaborazione durante i momenti drammatici nel pieno della crisi pandemica, con riunioni a distanza, quando il virus sembrava ci stesse mettendo in ginocchio”, ha ricordato durante l'evento di presentazione dei risultati Stefano Laporta, presidente di Ispra. “In quei momenti la nostra preoccupazione è stata quella di garantire i servizi di tutela e protezione dell'ambiente e cercare risposte mantenendo l'approccio lucido dell'approfondimento scientifico e puntando sull'importanza della ricerca pubblica per comprendere i fenomeni”.

Le domande a cui si è cercato di rispondere sono ambiziose e importanti per il futuro. Come sono cambiate durante il *lockdown*, deciso nel picco della pandemia da Covid-19, le emissioni e le concentrazioni di inquinanti atmosferici e di gas a effetto serra? Qual è stata l'influenza sulla composizione

chimica del particolato atmosferico? Esiste un'associazione tra particolato atmosferico e bioaerosol attraverso il quale si trasferisce il virus Sars-cov-2?

“L'obiettivo generale del progetto è stato quello di effettuare un'analisi seria e approfondita su queste tematiche, che fosse fondata su protocolli scientifici verificabili, così da fornire a istituzioni e cittadini informazioni attendibili utili per la migliore comprensione di ciò che stava accadendo e per l'assunzione delle opportune decisioni”, ha sottolineato Alfredo Pini, responsabile scientifico del progetto per il Snpa.

Il valore del progetto Pulvirus, che sul tema del possibile legame tra inquinamento atmosferico e pandemia si interseca anche con un altro progetto avviato nello stesso periodo, Epicovair, è quello di un'iniziativa di portata nazionale che ha messo a fattor comune rilevanti insiemi di competenze e dati di cui dispongono le tre istituzioni, esperienze e collaborazioni tecnico-scientifiche che permettono di raffinare e perfezionare i modelli, gli strumenti di analisi e i sistemi di allerta che la comunità scientifica può proporre a supporto concreto delle politiche ambientali e sanitarie, per la tutela della salute e per il benessere e il futuro delle comunità.

Gilberto Dialuce, presidente di Enea, nel corso della presentazione romana, ha ricordato l'ottima collaborazione che si è sviluppata tra le istituzioni e la necessità di continuare a lavorare insieme e “con un approccio integrato alle nuove sfide che dovremo affrontare, anche considerando l'effetto combinato tra cambiamento climatico, inquinamento atmosferico e salute”.

I risultati completi del progetto Pulvirus sono a disposizione di tutti sul sito www.pulvirus.it, ma il lavoro è tutt'altro che terminato.

“Abbiamo di fronte tematiche che emergeranno e che non hanno più confini disciplinari, sia dal punto di vista della conoscenza e dei determinanti sia dal punto di vista delle soluzioni possibili”, ha affermato Silvio Brusaferrò, presidente dell'Istituto superiore di sanità. “È necessario dialogare, collaborare, mettere in condivisione le conoscenze e la passione per la ricerca. Pulvirus è un ottimo esempio della capacità del nostro Paese, con i propri organi tecnici e scientifici, centrali e periferici, di lavorare insieme, affrontare i problemi e dare risposte. In una logica di *Planetary Health*, le sfide che oggi ci aspettano sono complesse, di lunga durata e vanno affrontate con una visione unitaria, ognuno con le proprie competenze”.

QUALITÀ DELL'ARIA IN ITALIA, GLI EFFETTI DEL LOCKDOWN

LA PANDEMIA DA COVID-19 CHE HA COLPITO L'ITALIA NEL 2020 HA PERMESSO LO STUDIO DI UN REALE SCENARIO DI RIDUZIONE DEI FLUSSI DI TRAFFICO PUBBLICO E PRIVATO CHE PRIMA POTEVA SOLO ESSERE SIMULATO. PER POTER PROCEDERE CON CONFRONTI CON ALTRI PERIODI, SI È RICORSO AI METODI STATISTICI PER LA NORMALIZZAZIONE DELLE VARIABILI.

Come noto, il 31 dicembre 2019 l'Oms *China Country Office* è stato informato della presenza di casi di polmonite di eziologia sconosciuta, per un totale di 44 pazienti, rilevati nella città di Wuhan, nella provincia cinese di Hubei.

Con il diffondersi dell'epidemia in Italia, a partire dal 31 gennaio 2020 il Governo e diverse Regioni hanno emanato provvedimenti via via più severi per limitare la diffusione del contagio tra la popolazione. Questa situazione di riduzione delle principali attività produttive e commerciali, unita alla riduzione dei flussi di traffico di veicoli privati, del trasporto pubblico e del trasporto delle merci su strada, via mare e del trasporto aereo è stata un evento del tutto inusuale per il nostro Paese.

In un contesto così drammatico, scandito dal rapido succedersi degli esiti sanitari, e dalla febbrile ricerca di soluzioni atte almeno a contenere e gestire l'afflusso dei pazienti nelle strutture di cura, il tema dell'inquinamento atmosferico si è rivelato strategico, sia pure a latere dell'elemento principale che è stata la diffusione del virus Sars-cov-2, per due sostanziali motivi. Il primo riguarda le ipotesi di possibili relazioni tra esposizione all'inquinamento atmosferico e suscettibilità all'infezione, a tutt'oggi oggetto di diversi studi e

approfondimento da parte della comunità scientifica internazionale.

Il secondo legato al fatto che, oggettivamente, la situazione che si è venuta a creare ha stimolato l'interesse di addetti ai lavori e non, riguardo agli effetti che una riduzione estesa a diverse sorgenti antropiche e generalizzata sul territorio nazionale potesse avere sulla qualità dell'aria.

Tale interesse non rappresenta una mera curiosità. In realtà l'Italia, come gli altri Stati membri dell'Unione europea, è impegnata nell'intraprendere azioni efficaci per ridurre le emissioni dei principali inquinanti e in particolare quelle del materiale particolato e dei suoi precursori (ammoniaca, composti organici volatili, ossidi di azoto). La valutazione degli effetti delle misure di risanamento della qualità dell'aria attraverso l'analisi degli andamenti delle concentrazioni rilevate nelle stazioni di monitoraggio è complessa in ragione della natura dei meccanismi che regolano la diffusione, il trasporto, la trasformazione, e la deposizione delle sostanze inquinanti e la relazione tra questi, il punto o area di emissione e il punto di osservazione. I fattori determinanti di questa complessità, per un dato inquinante, sono fondamentalmente le condizioni meteorologiche su scala

locale e mesoscala e la relativa variabilità temporale nel periodo di osservazione; l'orografia nell'intorno del punto di misura; la modulazione temporale delle sorgenti emissive, nonché la complessità delle reazioni chimiche che avvengono in atmosfera.

Sulla base delle sole osservazioni provenienti dalle reti di monitoraggio del Sistema nazionale per la protezione dell'ambiente (Snpa) è emerso un primo dato macroscopico ed esteso all'intera penisola: la riduzione delle concentrazioni degli ossidi di azoto (monossido, che è la forma prevalente emessa direttamente, e biossido, in parte emesso direttamente e in parte formato in atmosfera), del monossido di carbonio e del benzene.

Tale riduzione, attestata per il biossido di azoto mediamente intorno al 40%, andava, nel periodo osservato, da pochi punti percentuali a valori superiori al 70% in alcuni siti localizzati in prossimità di importanti arterie stradali (stazioni classificate come "traffico urbano"). In generale nelle stazioni di fondo urbano, suburbano e rurale la riduzione delle concentrazioni degli ossidi di azoto e del benzene è meno marcata fino a essere in alcuni casi non significativa. Anche a fronte di una riduzione così ampia, il confronto con periodi analoghi



di anni precedenti rimane affetto da ampia incertezza dovuta alla variabilità delle condizioni meteorologiche che si possono verificare tra un anno e l'altro. Inoltre, molto meno chiara appariva la situazione relativa al materiale particolato (PM_{10} , $PM_{2,5}$). Occorre ricordare in questo caso che si tratta di una miscela complessa di particelle solide e liquide disperse in atmosfera.

La principale debolezza degli studi "osservazionali" risiede nel fatto che essi si basano essenzialmente sul confronto tra i dati misurati durante il *lockdown* e quelli misurati nel periodo immediatamente precedente o su quelli misurati nello stesso periodo di anni precedenti; in sostanza manca la valutazione dell'effetto della meteorologia che in periodi diversi può essere favorevole o sfavorevole alla dispersione degli inquinanti determinando quindi una sottostima o una sovrastima degli effetti del *lockdown*. L'obiettivo 1 del progetto Pulviris, che ha visto la collaborazione di numerosi ricercatori degli enti coinvolti, ha proposto l'applicazione di tecniche statistiche di normalizzazione meteorologica sulle serie di dati rilevati dalle stazioni delle reti di monitoraggio nazionale, finalizzata a "isolare" o "controllare" il ruolo della variabilità meteorologica sugli andamenti degli inquinanti nei periodi ex-ante Covid-19 ed ex-post¹.

Per la valutazione dell'effetto del *lockdown* sulla variazione della concentrazione degli inquinanti, sono stati utilizzati modelli statistici e algoritmi di intelligenza artificiale.

A partire da un'ampia revisione della letteratura scientifica, sono stati selezionati tre diversi approcci.

Il primo è basato sull'uso di modelli statistici additivi generalizzati (*Generalized additive models*, Gams). Questi consentono di normalizzare, a livello meteorologico, le serie storiche pluriennali delle concentrazioni degli inquinanti in atmosfera e di valutare il contributo nel tempo di specifiche variabili esplicative di tipo numerico o categoriale.

Il metodo utilizzato si è dimostrato molto efficace nel rilevare l'effetto del *lockdown* al netto del contributo della meteorologia. Permette anche di associare alle stime la relativa significatività statistica.

È stato possibile osservare e stimare quantitativamente a livello di singola stazione una significativa diminuzione dei livelli di NO_2 su tutto il territorio italiano come effetto del *lockdown* nei

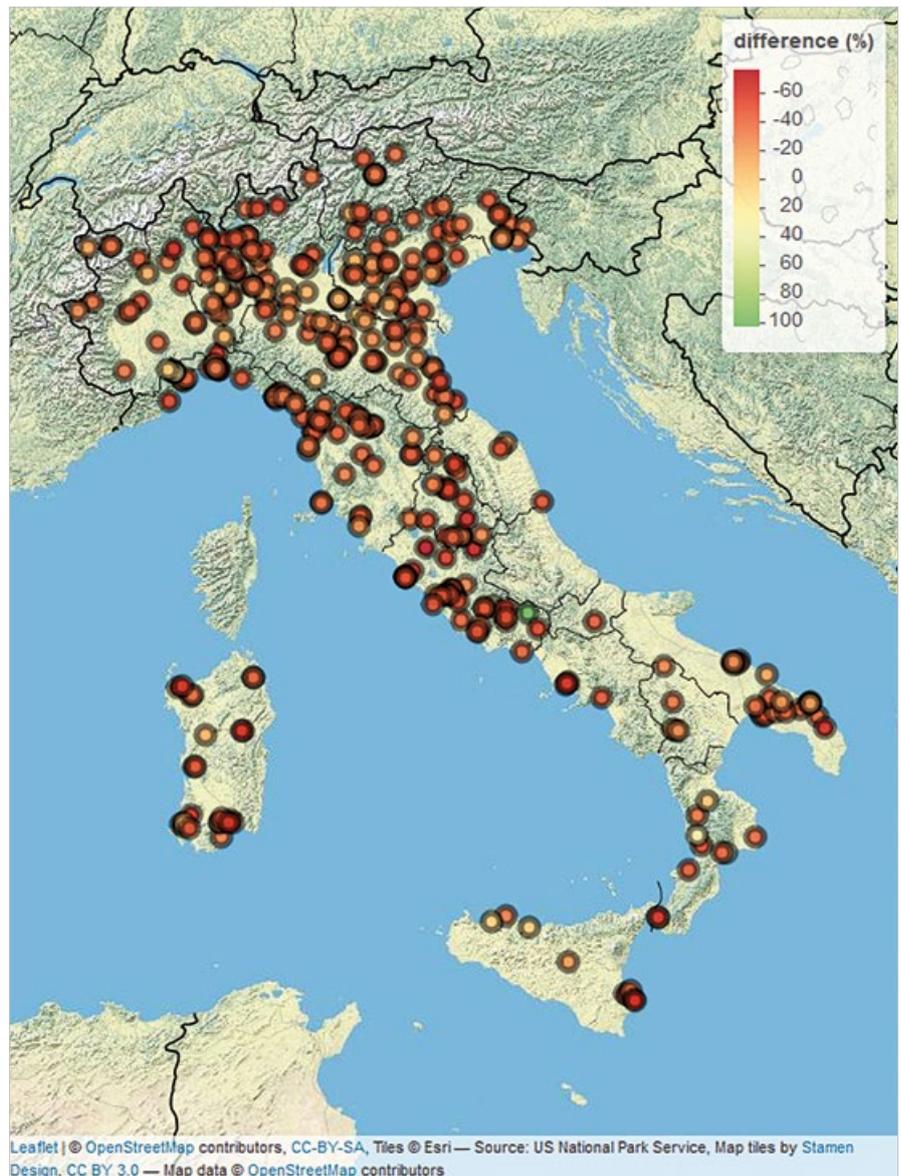


FIG. 1 MAPPA BISSIDO DI AZOTO

Differenze percentuali tra concentrazione media stimata dal modello *random forest* (condizioni *Bau*) e concentrazione media osservata (1 marzo - 30 aprile 2020).

mesi di marzo e aprile 2020. Per il PM_{10} e il $PM_{2,5}$, i risultati evidenziano solo per un limitato set di punti di misura una riduzione significativa delle concentrazioni, in un quadro generale di non significatività statistica dei contributi del *lockdown* alle concentrazioni dei quattro mesi considerati. Limitatamente al solo mese di aprile 2020 è stato rilevato un aumento delle concentrazioni di ozono attribuibile al *lockdown*, localizzato prevalentemente nell'area settentrionale del Paese [1]. I risultati sono visualizzabili nella *dashboard* interattiva alla pagina www.pulviris.it/dashboard.

Il secondo approccio è stato basato sull'uso di algoritmi di intelligenza artificiale che, negli studi di *intervention analysis*, è ben descritto in letteratura. Abbiamo colto l'occasione

per sperimentare l'uso di modelli di *machine learning* (ML), e in particolare della tecnica *random forest* (Rf). Per quantificare, al netto della variabilità indotta dalle condizioni meteorologiche, la variazione della concentrazione dei principali inquinanti determinata dai provvedimenti adottati per ridurre la diffusione del contagio, abbiamo confrontato i valori stimati da modelli Rf in condizioni *business-as-usual* (*Bau*), ovvero i livelli che sarebbero stati osservati nel 2020 in assenza del *lockdown*, nelle condizioni meteorologiche reali, in ogni stazione di misurazione, con i livelli di concentrazioni effettivamente osservati (figura 1).

Il metodo utilizzato è molto efficace nel rilevare l'effetto del *lockdown* al netto del contributo della meteorologia. Permette anche di associare alle stime la relativa

significatività statistica ed è relativamente facile da implementare. Sconta tuttavia una generale tendenza a sovrastimare il dato per valori di concentrazione bassi e di sottostimare per valori alti. I risultati ottenuti con questo metodo sono in generale coerenti con quelli ottenuti con i modelli additivi generalizzati. L'NO₂ presenta una significativa diminuzione delle concentrazioni su tutto il territorio italiano, non solo durante il periodo del *lockdown* primaverile, ma anche in tutti i mesi da marzo in poi, a indicare un effetto anche delle misure di contenimento successive (riguardanti principalmente gli spostamenti). Una diminuzione di entità inferiore è mostrata da C₆H₆ e CO, seppure in maniera disomogenea tra le diverse tipologie di stazioni. Anche il particolato (PM₁₀ e PM_{2,5}) ha mostrato una diminuzione più contenuta e solo in alcuni mesi. È interessante però notare come anche per questi inquinanti cali di diversa entità si siano osservati anche in molti mesi successivi al *lockdown* primaverile [2].

Indipendentemente dalla strategia modellistica scelta le serie di dati possono essere analizzate separatamente o congiuntamente. Questa seconda soluzione permette una stima dei parametri più efficace e una maggiore performance predittiva, considerato il largo volume di dati disponibile. Inoltre, rileva il fatto che poiché i punti di misura sono distribuiti nello spazio risulta conveniente tenere conto non solo della correlazione temporale ma anche della correlazione spaziale al fine di spiegare fino in fondo la variabilità dei residui. È stato quindi sviluppato, a partire dall'approccio introdotto recentemente dagli stessi autori [3], per la valutazione della variabilità spaziale e temporale delle concentrazioni di PM₁₀ in Italia, un *framework* metodologico per stimare in modo continuo nello spazio e nel tempo l'effetto del *lockdown* sulla qualità dell'aria. L'obiettivo di ricerca è fondato sull'ipotesi che la disponibilità di mappe 2D di concentrazione ad alta risoluzione spaziale possa aiutare a valutare se l'effetto del *lockdown* sia stato omogeneo in una data area (ovvero a comprendere quale sia stato il grado di disomogeneità). L'esercizio è stato condotto sull'inquinante biossido di azoto in quanto è stato chiaramente tra gli inquinanti per i quali le misure introdotte hanno determinato una significativa riduzione delle emissioni e per il

quale quindi è attesa una significativa variazione attribuibile al *lockdown*. In particolare, includendo una componente spaziale stocastica il modello sviluppato permette di tenere conto della correlazione spaziale tra le osservazioni; le superfici di predizione così generate appaiono continue spazialmente e permettono di valutare l'effetto del *lockdown*, tenendo conto della meteorologia e di altri fattori confondenti, anche nelle aree remote o montuose dove non sono disponibili dati puntuali per la mancanza di stazioni di monitoraggio. L'approccio modellistico usato può essere generalizzato allo studio di casi diversi da quello oggetto del progetto Pulviris, ovvero qualora si sia interessati a valutare gli effetti su larga scala di misure di risanamento della qualità dell'aria. Abbiamo dimostrato la possibilità di ottenere con il metodo proposto un quadro credibile e matematicamente quantificabile dell'evoluzione delle concentrazioni di NO₂ in Italia al

netto del fattore confondente della meteorologia [4]. La variabilità spazio-temporale delle concentrazioni di NO₂ nei mesi di marzo e aprile 2020 rispetto agli stessi mesi del 2019 è illustrata mediante mappe spazialmente continue e normalizzate meteorologicamente su intervalli settimanali divise per giorni feriali e festivi, consultabili attraverso una *dashboard* interattiva sul sito del progetto (<http://pulviris.inla.isprambiente.it>).

A cura del gruppo di lavoro per la realizzazione dell'obiettivo 1 del progetto Pulviris

NOTE

¹ Per approfondire sono consultabili sul sito le relazioni dettagliate relative alle varie fasi del lavoro svolto: www.pulviris.it/index.php/documentazione-obiettivo-1/

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Leone G., Morelli R., Cattani G., Cusano M., Gaeta A., Galosi A., Gandolfo G., Scotto F., 2022, "Valutazione tramite un modello GAM dell'effetto del lockdown sui livelli di alcuni inquinanti rilevati nelle stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria in Italia", in *Atti del X Convegno sul particolato atmosferico*, Bologna, 18-20 maggio 2022.
- [2] Reatini M.A., Scotto F., D'Elia I., D'Isidoro M., Algieri A., 2022, "Progetto Pulviris: Applicazione del machine learning per la normalizzazione meteorologica su scala nazionale nel 2020", in *Atti del X Convegno sul particolato atmosferico*, Bologna, 18-20 maggio 2022. <https://pm2022.iasaerosol.it/wp-content/uploads/2022/07/LIBRO-DEI-PROCEEDINGS-PM2022-VD.pdf>
- [3] Fioravanti G., Martino S., Cameletti M., Cattani G., 2021, "Spatio-temporal modelling of PM₁₀ daily concentrations in Italy using the Spde approach", *Atmospheric environment*, 248, 118192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118192>
- [4] Fioravanti G., Cameletti M., Martino S., Cattani G., Pisoni E., 2022, "A spatiotemporal analysis of NO₂ concentrations during the Italian 2020 Covid-19 lockdown", *Environmetrics*, 2022 Jun;33(4):e2723. doi: 10.1002/env.2723. Epub 2022 Mar 12. PMID: 35574514; PMCID: PMC9087439.

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 1 PULVIRIS

Referenti Gdl obiettivo 1 Pulviris: Giorgio Cattani (coordinamento), Federica Aldighieri, Guido Fioravanti, Gianluca Leone, Raffaele Morelli, Maria Antonietta Reatini (Ispra)

Componenti del Gdl:

- Andrea Algieri, Umberto Dal Santo, Guido Lanzani, Anna Di Leo (Arpa Lombardia)
- Fabiana Scotto, Arianna Trentini (Arpa Emilia Romagna)
- Andrea Bolignano, Silvia Barberini (Arpa Lazio)
- Ilaria D'Elia, Massimo D'Isidoro, Maria Gabriella Villani (Enea)
- Mariacarmela Cusano, Alessandro Di Menno di Bucchianico, Maria Francesca Fornasier, Piero Frascchetti, Alessandra Gaeta, Raffaela Gaddi, Alessandra Galosi, Giuseppe Gandolfo, Francesca Lena, Walter Perconti, Emanuela Piervitali (Ispra)
- Maria Eleonora Soggiu (Iss)

Hanno contribuito:

- Sara Martino (Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway)
- Andrea Pisoni (European Commission, Joint Research Centre, Ispra, Italy)

LOCKDOWN E VARIAZIONI DELLE EMISSIONI INQUINANTI

L'EFFETTO SULLA VARIAZIONE DELLE EMISSIONI DEI PRIMI PROVVEDIMENTI RESTRITTIVI CAUSATI DALLA PANDEMIA È STATO VALUTATO PER LA PRIMA VOLTA A LIVELLO NAZIONALE DAL PROGETTO PULVIRUS. SONO STATE ELABORATE ANALISI DETTAGLIATE DELLE VARIAZIONI PER REGIONE, MESE E SETTORI COINVOLTI.

All'inizio del 2020, il mondo si è trovato ad affrontare una emergenza sanitaria legata alla diffusione del virus Sars-cov-2. Le misure intraprese dai governi dei diversi Paesi per ostacolare la diffusione del virus hanno profondamente inciso sulla vita degli individui e delle diverse comunità, stravolgendone abitudini e stili di vita. Nel progetto Pulvurus si è iniziato a discutere degli effetti di tali misure sulla variazione delle emissioni e concentrazioni dei gas serra e degli inquinanti atmosferici (polveri sottili PM_{10} e $PM_{2,5}$), ossidi di azoto (NO_x), ossidi di zolfo (SO_x), composti

organici volatili non metanici (Covnm), ammoniaca (NH_3), monossido di carbonio (CO).

Una delle finalità di Pulvurus è stata di investigare l'effetto di riduzione delle emissioni legato al primo stringente periodo di *lockdown*, attuato tra febbraio e maggio 2020 in tutte le regioni italiane. Nei mesi che hanno preceduto e seguito l'avvio del progetto, molte Regioni hanno condotto proprie simulazioni modellistiche per valutare l'effetto delle misure del *lockdown* sulla qualità dell'aria. Le Regioni del progetto Prepair e la Regione Lazio, per esempio, hanno

sviluppato una propria metodologia di stima delle variazioni emissive registrate nei primi mesi dell'anno 2020.

In particolare, Arpa Lombardia ha sviluppato una prima versione di un catalogo di indicatori (ad esempio variazione mobilità, riduzione voli aerei, variazione presenza domestica ecc.) utile all'implementazione della metodologia di calcolo delle emissioni giornaliere e messa in condivisione sia nel progetto Prepair sia in Pulvurus (Marongiu et al., 2022). Parallelamente, all'interno del progetto Pulvurus sono state condotte a livello nazionale ulteriori ricerche per condividere non solo la metodologia ma

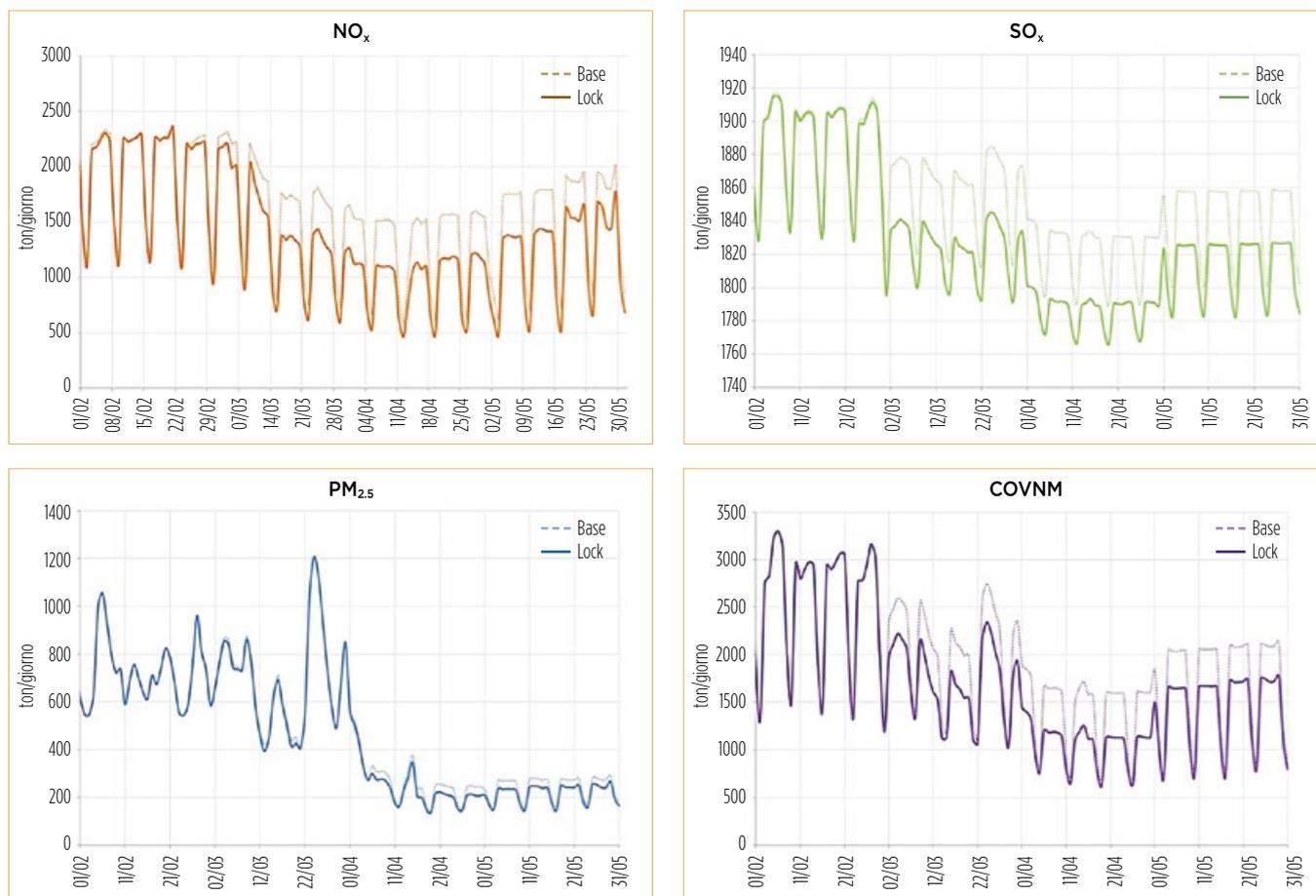


FIG. 1A VARIAZIONI INQUINANTI
Variazione emissioni nazionali giornaliere per inquinante (NO_x , SO_x , $PM_{2,5}$, Covnm) dal 1 febbraio al 31 maggio 2020, in tonnellate.

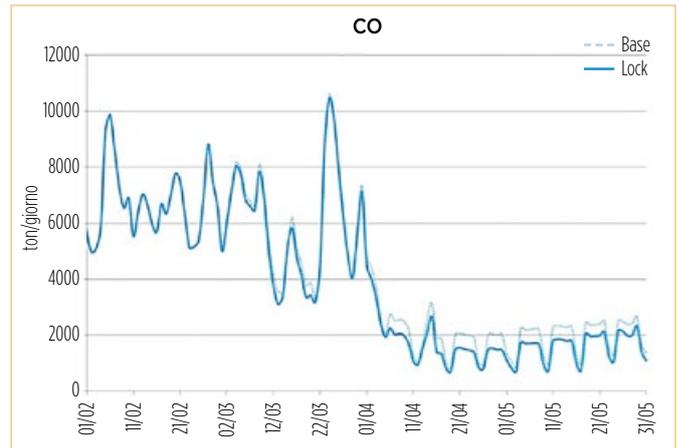
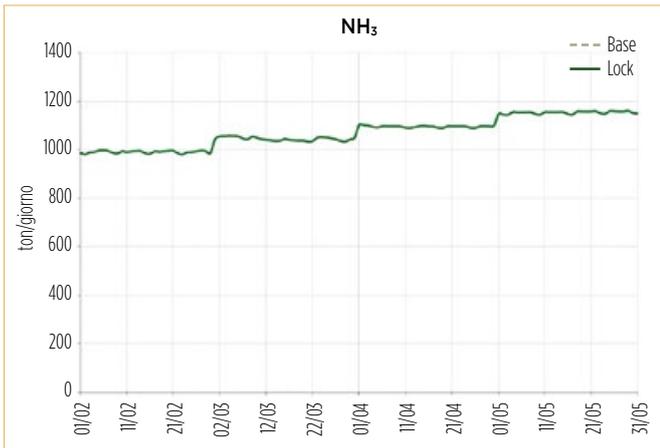


FIG. 1B VARIAZIONI INQUINANTI

Variazione emissioni nazionali giornaliere per inquinante (NH₃, CO) dal 1 febbraio al 31 maggio 2020, in tonnellate.

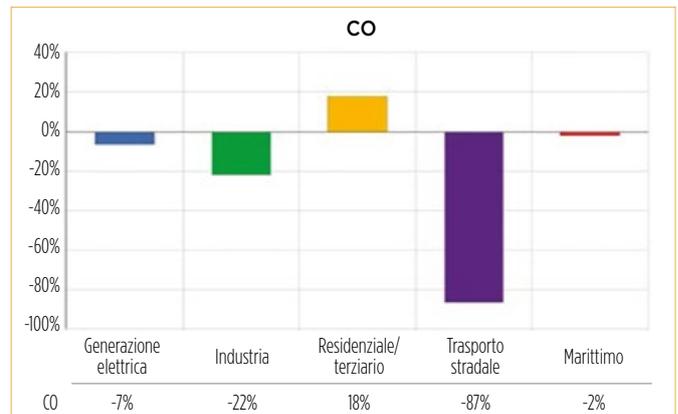
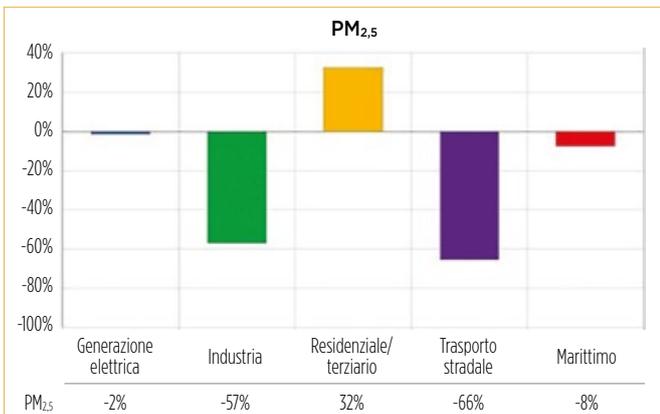
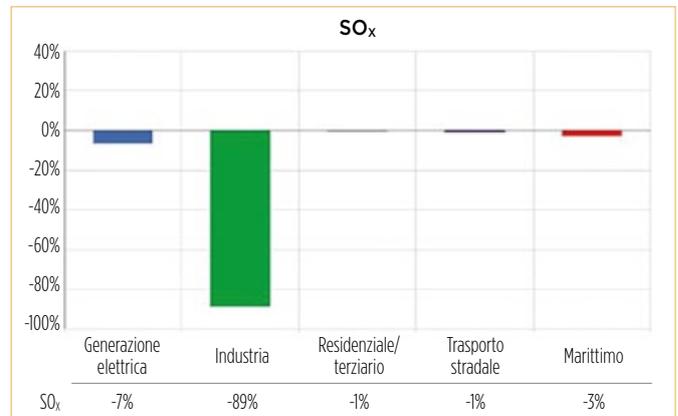
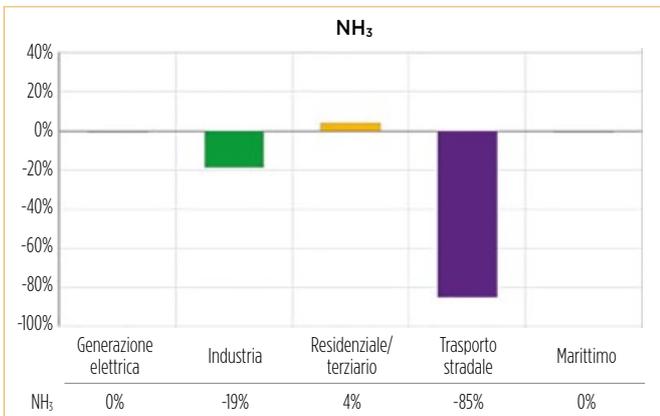
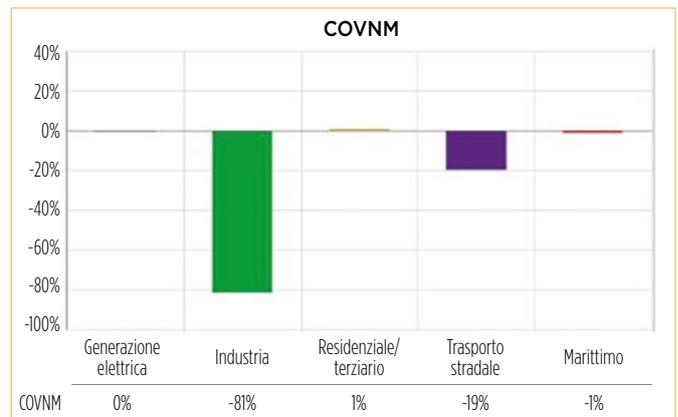
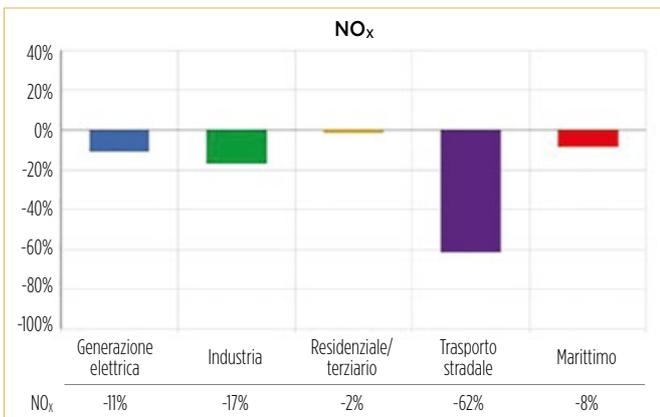


FIG. 2 RIDUZIONE EMISSIONI

Contributo di ogni settore alla riduzione delle emissioni totali per inquinante.

anche le fonti che fornissero informazioni su tutto il territorio nazionale. L'ipotesi formulata nella metodologia sia regionale sia nazionale è che la variazione emissiva sia stimata attraverso alcune variabili proxy relative al settore emissivo. Tale metodologia è stata utilizzata anche a livello europeo dai modelli partecipanti alle attività del Servizio previsionale di qualità dell'aria di Copernicus (Cams) (Guevara et al., 2021).

Il progetto Pulviris ha elaborato un database, liberamente scaricabile (www.pulviris.it/index.php/documentazione-obiettivo-2), con i fattori di riduzione giornalieri/settimanali o mensili per il periodo temporale dal 15 febbraio al 31 maggio 2020 per i settori maggiormente coinvolti dalle misure di *lockdown* (ossia generazione elettrica, industria, riscaldamento, trasporto stradale, trasporto marittimo e aereo) per ciascuna regione italiana. La figura 1 (a e b) mostra la variazione a livello nazionale delle emissioni dei singoli inquinanti stimate durante il primo *lockdown* ("Lock" nel grafico) confrontate con uno scenario base ("Base" nel grafico), che rappresenta una stima delle emissioni che ci sarebbero state se non fosse intervenuta la pandemia. I grafici mostrano variazioni consistenti dalla metà di marzo alla fine di aprile, mentre nel mese di maggio, con l'alleggerimento delle misure, si osserva una leggera risalita delle emissioni per quasi tutti gli inquinanti.

Nella figura 2 viene mostrato il contributo alla variazione delle emissioni degli inquinanti atmosferici dei settori coinvolti dalle misure di *lockdown*. Il settore che ha maggiormente trainato la riduzione è il trasporto stradale, con un contributo alla riduzione degli NO_x totali di circa il 60%, del PM_{2,5} di circa il 66% e di circa l'87% per il CO totale. Il settore industriale ha maggiormente inciso sulla riduzione delle emissioni di SO_x (circa 90%) e Covnm (circa 80%). Il

settore residenziale/terziario ha registrato un incremento delle emissioni di PM_{2,5}, legato alla maggiore presenza delle persone nelle abitazioni e quindi a un maggior utilizzo della biomassa (legna e pellet) per il riscaldamento, che vista la stagionalità dell'inquinante risulta più marcato nei mesi di marzo e aprile dove il riscaldamento era ancora acceso. Il settore marittimo ha poi contribuito a una riduzione delle emissioni di NO_x di circa l'8% e di SO₂ di circa il 3%.

Il grafico in figura 3 mostra il contributo delle regioni alla riduzione delle emissioni totali per inquinante, dove, per

facilità di lettura, sono state esplicitate le regioni con un contributo maggiore o uguale al 5% di riduzione su almeno un inquinante, mentre le restanti regioni sono state inserite nella voce "Altre regioni". La Lombardia rappresenta il territorio che offre il maggior contributo alla riduzione di tutti gli inquinanti che, in funzione dell'inquinante, oscilla tra il 15% e il 21%, seguita dall'Emilia-Romagna, entrambe regioni in cui il *lockdown* è partito prima rispetto alle restanti regioni italiane.

Il progetto Pulviris consente, inoltre, una più dettagliata analisi per regione

FIG. 3
CONTRIBUTO DELLE REGIONI

Riduzione delle emissioni per inquinante.

- Altre regioni
- Veneto
- Toscana
- Sicilia
- Sardegna
- Puglia
- Piemonte
- Lombardia
- Lazio
- Emilia-Romagna
- Campania

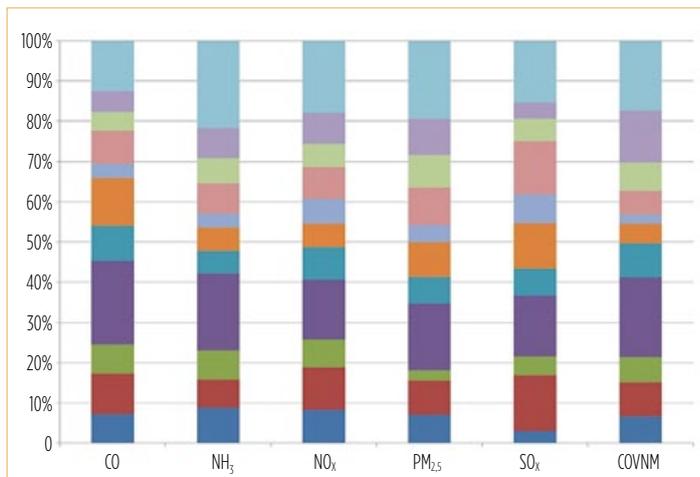


FIG. 4
VARIAZIONI MENSILI

Variazione mensile delle emissioni di NO_x e PM_{2,5} per tutte le regioni italiane.

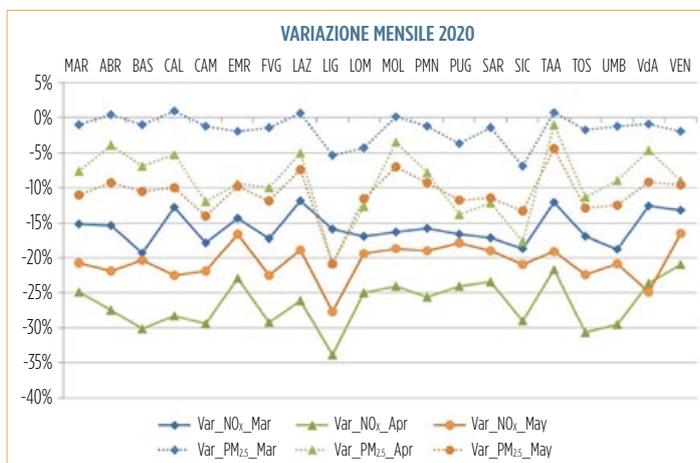


FIG. 5
EMISSIONI NO_x

Variazioni percentuali simulate di emissioni di NO_x.



(figura 4). Ad esempio, concentrandosi sulle emissioni di NO_x e $\text{PM}_{2,5}$, si osserva una maggiore variazione emissiva nel mese di aprile per gli NO_x , con variazioni che oscillano dal 21% al 35% e nel mese di maggio per il $\text{PM}_{2,5}$ con variazioni dal 5% al 20%. Il diverso comportamento del particolato è attribuibile, come evidenziato in precedenza, all'incremento delle emissioni nel settore residenziale più marcato nei mesi di marzo e aprile dove il riscaldamento era ancora attivo nelle regioni italiane.

Per quanto riguarda la variazione spaziale delle emissioni, considerando a titolo di esempio gli NO_x (figura 5), si notano ancora una volta maggiori riduzioni delle emissioni nel mese di aprile che in alcune aree urbane raggiungono il 60%. Maggiori informazioni sono disponibili in D'Isidoro et al. (2022) e sul sito del progetto (www.pulviris.it/index.php/documentazione-obiettivo-2) da cui è possibile scaricare tutti i rapporti tecnici prodotti nel corso del progetto che si è appena concluso.

A cura dell'obiettivo 2 del progetto Pulviris

Referenti: Ilaria D'Elia e Antonio Piersanti, ricercatori del Laboratorio di inquinamento atmosferico dell'Enea

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 2 PULVIRIS

Le attività dell'obiettivo 2 hanno coinvolto 38 ricercatori di

- Enea: Ilaria D'Elia, Antonio Piersanti, Gino Briganti, Massimo D'Isidoro, Lina Vitali, Mario Adani, Andrea Cappelletti, Luisella Ciancarella, Felicità Russo, Giovanni Vialetto, Mihaela Mircea, Maria Gabriella Villani
- Ispra: Daniela Romano, Riccardo De Lauretis, Ernesto Taurino, Andrea Gagna, Antonella Bernetti, Emanuele Peschi, Antonio Caputo, Monica Pantaleoni, Marina Colaiezzi
- Arpa Emilia Romagna: Michele Stortini, Roberta Amorati, Giulia Giovannini, Giorgio Veratti (UniMoRe)
- Arpa Lombardia: Alessandro Marongiu, Giuseppe Fossati, Pierfrancesco Bonamassa, Marco Moretti, Elisabetta Angelino, Edoardo Peroni, Guido Lanzani
- Arpa Veneto: Silvia Pillon, Laura Susanetti
- Arpa Lazio: Laura Bennati, Silvia Barberini, Andrea Bolignano
- Iss: Maria Eleonora Soggiu

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- D'Isidoro M., D'Elia I., Vitali L., Briganti G., Cappelletti A., Piersanti A., Finardi S., Calori G., Pepe N., Di Giosa A., Bolignano A., Zanini G., 2022, "Lessons learnt for air pollution mitigation policies from the Covid-19 pandemic: The Italian perspective", *Atmospheric Pollution Research*, 13, 2022, 101620, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101620>.
- Guevara M., Jorba O., Soret A., Petetin H., Bowdalo D., Serradell K., Tena C., Denier van der Gon H., Kuenen J., Peuch V.-H., Pérez Garcia-Pando C., 2021, "Time-resolved emission reductions for atmospheric chemistry modelling in Europe during the Covid-19 lockdowns", *Atmos. Chem. Phys.*, 21, 773-797, <https://doi.org/10.5194/acp-21-773-2021>.
- Marongiu A., Angelino E., Malvestiti G. et al., 2022, "Emission estimates and air quality simulation on Lombardy during lockdown", *Air Qual Atmos Health*, <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01265-1>.



L'ANALISI DELLE SIMULAZIONI CON MODELLI DI CALCOLO

I MODELLI DI CALCOLO SONO STATI GLI STRUMENTI UTILIZZATI PER VALUTARE GLI EFFETTI DEL LOCKDOWN SULLA QUALITÀ DELL'ARIA. ATTRAVERSO L'ELABORAZIONE DELLE CATENE MODELLISTICHE SONO STATI MESSI A CONFRONTO GLI EFFETTI DI DUE SCENARI A PARITÀ DI CONDIZIONI METEO: UNO CON LE MISURE ANTI-COVID E L'ALTRO IN ASSENZA DI TALI MISURE.

La pandemia da Covid-19, nella sua tragicità, ha offerto un'opportunità pressoché unica di simultaneo abbattimento delle emissioni da diversi settori a elevato impatto: la fatalità ha messo forse in piedi il più grande esperimento di diffusione atmosferica su scala globale della storia. I ricercatori di tutto il mondo hanno potuto così mettere alla prova i loro strumenti e studiare in maniera approfondita le relazioni tra emissioni e concentrazioni. Il progetto ha fornito la prima valutazione dell'impatto sulla qualità dell'aria delle misure restrittive, relative al periodo febbraio-maggio 2020, attraverso l'uso dei modelli nazionali Minni, di Enea, e kAiros, sviluppato e mantenuto dalla struttura IdroMeteoClima di Arpa Emilia-Romagna, sulla base di una convenzione con Ispra, alle risoluzioni spaziali orizzontali rispettivamente di circa 4 e 7 km.

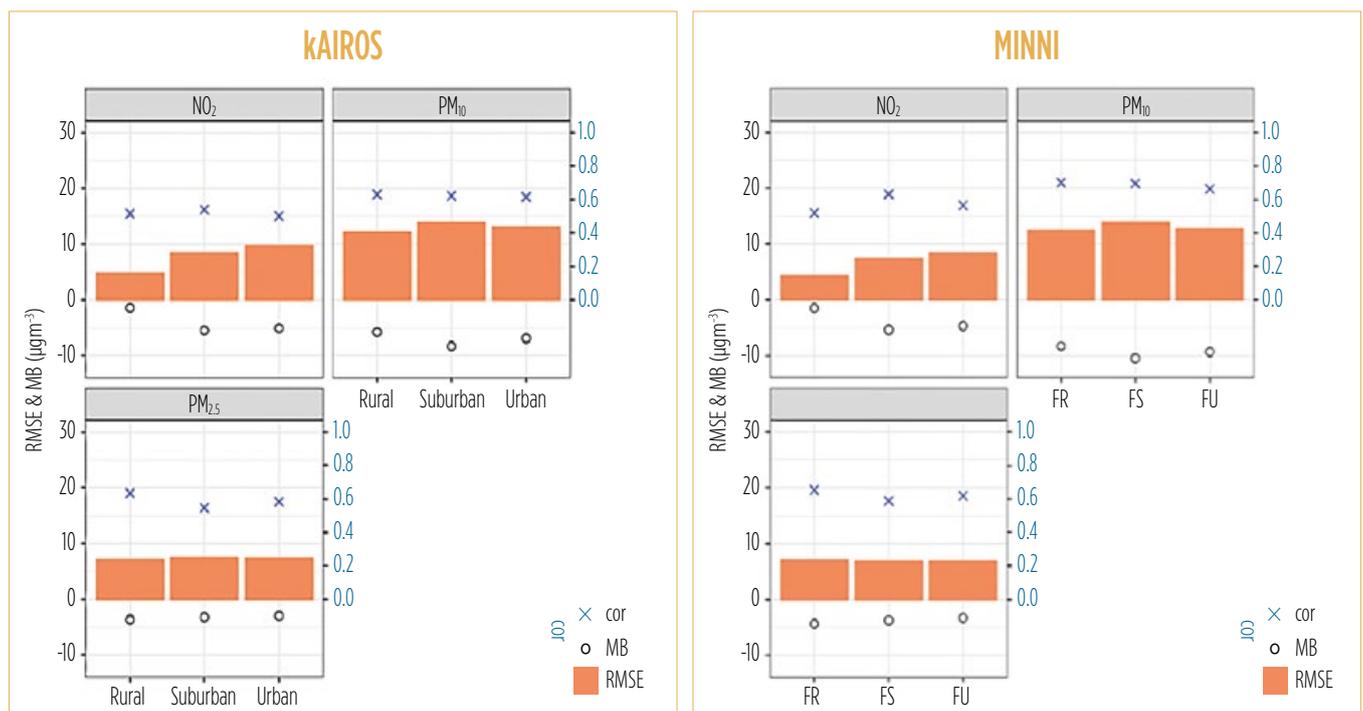


FIG. 1 INDICI DI PRESTAZIONE
Indici di prestazione calcolati su base mensile e mediati sul periodo simulato per i modelli kAiros (a sinistra) e Minni (a destra).

Entrambe le catene modellistiche hanno elaborato due scenari a parità di input meteorologico: lo scenario *lockdown*, costruito ipotizzando l'effetto sulle emissioni delle misure restrittive adottate in Italia per contenere la diffusione del virus Covid-19 durante la prima ondata della pandemia (febbraio-maggio 2020) e lo scenario base, in assenza di tali misure.

I due sistemi modellistici condividono lo stesso database emissivo provinciale per i casi base e *lockdown*.

I campi meteorologici di analisi per l'anno 2020 sono stati prodotti con il modello meteorologico ad area limitata Cosmo-Med (kAiros) e Wrf (Minni). I codici meteo-diffusivi, applicati off-line, sono Chimere 2017 (kAiros) e Farm 5.1 (Minni). Le condizioni al contorno per kAiros sono state fornite da Ineris, mentre Minni ha impiegato i campi europei Cams, autoprodotti nell'ambito dell'esercizio modellistico Cams71/Covid.

Modelli e variazioni emissive temporanee

I modelli di qualità dell'aria sono in grado di riprodurre l'effetto di significative variazioni emissive circoscritte a un periodo temporale limitato?

Per poter rispondere a tale interrogativo, si è condotta la validazione dei modelli confrontando gli output della simulazione *lockdown* con le osservazioni valide della rete di monitoraggio nazionale. Considerate le risoluzioni dei modelli, non adatte a intercettare variazioni a scale spaziali locali, sono state scelte solo le stazioni di fondo di tipo rurale (Fr), urbano (Fu) e suburbano (Fs). Sono stati selezionati i seguenti indici statistici di prestazione: Rmse (*Root mean square error*), cor (*indice di correlazione*) e Mb (*mean bias*). La sintesi dei risultati è riportata in *figura 1*.

Una prima visione di insieme esalta l'omogeneità nelle prestazioni dei due modelli e la coerenza nei valori degli *score*, per ogni inquinante e tipo di stazione. kAiros mostra *bias* più contenuti per il PM, mentre Minni presenta correlazioni lievemente più alte. In generale, gli Rmse più elevati si riscontrano sul PM₁₀, a testimonianza della difficoltà nel trattare questo inquinante, legata a componenti primarie poco controllabili.

Possiamo quindi sicuramente affermare che la modellistica permette di prevedere, con adeguata affidabilità, gli effetti delle emissioni sulle concentrazioni di inquinanti.

Diversi inquinanti, diversi comportamenti

Come sono variate le concentrazioni degli inquinanti? Si sono evidenziati differenti comportamenti tra gli inquinanti?

Gli effetti del calo generalizzato delle emissioni sulle concentrazioni di inquinanti e sulle polveri sottili secondarie seguono dinamiche particolarmente complesse. Si è osservato un calo evidente di NO₂, a fronte di un calo relativamente modesto di polveri sottili. In *figura 2* sono riportate le differenze di

FIG. 2
NO₂

Differenze medie assolute (in alto, in unità µg/m³) e percentuali (in basso) tra simulazione lockdown e base, relative al periodo febbraio-maggio 2020. A sinistra kAiros, a destra Minni.

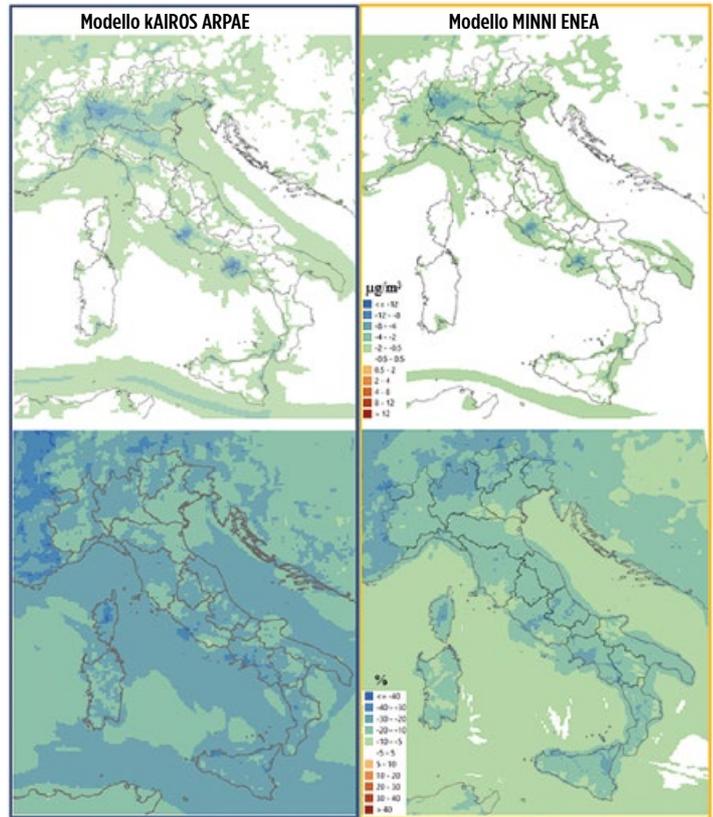
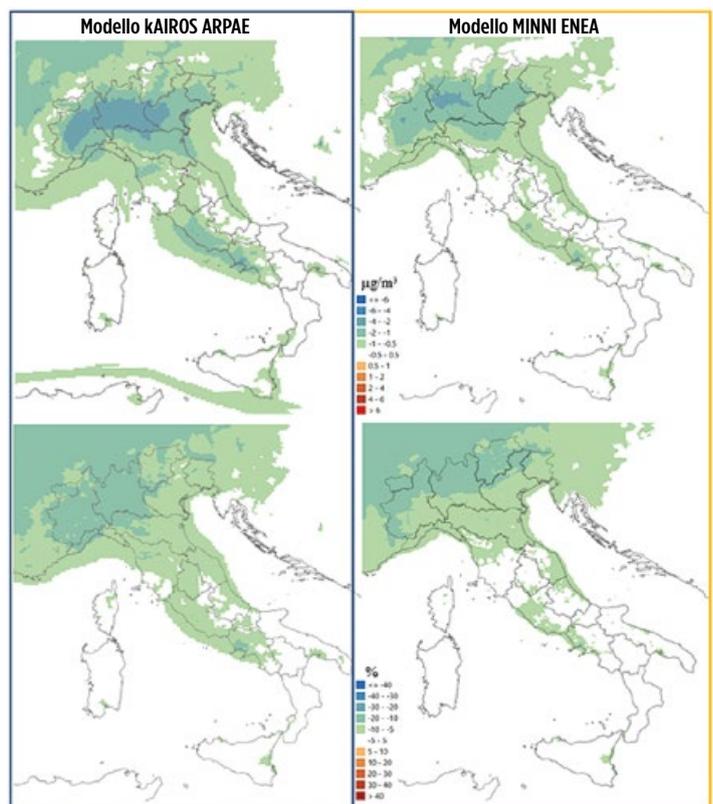


FIG. 3
PM₁₀

Differenze medie assolute (in alto, in unità µg/m³) e percentuali (in basso) tra simulazione lockdown e base, relative al periodo febbraio-maggio 2020. A sinistra kAiros, a destra Minni.



concentrazione medie di NO₂ al livello del suolo, calcolate sul periodo febbraio-maggio 2020, in termini assoluti (in alto) e percentuali (in basso). A sinistra si osservano gli output di Arpae, a destra quelli di Enea. Come già osservato nella procedura di validazione, i due modelli presentano un pattern simile sul territorio nazionale. Le omologhe mappe relative al PM₁₀ e PM_{2,5} (figure 3 e 4), avvalorano la coerenza tra i due sistemi.

Lezioni per la pianificazione

Ai fini della pianificazione della qualità dell'aria, quale lezione possiamo trarre da questo studio modellistico? Differenti simulazioni, se alimentate con input coerenti, danno a loro volta prestazioni coerenti, indipendentemente dalle diverse caratteristiche dei modelli impiegati. Noto che notevole attenzione deve però essere prestata alla selezione di misure per contenere l'inquinamento atmosferico: interventi mirati su un unico settore non necessariamente portano alle riduzioni di concentrazione auspicate, soprattutto per quanto concerne le polveri sottili. Si è visto infatti che, a fronte di un sensibile calo del flusso veicolare e delle emissioni di NO_x, che ha comportato una notevole riduzione delle concentrazioni di NO₂, non si è osservato un analogo comportamento per quanto concerne il PM, che ha una importante componente secondaria. Nel sud Italia, le variazioni di PM sono state molto contenute e ciò anche a causa di una compensazione tra la diminuzione della componente primaria delle attività industriali e del traffico, da una parte, e l'aumento delle emissioni residenziali dall'altra, essendo gran parte di tali aree non metanizzate. In pianura Padana il PM è diminuito, ma non nella misura in cui forse l'osservatore medio si sarebbe atteso: è stata abbattuta solo la componente primaria del PM₁₀, che è intorno al 30-40% (al massimo) del totale, ma non la secondaria, non essendo state limitate le attività del settore agricolo, le cui emissioni di ammoniacca

contribuiscono pesantemente alla formazione del PM. Risulta, quindi, indispensabile l'adozione di un approccio integrato che consideri gli impatti dovuti alle emissioni in atmosfera nella loro totalità, piuttosto che singolarmente.

I risultati descritti sono stati recentemente pubblicati sulla rivista *Atmospheric Pollution Research* (D'Isidoro et al., 2022) e presentati al convegno nazionale sul particolato atmosferico PM2022 (Stortini et al., 2022). Maggiori

informazioni sono, inoltre, disponibili sul sito del progetto (www.pulviris.it/index.php/documentazione-obiettivo-2)

A cura dell'obiettivo 2 del progetto Pulviris (v. il gruppo di lavoro a p. 63)

Referenti:

Gino Briganti e Lina Vitali, ricercatori Enea del laboratorio di inquinamento atmosferico, per il modello Minni

Michele Stortini (Arpae Emilia-Romagna) e Giorgio Veratti (Arpae e UniMoRe), per il modello kAiros.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

D'Isidoro et al., 2022, "Lessons learnt for air pollution mitigation policies from the Covid-19 pandemic: The Italian perspective", *Atmospheric Pollution Research*, 13, 2022, 101620, <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101620>

Stortini, M. et al., 2022, "Gli effetti del lockdown 2020 sulla qualità dell'aria in Italia", Atti del convegno PM2022, <https://pm2022.iasaerosol.it/wp-content/uploads/2022/07/LIBRO-DEI-PROCEEDINGS-PM2022-VD.pdf>

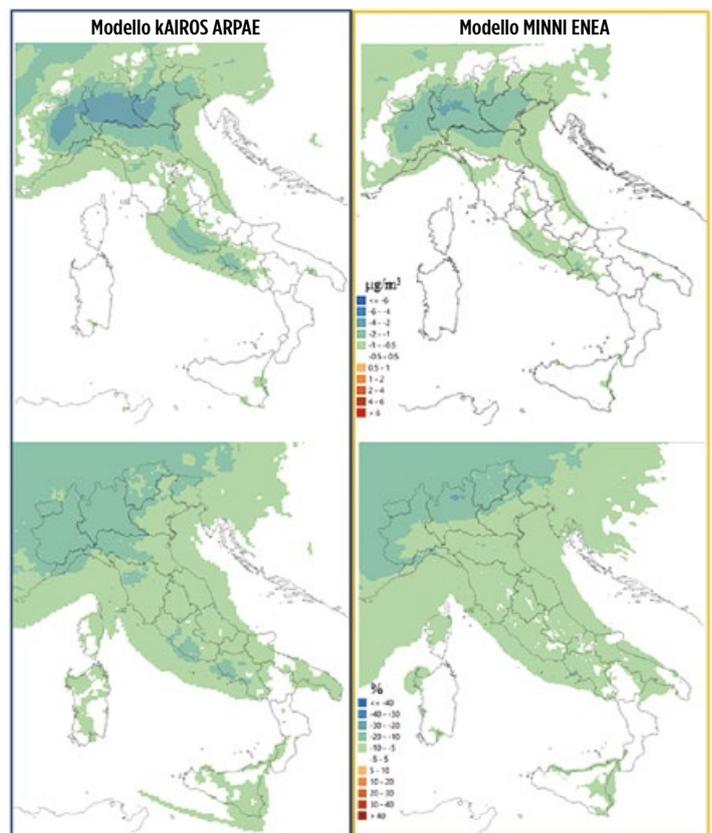


FIG. 4
PM_{2,5}
Differenze medie assolute (in alto, in unità $\mu\text{g}/\text{m}^3$) e percentuali (in basso) tra simulazione lockdown e base, relative al periodo febbraio-maggio 2020. A sinistra kAiros, a destra Minni.



COVID-19 E COMPOSIZIONE DEGLI INQUINANTI NELL'ARIA

GLI EFFETTI SULLE COMPONENTI DEL PARTICOLATO ATMOSFERICO DERIVANTI DALLE MODIFICHE AVVENUTE SULLE EMISSIONI A SEGUITO DEI PROVVEDIMENTI PRESI PER LIMITARE LA DIFFUSIONE DELLA PANDEMIA. L'ANALISI È STATA FATTA CONFRONTANDO IL 2020 CON GLI ANNI PRECEDENTI E SI È SVOLTA AL NETTO DELLE CONDIZIONI METEOROLOGICHE.

Le condizioni senza precedenti che si sono venute a creare a partire da marzo 2020 in conseguenza alla pandemia prodotta da Covid-19, hanno modificato in modo sostanziale le emissioni degli inquinanti dell'aria, influenzando di conseguenza le loro concentrazioni in atmosfera. In alcuni casi, come per gli ossidi di azoto, la variazione ha prodotto un calo che è stato facilmente osservabile [1; 2], ma per inquinanti complessi, come il particolato atmosferico, l'effetto sulle concentrazioni non è immediatamente interpretabile in quanto è costituito da componenti con origini diversificate, anche distanti nel tempo e nello spazio, che hanno avuto variazioni differenti [3]. L'analisi della composizione chimica del particolato, nei siti nei quali era disponibile (figura 1), ha permesso di portare in evidenza effetti che, altrimenti, nell'insieme totale della sua massa, sarebbero stati mascherati, integrati dalle misure di altri parametri non previsti dalla norma vigente come ammoniaca o *black carbon*. Tutte le informazioni dettagliate sui siti disponibili, le analisi eseguite, i parametri studiati e i risultati ottenuti sono riportati nei report conclusivi dell'obiettivo 3 di Pulviris [4].

Nella parte primaria del particolato, cioè quella emessa tal quale dalle sorgenti, si osserva come la frazione legata al trasporto veicolare sia calata in modo evidente nel periodo del primo *lockdown*, con un effetto che si è protratto anche per buona parte del resto del 2020. Questo è confermato sia dall'osservazione diretta di traccianti della componente *exhaust*, cioè della combustione, come il carbonio elementare (figura 2), sia da analisi più complesse di *source apportionment* (come la *positive matrix factorization* [5]) (figura 3) o di *machine learning* (in particolare la *random forest* [6]). Anche l'osservazione della concentrazione oraria del *black carbon* mostra la diminuzione dell'influenza del traffico, avendo il massimo calo, rispetto

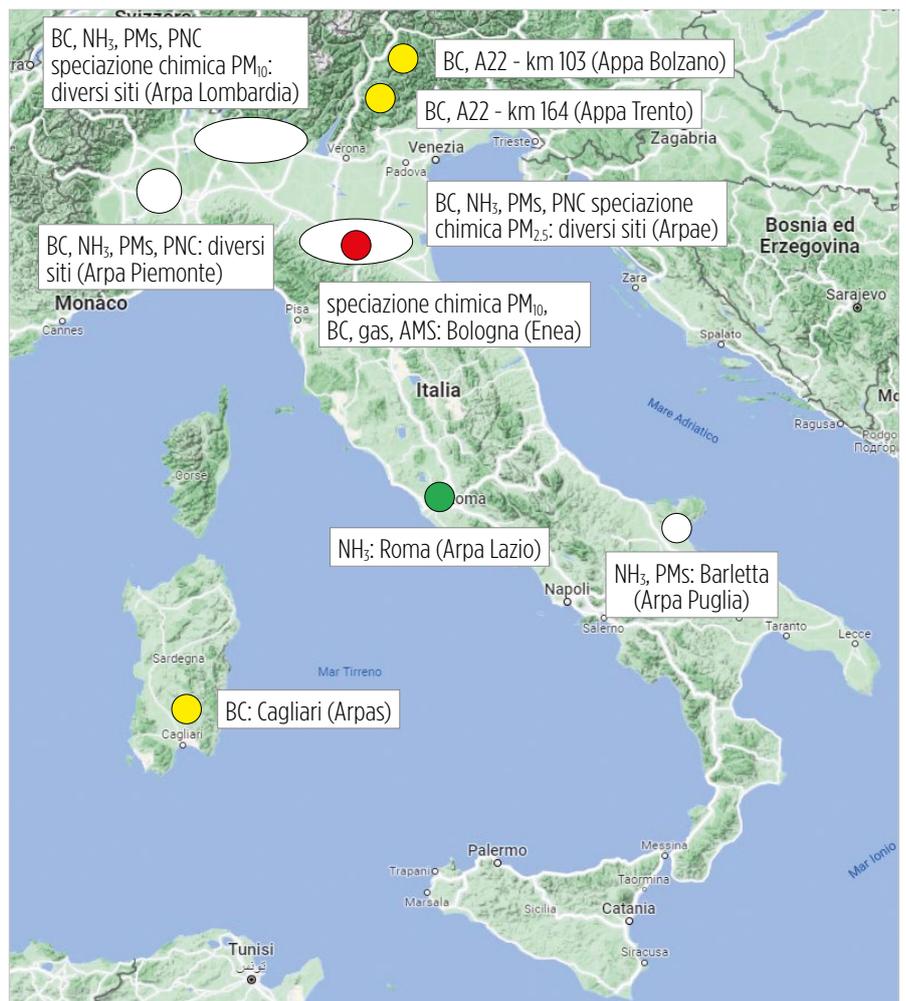


FIG. 1 SITI DI ANALISI

Siti e misure disponibili per l'approfondimento. Non essendo stato possibile programmare le misure in anticipo, dato l'evento inatteso che ha creato le condizioni in studio, sono stati raccolti i dati disponibili nel Srpa di misure in corso per altri fini e messe a disposizione dalle diverse Agenzie ambientali.



alle medie degli anni precedenti, nelle ore di punta mattutine (*rush hour*) (figura 4). La diminuzione di tutti gli indicatori del traffico considerati non si è limitata, come ci si poteva attendere, al solo periodo del *lockdown* della primavera 2020, ma si è protratta almeno fino all'autunno inoltrato, se non fino alla fine dell'anno, anche se non in tutti i siti con la stessa entità. Certamente la fine delle regole più stringenti volte a ridurre la diffusione di Covid-19 ha comportato una ripresa della mobilità ma, con elevata probabilità, la diffusione del lavoro agile (*smart working*), alcune restrizioni su attività ludico-ricreative e la didattica a distanza, per gli istituti secondari, possono aver permesso di mantenere la componente legata al traffico a livelli inferiori rispetto agli anni precedenti, con cali addirittura confrontabili con quelli avuti durante i mesi marzo-maggio 2020, cioè nel pieno del *lockdown*. L'effetto potrebbe essersi parzialmente smorzato in autunno da un lato per la ripresa, seppure parziale, delle scuole primarie, ma anche per un uso più diffuso di mezzi di trasporto propri piuttosto che pubblici, per il timore di quella che era stata definita "seconda ondata" di Covid-19, da ottobre 2020.

Un'altra componente che risulta importante in termini di massa di particolato prodotta, è quella della combustione di biomassa, caratteristica soprattutto del riscaldamento domestico, che almeno nel periodo del *lockdown*, in particolare nella seconda metà di aprile (figura 2), risulta essere cresciuta rispetto alle medie misurate nello stesso periodo negli anni precedenti. Questa condizione, che sembrerebbe in controtendenza rispetto all'andamento nel tempo sia della parte di particolato ascrivibile a questa origine tramite *source apportionment* (figura 3) sia della concentrazione del suo principale marker, il levoglucosano, potrebbe essere spiegata dalla maggior quantità di tempo che le persone sono state costrette a trascorrere in casa, e al conseguente aumento delle ore di accensione dei riscaldamenti domestici. Le due principali fonti di particolato legate alle combustioni, traffico e riscaldamento domestico, sembrano aver avuto, quindi, variazioni in versi opposti durante il *lockdown*, come confermato anche dall'osservazione del *black carbon* se diviso nelle sue componenti prodotte da *fossil fuel* e da *biomass burning* [7] (figura 5). Gli incrementi della frazione di particolato derivanti dalla combustione di legna potrebbero aver mascherato l'effetto del calo dei contributi legati ai trasporti sulla massa totale delle polveri.

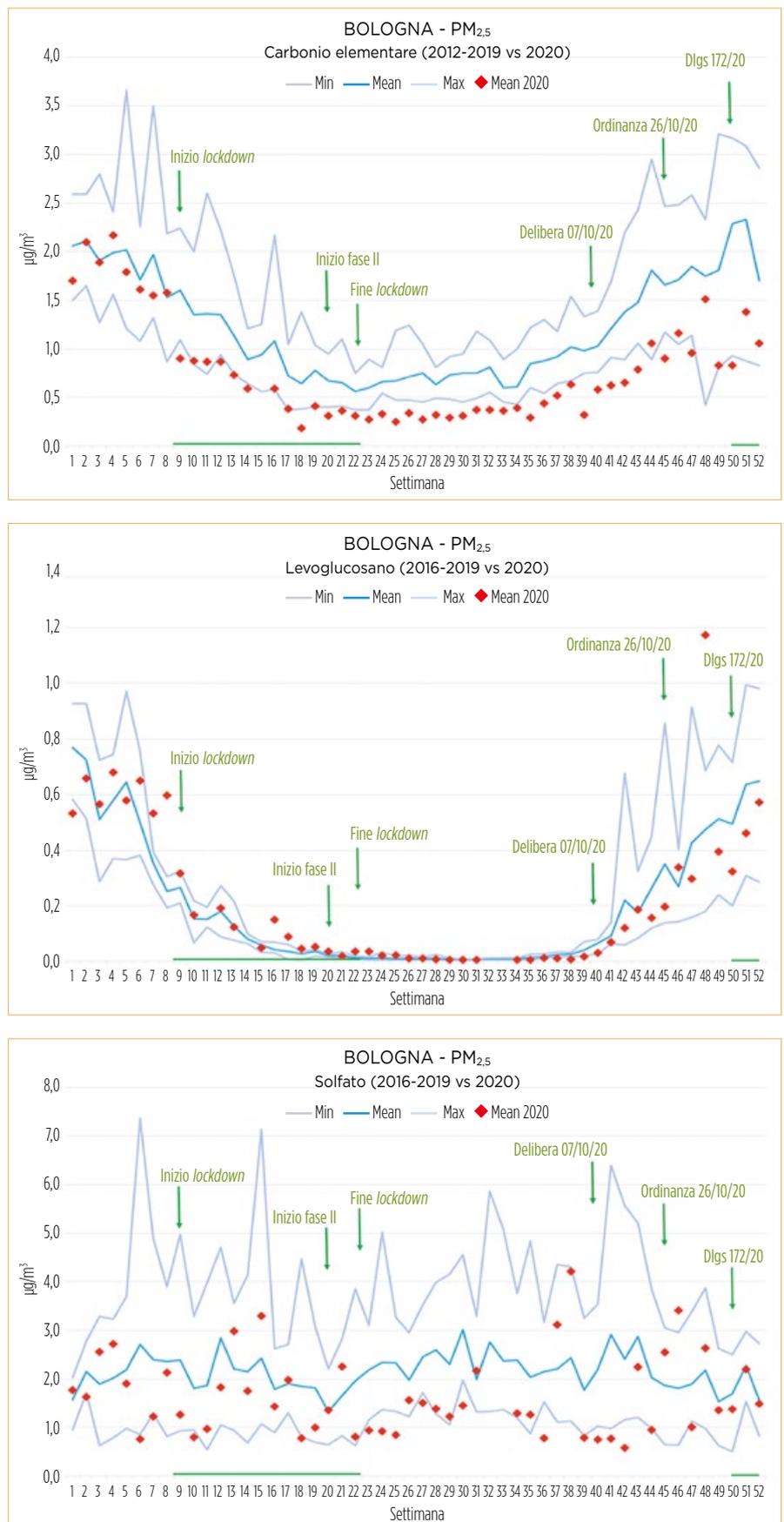


FIG. 2 COMPONENTI DEL PARTICOLATO
 Concentrazione media settimanale di alcune delle componenti chimiche del particolato. Le concentrazioni medie settimanali misurate nel 2020 (in rosso) per carbonio elementare (in alto), levoglucosano (al centro) e ione solfato (in basso) sono state confrontate con quelle registrate nella serie storica: in azzurro i valori minimi e massimi delle medie settimanali dal 2012 al 2019 (per il levoglucosano dal 2016), in blu i valori medi delle medie settimanali. In verde sono stati riportati i momenti di emanazione dei principali interventi volti a combattere la diffusione della pandemia da Covid-19. I grafici si riferiscono ai dati del PM_{2.5} di Bologna, a titolo di esempio.

La componente secondaria del particolato, cioè quella che si forma direttamente in atmosfera da sostanze precedentemente presenti, risulta sempre di difficile lettura. Nonostante i cali registrati degli ossidi di azoto [1; 2] durante il *lockdown*, la parte dell'aerosol di cui sono precursori, il nitrato d'ammonio, non mostra cali significativi se confrontata con le concentrazioni negli anni precedenti. Le analisi eseguite con le tecniche di *machine learning* mostrano un segnale di decrescita delle concentrazioni misurate rispetto a quelle attese in condizioni *business as usual* durante il *lockdown* nei siti di fondo urbano (Milano, Bologna, Parma e Rimini). Tali cali, però, sono confrontabili con la variabilità delle differenze tra concentrazioni attese e misurate espresse dal modello negli stessi periodi degli anni precedenti, quindi non è possibile assumere questo risultato come conclusivo. Considerando che quest'ultima analisi è stata fatta per valutare le concentrazioni in atmosfera al netto dell'effetto della meteorologia su di esse, una diminuzione rispetto al dato previsto sarebbe coerente con l'assunzione che la contrazione delle sorgenti dei precursori (in particolare gli

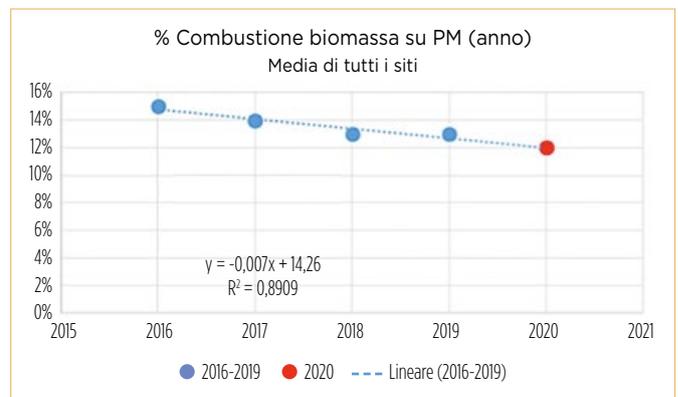
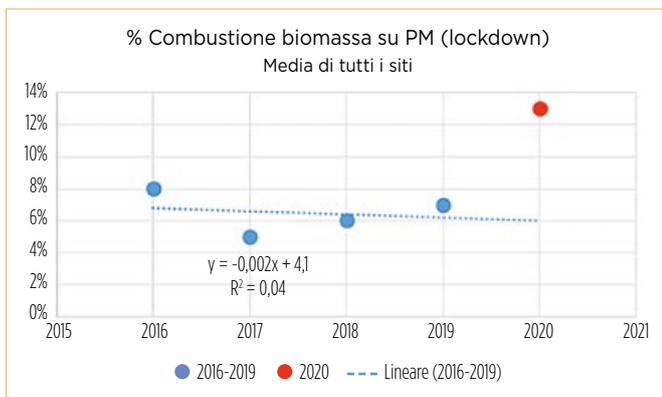
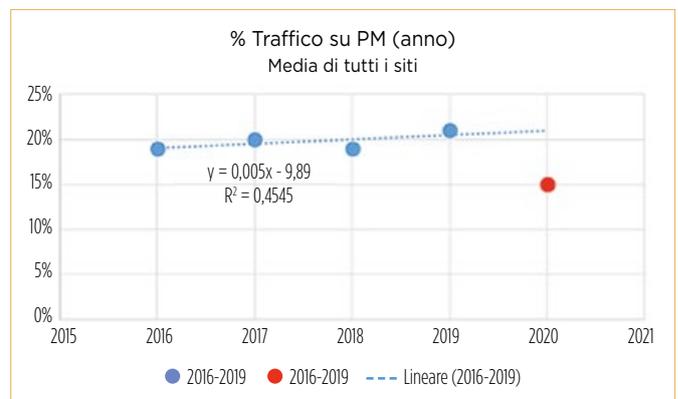
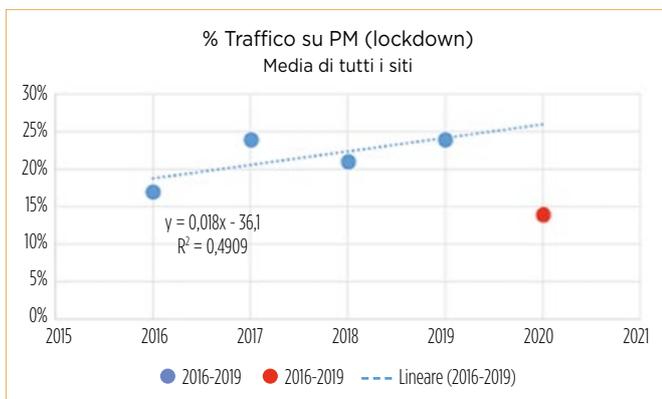


FIG. 3 FATTORI EMISSIVI DI COMBUSTIONE

Percentuale sulla massa di particolato di fattori emissivi di combustione. Con tecniche di *source apportionment* è stato possibile individuare i principali fattori emissivi legate alle combustioni (traffico – in alto - e combustione delle biomasse – in basso) e calcolarne il contributo percentuale alla massa del particolato sia rispetto all'intera annualità che nel solo periodo che nel 2020 è combaciato con il lockdown generale. I dati sono stati espressi come media di tutti i siti disponibili e si riferiscono al PM_{10} di un fondo urbano (Milano) e al $PM_{2,5}$ di tre fondi urbani (Bologna, Parma, Rimini) e un fondo rurale (S. Pietro Capofiume, BO). Si osserva come il traffico nel 2020 è stato chiaramente inferiore agli anni passati anche considerando l'intero anno, non solo durante il lockdown. La combustione di biomassa, al contrario, ha avuto un incremento durante il lockdown, ma come media annua è in linea con gli altri anni.

ossidi di azoto) abbia avuto un effetto di diminuzione della quantità di nitrato rispetto a quello che si sarebbe avuta in condizioni *business as usual*, mascherata dalle condizioni meteorologiche, ma i dati non sono sufficientemente solidi da muovere ipotesi in tal senso, sebbene le stime modellistiche [8] avessero previsto una diminuzione del nitrato d'ammonio.

La componente secondaria del particolato collegabile a un fondo continentale o comunque extraregionale e caratterizzata principalmente dal solfato e da specie organiche molto invecchiate

ha mostrato, dal confronto con gli anni precedenti, una riduzione dall'estate (figura 2).

Tale andamento potrebbe essere legato alla contrazione di una parte delle attività produttive a livello internazionale.

L'assenza di provvedimenti che riguardavano le attività agricole e zootecniche, che sono le sorgenti predominanti di ammoniaca in atmosfera [9], ha comportato una mancanza di variazione delle sue concentrazioni in ambiente nella maggioranza dei punti di misura disponibili. Siti posti in area urbana

di traffico, in una città metropolitana come Roma, invece, hanno mostrato un calo anche di questo gas (figura 6). In questi punti, evidentemente, l'importanza relativa delle diverse fonti di ammoniaca si modifica rendendo predominante la sorgente traffico, che è stata ampiamente ridimensionata dai provvedimenti contro il Covid-19. L'effetto di riduzione delle emissioni prodotte dal traffico, nei siti dove questa sorgente è la principale, come in quelli di Roma considerati, è stato talmente importante da incidere non solo su traccianti specifici, ma anche su altre specie come l'ammoniaca.

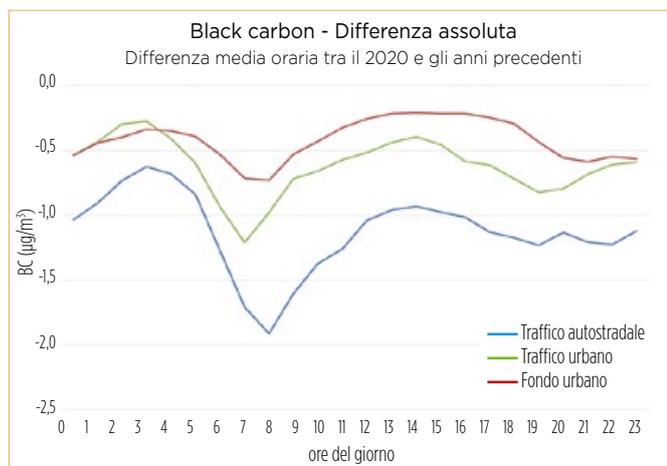


FIG. 4 BLACK CARBON

Diminuzione media oraria del black carbon nel 2020 rispetto agli anni precedenti. Nel grafico è riportata la differenza tra la concentrazione oraria misurata nel 2020 e quelle ottenute per gli anni 2017-2019 della concentrazione di black carbon in diverse tipologie di sito: di traffico autostradale (in rosso), di traffico urbano (in verde), di fondo urbano (in giallo).

Il calo nel 2020 è tanto più marcato quanto più i siti sono influenzati dal traffico. La variazione massima è stata registrata in corrispondenza delle ore di punta del mattino (*rush hour*).

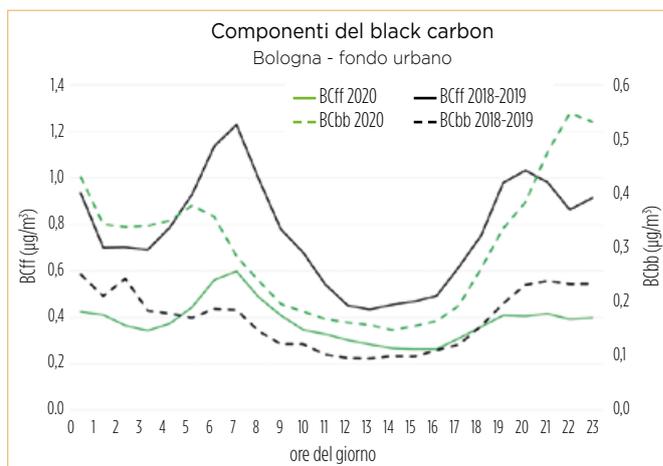


FIG. 5 BLACK CARBON

Concentrazione delle componenti del black carbon del giorno medio durante il lockdown 2020 rispetto agli anni precedenti. La concentrazione totale di black carbon può essere divisa in una componente legata alla combustione di biomassa (BCbb, linee tratteggiate) e una legata al traffico (BCff, linee continue). Il confronto tra la media oraria di queste due componenti misurate in un sito di fondo urbano di Bologna nel periodo 11/03-18/05 del 2020 (in verde) rispetto alle medie orarie degli stessi giorni del 2019 (più qualche giorno del 2018), mostrano come in seguito al lockdown si sia avuto un calo dell'incidenza del traffico e un incremento della componente legata alla biomassa.



In conclusione, un impatto sul particolato delle azioni messe in campo per combattere la diffusione della pandemia è stato osservato, per la maggior parte, nel verso della diminuzione dei contributi delle specie, anche se, in certi casi, mascherato da effetti opposti. I risultati dell'analisi con tecniche di *machine learning* confermano come le riduzioni misurate, ad esempio sulle concentrazioni di carbonio elementare, non siano dovute a condizioni di variabilità tra gli anni legate alle condizioni meteorologiche, ma siano imputabili alla variazione dei contributi antropici. Le analisi non permettono di capire con certezza se cali di altre specie siano stati celati dalla meteorologia, come potrebbe essere accaduto, ad esempio, per il nitrato. I risultati più evidenti riguardano gli effetti legati alla riduzione dei trasporti, con cali nella frazione primaria del particolato che permangono ben oltre il termine dei provvedimenti più stringenti del primo *lockdown* indicando che anche le misure messe in atto nell'autunno sembrano avere inciso in maniera consistente. Infine, sembrano diminuite anche le frazioni di particolato legate a componenti antropiche extraregionali, a fronte di una crescita, durante il solo *lockdown*, delle combustioni di biomassa.

Dimitri Bacco, Arianna Trentini, Fabiana Scotto

Arpae Emilia-Romagna

Si ringraziano per la collaborazione tutto il gruppo di lavoro dell'obiettivo 3 di Pulviris e gli istituti, gli enti e le agenzie che hanno messo a disposizione i dati da loro raccolti.

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 3 PULVIRIS

- Arpa Lazio: Maria Abbate, Pietro Liburdi
- Arpa Lombardia: Andrea Algieri, Cristina Colombi, Eleonora Cuccia, Umberto Dal Santo, Anna Di Leo, Guido Lanzani
- Arpa Veneto: Alessandro Benassi, Gianmaria Formenton
- Arpae Emilia-Romagna: Dimitri Bacco, Silvia Ferrari, Claudio Maccone, Fabiana Scotto, Arianna Trentini
- Enea: Giuseppe Cremona, Teresa La Torretta, Antonella Malaguti, Ettore Petralia, Milena Stracquadanio
- Ispra: Antonio Amoroso, Fabio Cadoni, Damiano Centioli, Alessandro Di Menno di Bucchianico, Giada Marchegiani
- ISS: Marco Inglessis, Gaetano Settimo
- Univ. Milano Bicocca: Gualtieri Maurizio

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] Eea, *Air quality in Europe - 2020*, Eea Report n. 9/2020, www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report.
- [2] Progetto Life Prepair, *Report 2 Covid-19 studio preliminare degli effetti delle misure Covid-19 sulle emissioni in atmosfera e sulla qualità dell'aria nel bacino padano - Agosto 2020* www.lifeprepare.eu/wp-content/uploads/2020/09/COVIDQA-Prepair-2-17Settembre2020.pdf
- [3] www.pulviris.it/index.php/obiettivi/obiettivo-3/componenti-del-pm/
- [4] www.pulviris.it/index.php/documentazione-obiettivo-3/
- [5] Epa, "Positive matrix factorization model for environmental data analyses", www.epa.gov/air-research/positive-matrix-factorization-model-environmental-data-analyses.
- [6] Breiman L., 2001, "Random Forests", *Machine Learning*, 45, 5-32, <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>, <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1010933404324>.
- [7] <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es702253m>
- [8] Ciarelli G., Jiang J., El Haddad I., Bigi A., Aksoyoglu S., Prévôt A.S.H., Marinoni Shen J., Yan C., Bianchi F., 2021, "Modeling the effect of reduced traffic due to Covid-19 measures on air quality using a chemical transport model: impacts on the Po Valley and the Swiss Plateau regions", *Environ. Sci. Atmos.*, 1, 5, 228-240, <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/EA/D1EA00036E>.
- [9] https://annuario.isprambiente.it/sys_ind/807

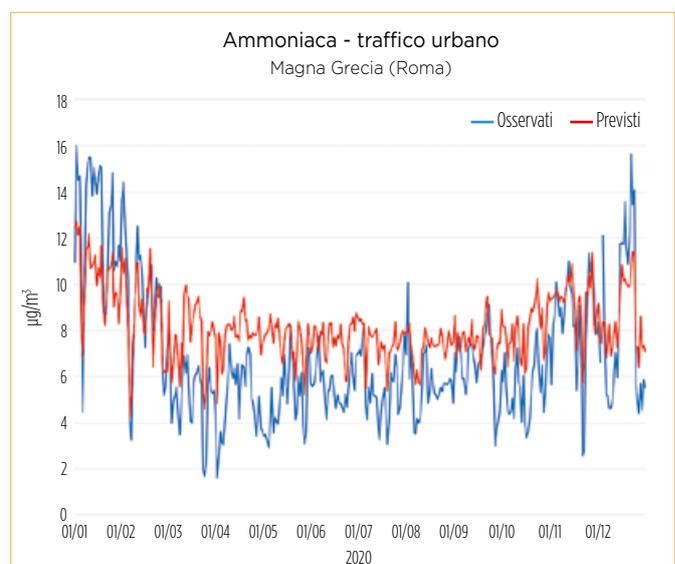
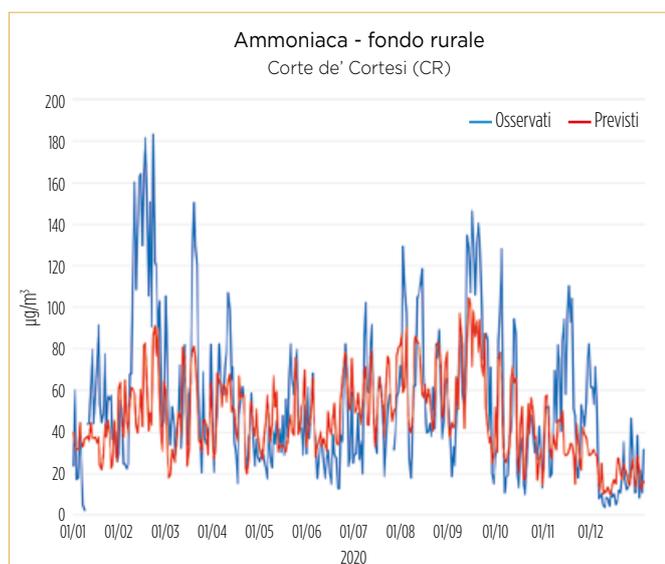


FIG. 6 AMMONIACA

Confronto tra concentrazioni di ammoniaca osservate e previste in base ad analisi di *machine learning*. L'analisi tramite *random forest* permette di calcolare le concentrazioni che ci si sarebbe dovuto aspettare in condizioni *business as usual* in base alle condizioni meteorologiche e in assenza di provvedimenti contro il Covid-19. I risultati sulle concentrazioni di ammoniaca per un sito rurale (a sinistra) mostrano l'assenza di un effetto coerentemente con il fatto che non erano previste restrizioni sulle attività agricole o zootecniche. Al contrario le concentrazioni di ammoniaca misurate in un sito da traffico in una metropoli (a destra) sono inferiori a quelle che sono state previste dal modello per effetto della contrazione dei trasporti locali.

POST LOCKDOWN, GLI EFFETTI DELLE MISURE ANTI COVID-19

RIFLESSIONI E CONCLUSIONI SUI RISULTATI DELLE ANALISI SULLA CARATTERIZZAZIONE CHIMICA DEL PARTICOLATO ATMOSFERICO IN RELAZIONE ALL'IMPATTO DELLE MISURE RESTRITTIVE DOVUTE AL LOCKDOWN SULLE SORGENTI EMISSIVE MISURATE IN UNA ZONA RESIDENZIALE DI BOLOGNA, CONSIDERATA SITO DI TRAFFICO SUBURBANO.

Le misure adottate da marzo a maggio 2020 sia a livello globale sia a livello nazionale per il contenimento della diffusione del virus Sars-cov-2 hanno determinato modifiche nello stile di vita e nelle abitudini delle persone con una conseguente ripercussione su diversi settori di sorgenti di emissione di particolato atmosferico (PM) e in particolare, a livello urbano, sul traffico veicolare.

L'attività svolta da Enea nell'ambito dell'obiettivo 3 del progetto Pulvirus si è focalizzata nella valutazione dell'effetto sulla composizione chimica del particolato atmosferico correlato all'impatto delle misure emergenziali sulle sorgenti emissive.

La caratterizzazione chimica del PM è stata effettuata attraverso campionamenti di 24h di particolato PM₁₀ su filtro su cui sono state determinate le concentrazioni in massa di PM₁₀, metalli ed elementi in traccia, ioni inorganici solubili in acqua, levoglucosano e frazione carboniosa. Sono state condotte inoltre misure ad alta risoluzione temporale delle concentrazioni in massa di carbonio elementare (EC) e organico (OC) con metodo termo-ottico, del *black carbon* (BC) con metodo ottico con risoluzione di 2h, e della frazione carboniosa non refrattaria a 600 °C (OM) con risoluzione di 30 min.

Il sito di misura (44°31'30",63 N; 11°20'40",92 E), situato in una zona residenziale della città di Bologna, si trova a circa 500 metri dalla tangenziale di Bologna e a circa 50 metri da un'arteria di traffico cittadino; può essere dunque considerato un sito di traffico-suburbano. Le analisi e il *source apportionment* hanno rivelato e quantificato il contributo relativo prevalente del trasporto merci su gomma alimentato a gasolio, rimasto sempre in attività durante il *lockdown*, e un aumento del contributo delle autovetture alimentate a benzina con la ripresa della normale circolazione e il conseguente aumento del flusso veicolare complessivo.

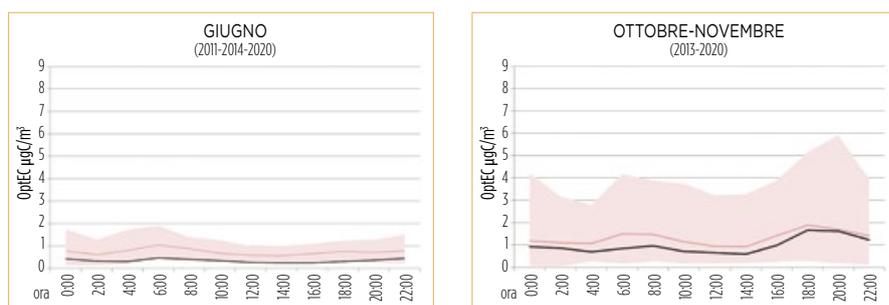


FIG. 1 BLACK CARBON
Andamento giornaliero di BC a confronto con medie di serie storiche (max e minimi nella tonalità del rosa).
— Media serie storica
— OptEC 2020 media

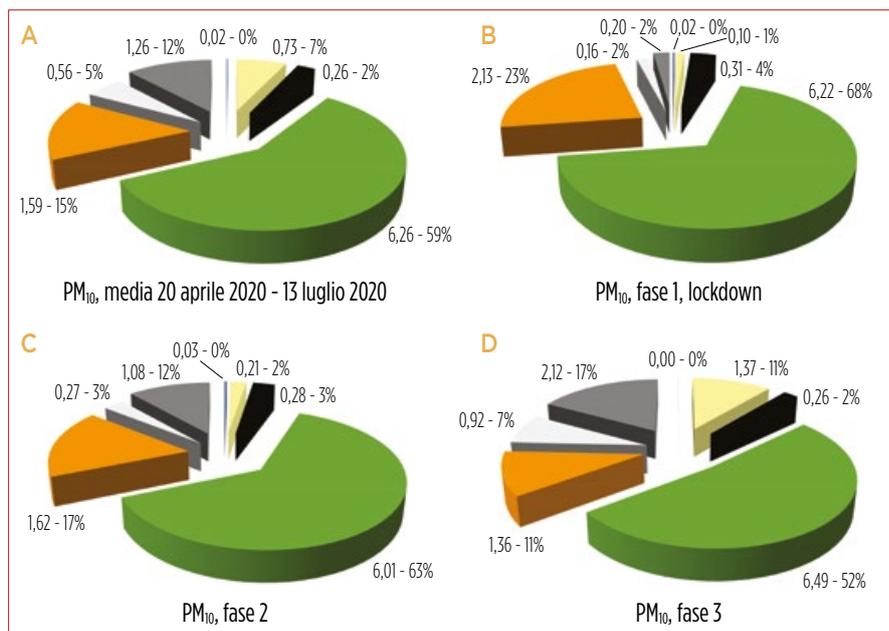


FIG. 2 PM₁₀
Composizione media dei principali componenti del PM₁₀ nell'intero periodo di campionamento.

■ Sea Salt Aerosol ■ Soil Dust ■ Elemental Carbon ■ Particulate Organic Matter
■ Secondary Inorganic Aerosol ■ Σ Metals Trace Elements ■ Other Components

Nel dettaglio la riduzione della sorgente traffico veicolare privato si è tradotta in una riduzione delle concentrazioni medie giornaliere di *black carbon* (BC), tracciante delle emissioni da traffico ma soprattutto inquinante con effetti sulla salute e sul clima, come mostrato dalle variazioni delle concentrazioni medie di BC nel periodo successivo al *lockdown* rispetto agli stessi periodi in anni precedenti (*figura1*).

I campionamenti di particolato PM₁₀ su filtro hanno coperto il periodo 20 aprile-13 luglio 2020. La composizione chimica delle principali componenti del PM₁₀ (*Particulate organic matter* - Pom; *Secondary inorganic aerosol* - Sia; *Aerosol sea salt* - Ssa; *Road and soil dust* - S_D; EC; metalli ed elementi in tracce non inclusi nel dust - ΣMet Trace El), per l'intero periodo considerato

e per le singole fasi è riportata nella *figura 2*. La composizione chimica relativa ha effettivamente mostrato variazioni percentuali in relazione alle varie misure restrittive regolamentate nei diversi Dpcm messi in atto in quel periodo (fasi 1-lockdown e 2 fino al 3 giugno, fase 3 dal 4 giugno 2020). Il Pom è la componente maggiormente presente nel PM₁₀ in tutte le fasi considerate, variando dal 68% nella fase 1, quella di *lockdown* più restrittivo, fino al 52% nella fase 3 caratterizzata dalla ripresa delle attività quotidiane. Le variazioni maggiori tra le fasi nella composizione chimica percentuale si rilevano nelle componenti Sia e *dust*: la prima presenta una diminuzione, mentre la seconda presenta un aumento dalla fase 1 alla fase 3.

La concentrazione media della componente *dust* presenta un incremento da 0,1 µg/m³ nella fase 1 di *lockdown* a 1,4 µg/m³ nella fase 3, attribuibile a una maggiore densità (flusso) del traffico veicolare nell'ultima fase.

Nella composizione del Sia è stato determinato un maggior contributo della concentrazione media dello ione solfato (0,77 µg/m³) rispetto allo ione nitrato (0,30 µg/m³) sia nell'intero periodo sia nelle diverse fasi (*figura 3*). Il solfato può essere associato in parte al fondo sovra regionale o continentale e in parte alle emissioni dei motori diesel e di oli combustibili pesanti. Il minor contributo al secondario inorganico del nitrato può essere legato sia alla diminuzione delle sorgenti emittive nella prima fase sia al calo di concentrazioni che si registra normalmente nella stagione estiva. È stata eseguita una analisi di *source apportionment* con metodologia Pmf-Epa (G. Norris, R. Duvall, 2014) a partire dai valori giornalieri misurati tra il 21 aprile e il 13 luglio 2020 sul particolato PM₁₀ sulle concentrazioni in massa dei parametri PM₁₀, EC, OC, Al, Si, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Zn, Pd, Ba, Pb, Cd, NO₃⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, levoglucosano, NO_x, benzene, toluene.

Sono stati individuati 4 fattori corrispondenti ad altrettante macro-sorgenti emittive.

Il primo fattore, che vede un contributo elevato di levoglucosano (*marker* della combustione di biomassa legnosa), è stato identificato come combustione residenziale e da attività commerciali (pizzerie, panifici ecc.).

Il secondo fattore con predominanza di Al, Si, Ca, Ti, Mn, Fe e Zn è stato associato a terrigeno e risospensione stradale.

Il terzo fattore presenta valori elevati di Ba insieme a EC (maggior di

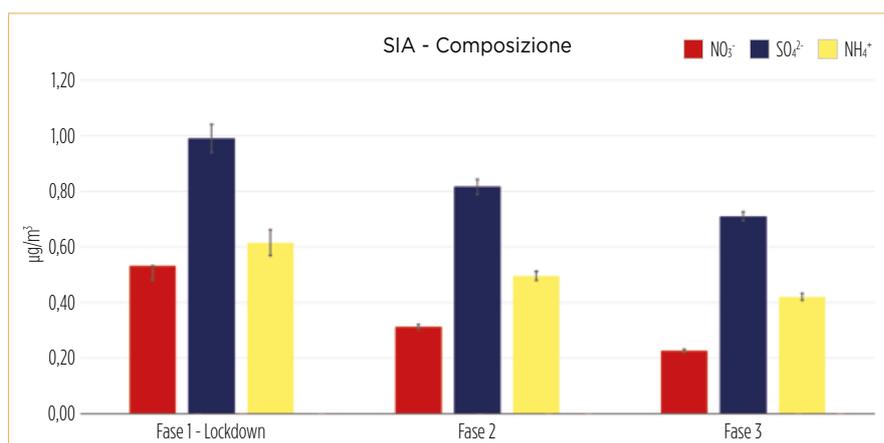


FIG. 3 SECONDARY INORGANIC AEROSOL

Composizione media (± errore standard della media) del SIA espressa in µg/m³ nelle tre fasi.

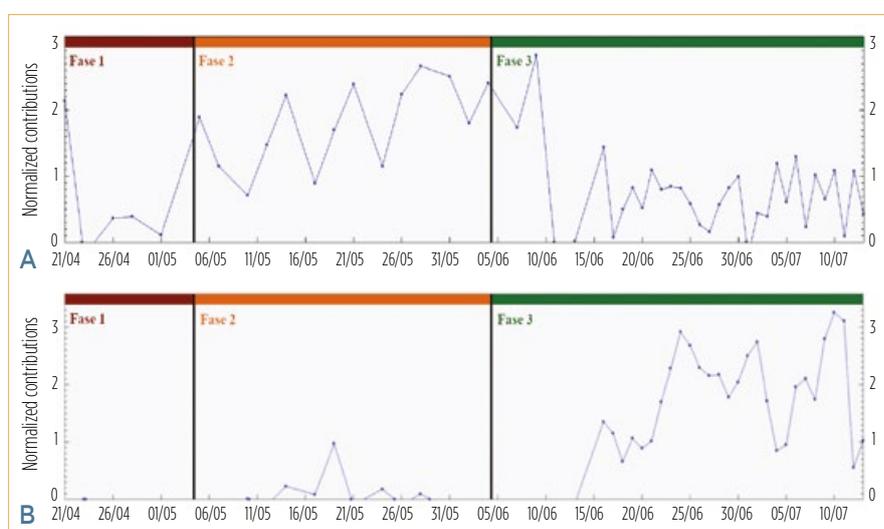


FIG. 4 SORGENTI DI TRAFFICO

Sorgente traffico diesel (a), sorgente road and soil dust (b).

OC), SO₄²⁻, NO_x e benzene ed è stato identificato come traffico veicolare "diesel".

Il quarto fattore con OC (maggior di EC), Cr, Pd, Ba, Pb, Cd e benzene è stato associato a traffico veicolare "benzina", per lo più corrispondente alle automobili. In sintesi si possono trarre le seguenti considerazioni riportate nella *figura 4*.

Fasi 1 e 2: nonostante la riduzione del traffico, tale sorgente rimane comunque preponderante per questo sito residenziale. L'analisi Pmf ha evidenziato come nella fase di *lockdown* la sorgente "traffico" fosse maggiormente rappresentata da emissione di motori diesel, verosimilmente in relazione a veicoli per il trasporto merci su gomma: il settore della logistica è rimasto sempre in attività durante tutto il periodo. È interessante, a conferma di ciò, sottolineare che i giorni di minimi relativi durante il primo periodo coincidono per la quasi totalità con le domeniche o giorni festivi, in cui la circolazione di mezzi pesanti è ridotta per legge.

Fase 3: con la ripresa della normale circolazione aumenta il numero di veicoli circolanti, in particolare quelli alimentati a benzina, come confermato dall'aumento delle concentrazioni di benzene (tracciante del traffico veicolare in ambiente urbano), NO_x e polveri da risospensione stradale. Da sottolineare una decrescita per effetto dell'innalzamento delle temperature esterne, con il conseguente aumento del volume di diffusione degli inquinanti in atmosfera (aumento dell'altezza del *boundary layer*) e la diminuzione della concentrazione in massa degli inquinanti in aria ambiente.

Maggiori dettagli sono disponibili sul sito del progetto, nella documentazione dell'obiettivo 3 (www.pulviris.it/index.php/documentazione-obiettivo-3).

Teresa La Torretta

Laboratorio inquinamento atmosferico, Enea

LA VARIAZIONE DI CO₂ A LAMPEDUSA NEL LOCKDOWN

LA STAZIONE ENEA DI OSSERVAZIONI CLIMATICHE DI LAMPEDUSA È UN SITO DI MISURA DI FONDO, OSSIA NON INFLUENZATO DA SORGENTI ANTROPICHE LOCALI. IN CORRISPONDENZA DELLA DIMINUIZIONE DELLE EMISSIONI DEL 2020, IL TASSO DI CRESCITA ANNUALE DELLA CO₂ NON PRESENTA SIGNIFICATIVE RIDUZIONI RISPETTO AGLI ANNI PRECEDENTI.

Le politiche di contenimento della pandemia del virus Sars-cov-2 hanno profondamente influenzato le nostre abitudini portando a ridurre per alcuni mesi le emissioni antropiche dei gas a effetto serra in tutto il mondo. I numerosi studi di attribuzione del cambiamento climatico (si veda ad esempio Ipcc, 2013) mostrano che il riscaldamento globale in atto è legato al continuo aumento delle emissioni di gas serra di origine antropica iniziato con la rivoluzione industriale, e che solo la progressiva diminuzione delle emissioni potrà limitare l'attuale aumento della temperatura media del pianeta.

Il principale contributo delle attività umane alle emissioni dei gas serra è dovuto al rilascio di biossido di carbonio, anche denominato con una vecchia notazione anidride carbonica, CO₂. Nonostante le emissioni annuali di CO₂ nel 2020 si siano ridotte rispetto al 2019 dell'8,9% a livello nazionale e del 5,4% a livello globale, l'aumento annuo della concentrazione atmosferica di CO₂ non ha subito variazioni evidenti rispetto al periodo precedente (Wmo, 2021), anzi il tasso di crescita della concentrazione atmosferica di CO₂, sebbene sia stato lievemente inferiore a quello osservato dal 2018 al 2019, è stato superiore al tasso annuale medio di crescita nell'ultimo decennio.

La mancanza di un legame diretto e immediato tra la riduzione delle emissioni antropiche di gas serra nel 2020 e la sua concentrazione media in atmosfera è dovuta alla complessità del ciclo globale del carbonio. Le emissioni dovute alle attività umane attualmente sono circa 45 volte inferiori rispetto ai flussi naturali di carbonio tra atmosfera, oceano e biosfera. Tuttavia, la lunga vita media delle molecole di CO₂ in atmosfera produce un continuo accumulo rispetto all'età pre-industriale che, inoltre, rischia di squilibrare in maniera non del tutto prevedibile le complesse interazioni biogeochimiche



IMMAGINE: WWW.LAMPEDUSA.ENEAIT

1



FOTO: WWW.LAMPEDUSA.ENEAIT

2

che intervengono nel ciclo del carbonio e che sono spesso legate tra loro in maniera non lineare.

Il titolo dell'ultimo *Emission gap report* del Programma per l'ambiente delle Nazioni unite, *The Closing Window, Climate crisis calls for rapid transformation of societies* (Unep, 2022) è un chiaro richiamo alla necessità di agire al più presto se si vuole cercare di limitare l'aumento della temperatura media globale.

Nonostante nei siti direttamente influenzati dalle attività antropiche durante il periodo del *lockdown* si sia osservata una diminuzione delle concentrazioni di CO₂ indotta dalla riduzione delle emissioni antropiche (Papale et al., 2020), non si può dire lo stesso per le concentrazioni misurate

presso la stazione di osservazioni climatiche Enea di Lampedusa (www.lampedusa.enea.it) che dal 1992 contribuisce al *World data centre for greenhouse gases* (Wdceg, <https://gaw.kishou.go.jp>), un database internazionale afferente al programma *Global atmosphere watch* (Gaw) dell'Organizzazione meteorologica mondiale (Wmo). Questa differenza dipende dal fatto che la stazione Enea rappresenta un sito di fondo, ovvero un sito di misura non direttamente influenzato da sorgenti antropiche locali, le cui misure forniscono risultati geograficamente e spazialmente rappresentativi di una vasta regione, in questo caso il Mediterraneo centrale. È proprio grazie a questo tipo di stazioni distribuite in tutto il mondo

che si può valutare l'aumento globale della concentrazione atmosferica della CO₂, che è il principale responsabile dell'aumento dell'intrappolamento della radiazione infrarossa in atmosfera, il così detto effetto serra, e del conseguentemente aumento della temperatura media globale. L'aumento della concentrazione di CO₂ così come osservato presso la stazione di Lampedusa dal 1992 è mostrato nella *figura 1*, che evidenzia come in 30 anni si sia passati da valori di circa 355 a 415 ppm (parti per milione), il che corrisponde a un aumento annuo medio di 2 ppm. È bene far presente che l'aumento annuale varia nel tempo ed è del tutto analogo a quello osservato a livello mondiale, a dimostrazione che Lampedusa, oltre che rappresentare direttamente il Mediterraneo centrale, rispecchia in pieno il comportamento osservato a livello planetario. L'evoluzione temporale della CO₂ misurata a Lampedusa presenta caratteristiche generali che sono comuni a tutte le stazioni di fondo anche se caratterizzate da tempistiche e ampiezze diverse. Tra queste vi sono:

- un trend di crescita che riflette l'aumento del contenuto di CO₂ in atmosfera
- un ciclo annuale, che presenta un massimo all'inizio della primavera e un minimo estivo, imputabile principalmente ai processi di fotosintesi della vegetazione
- la presenza di fluttuazioni a breve termine dovute alla variabilità delle masse d'aria che raggiungono il punto di misura.

La *figura 2* mostra l'evoluzione della concentrazione media oraria di CO₂ nei mesi di marzo, aprile e maggio, per gli anni che vanno dal 2014 al 2020. Come aspettato, si osserva un aumento della concentrazione di anno in anno anche se caratterizzato da un'elevata variabilità temporale. Osservando l'andamento della CO₂ nei diversi anni, si nota che esistono pochi periodi che presentino una variabilità inferiore a quella osservata nell'aprile 2020. Questo periodo è stato quindi studiato in dettaglio per verificare se la diminuzione osservata nella metà del mese fosse dovuta alla riduzione delle emissioni antropiche legate alle restrizioni imposte dal *lockdown*.

1 Immagine satellitare dell'isola di Lampedusa; in evidenza la posizione della stazione Enea lungo la costa nord-orientale, vicino al faro di Capo Grecale.
2 Stazione di osservazioni climatiche Enea "Roberto Sarao" a Lampedusa.

FIG. 1
EVOLUZIONE CO₂

L'evoluzione della concentrazione atmosferica di CO₂ misurata a Lampedusa (in nero). La linea rossa simula l'evoluzione annuale mediante un fit non lineare.

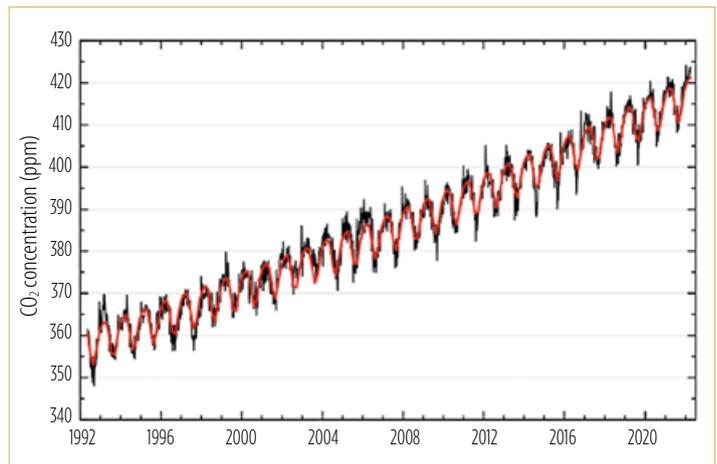


FIG. 2
ANDAMENTO CO₂

L'andamento primaverile della concentrazione di CO₂ dal 2014 al 2020 è rappresentato da linee di colori diversi. Nella primavera del 2018 le misure hanno subito un'interruzione per problemi allo strumento.

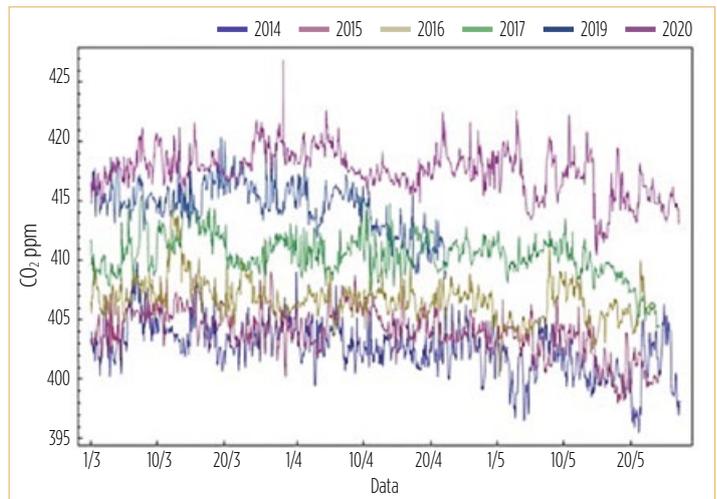
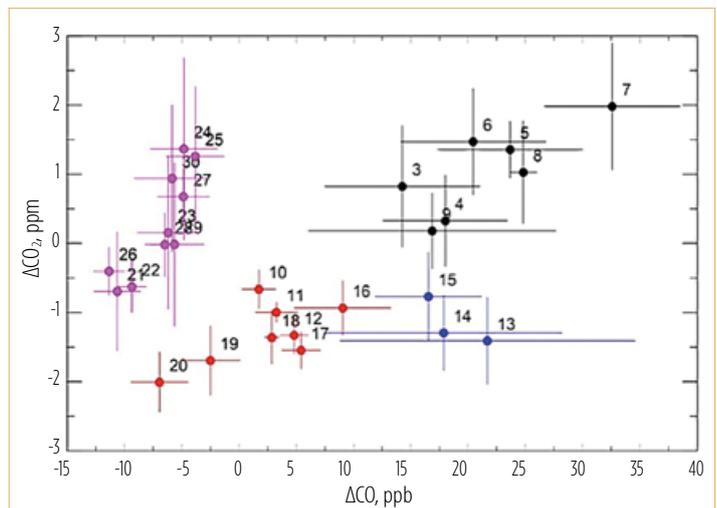


FIG. 3
DIFFERENZE CO₂ E CO

Distribuzione della differenza tra il valore medio giornaliero e il valore del fit della concentrazione di CO₂ e di CO per i dati di Lampedusa. Le barre di errore rappresentano la deviazione standard della media giornaliera, indice della variabilità delle misure. I numeri rappresentano i giorni di aprile.



Per evidenziare l'impatto che il percorso della massa d'aria ha sulla variabilità della CO₂ atmosferica si mostra il legame tra l'anomalia del valore medio giornaliero della CO₂ (differenza tra l'andamento della curva nera e della curva rossa di *figura 1*) e del monossido di carbonio, CO (*figura 3*). Il CO viene prodotto principalmente da processi di combustione di composti organici, siano essi di origine naturale, come per gli incendi o di origine

antropica, come per il traffico veicolare o la produzione industriale. L'aumento della concentrazione di CO in genere è associato a una massa d'aria maggiormente influenzata da attività antropiche.

La *figura 3* presenta la distribuzione delle anomalie di CO₂ e di CO (si veda l'analisi di dettaglio presente nel report pubblicato sul sito del progetto Pulvirus, Anello et al. 2022, www.pulvirus.it/index.php/documentazione-obiettivo-4),

denominate rispettivamente ΔCO_2 e ΔCO . Le misure si possono raggruppare in quattro periodi nel mese di aprile, evidenziati in figura da colori diversi, caratterizzati da aumenti e diminuzioni di ΔCO_2 e ΔCO avvenuti sia in maniera concorde sia opposta. Per interpretare questa variabilità delle anomalie giornaliere si è valutata la storia delle masse d'aria, calcolata con l'utilizzo di retro-traiettorie ottenute dal *Hybrid single-particle lagrangian integrated trajectory model* (Hysplit; Stein et al., 2015), in modo da individuare quali regioni abbiano influenzato le masse d'aria prima di arrivare a Lampedusa. La figura 4 mostra un esempio delle retro-traiettorie che rappresentano il percorso effettuato dalla massa d'aria prima di arrivare a Lampedusa; in questo caso si mostrano con linee di diversi colori (rossa, blu e verde) le traiettorie compiute dalle masse d'aria che giungono alle quote di 50, 200 e 400 m.

Dal confronto congiunto tra l'anomalia giornaliera di CO_2 e CO mostrata in figura 3 e l'andamento delle retro-traiettorie si evidenziano quattro distinti periodi nel mese di aprile 2020.

I dettagli di questa analisi sono riportati nel report di questa attività presente sul sito del progetto Pulvurus (www.pulvurus.it/index.php/documentazione-obiettivo-4), ma i risultati possono essere così riassunti:

- in un sito di fondo come Lampedusa la variabilità della concentrazione della CO_2 è prevalentemente influenzata da sorgenti non locali
- i valori maggiori di ΔCO_2 e ΔCO osservati durante l'aprile del 2022 sono legati ad aria di origine balcanica, dove erano presenti incendi di biomassa
- i valori minori di ΔCO_2 e ΔCO avvengono in corrispondenza a masse d'aria caratterizzate da traiettorie fortemente discendenti e quindi non direttamente influenzate da emissioni antropiche nei giorni precedenti l'arrivo a Lampedusa.

In conclusione l'analisi ha evidenziato come nell'aprile 2020 presso la stazione di fondo di Lampedusa non sia stato possibile rilevare un impatto diretto della riduzione delle emissioni antropiche di CO_2 legate alle politiche di contenimento della pandemia del virus Sars-cov-2, a causa della dinamica delle masse d'aria, della variabilità intrinseca del fenomeno e della relativamente piccola entità delle riduzioni che si sono verificate.

A cura dell'obiettivo 4.1 del progetto Pulvurus

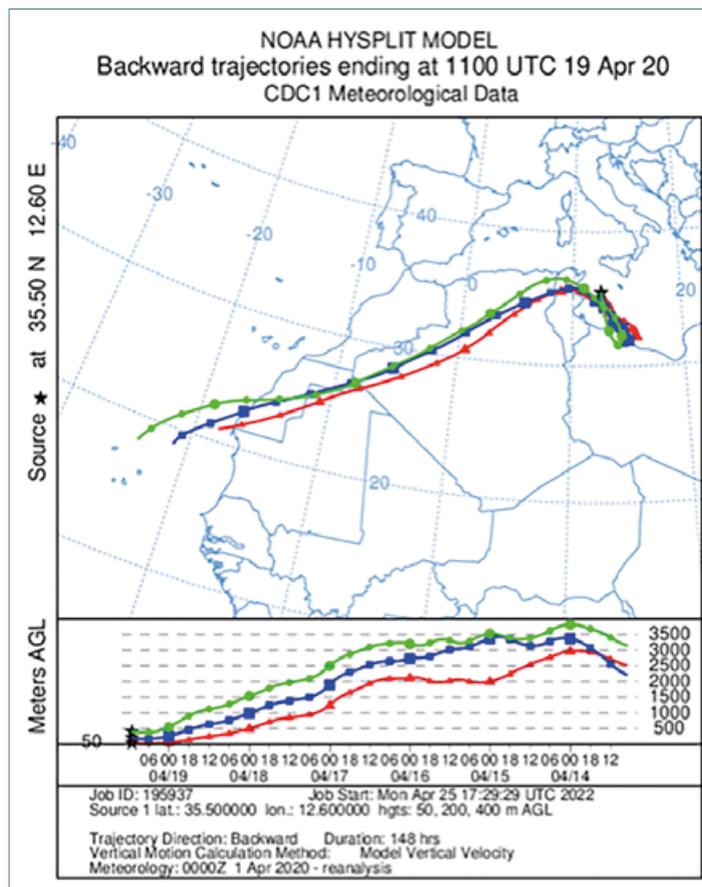


FIG. 4 MODELLO HYSPLIT

Retro-traiettorie di 7 giorni con arrivo a Lampedusa il 19 aprile 2020 alle quote di 50, 200 e 400 m. ottenute dal modello Hysplit.

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 4.1 PULVIRUS

Task 4.1 - Valutazione dell'impatto della riduzione delle emissioni sulla composizione atmosferica e sulle concentrazioni ambientali di gas serra

Enea: Fabrizio Anello, Marianna Conte, Lorenzo De Silvestri, Tatiana Di Iorio, Alcide di Sarra, Daniela Meloni, Francesco Monteleone, Giandomenico Pace, Salvatore Piacentino, Damiano Sferlazzo

Ispira: Riccardo De Lauretis, Ernesto Taurino

Arpa Sicilia: Anna Abita, Lucia Basiricò

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Anello F., Cinelli G., Conte M., Di Iorio T., di Sarra A., Meloni D., Monteleone F., Pace G., Piacentino S., Sferlazzo D.M., 2022, *Analisi della serie temporale delle misure di CO_2 e CO della Stazione di osservazioni climatiche di Lampedusa*, 30 giugno 2022, www.pulvurus.it/wp-content/uploads/2022/08/Report-4.1-Analisi-della-serie-temporale-delle-misure-di-CO2-e-CO_Lampedusa.pdf

Ippc, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, and P.M. Midgley (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Stein A.F., Draxler R.R., Rolph G.D., Stunder B.J.B., Cohen M.D., Ngan F., 2015, "Noaa's Hysplit atmospheric transport and dispersion modeling system", *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>.

United Nations Environment Programme (Unep), 2022, *Emissions Gap Report 2022: The Closing Window — Climate crisis calls for rapid transformation of societies*, Nairobi, www.unep.org/emissions-gap-report-2022.

Wmo, 2021, *Greenhouse Gas Bulletin, No.17: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020*, 25 ottobre 2021, <https://library.wmo.int>

COVID-19, ECONOMIA ED ENERGIA IN ITALIA, QUALE IMPATTO?

UN CONFRONTO TRA LA CRISI DEL 2008 CON QUELLA CAUSATA DALLE RESTRIZIONI DOVUTE ALLA PANDEMIA SUI MAGGIORI SETTORI INDUSTRIALI E SULLE CONTRAZIONI ENERGETICHE, MOSTRA UNA CORRELAZIONE TRA IL CONSUMO ELETTRICO E LA CURVA EPIDEMIOLOGICA DEL PRIMO LOCKDOWN. SI È RIDOTTA L'EMISSIONE DI GAS SERRA.

Il progetto Pulvirus ha voluto indagare i diversi effetti che la crisi pandemica ha comportato. Tra essi è stato possibile analizzare le modalità e la forza dell'impatto che l'attuazione delle misure di contenimento della diffusione del coronavirus (Covid-19) ha avuto sul sistema economico, energetico e ambientale italiano.

Come è noto, la pandemia da Covid-19, oltre alle tremende conseguenze in termini di salute pubblica, ha innescato un drastico calo del Pil nel 2020 con la conseguente crisi globale, che si è manifestata con tempi e modi differenti nei diversi Paesi. In Italia, il crollo del Pil è stato più sofferto a causa della debolezza strutturale progressiva. Infatti, la crisi legata alla pandemia è sopraggiunta mentre era ancora in atto la ripresa dalla recessione dovuta alla crisi economica globale del 2008 (figura 1). Nel 2009 si era registrata una contrazione del Pil del 5,4%, la riduzione più alta registrata dal 1996, seguita da un rimbalzo nell'anno successivo e da una nuova contrazione nel 2012 e nel 2013, rispettivamente del -2,7% e del -1,6%. Dal 2014 si è assistito a un triennio di ripresa, seppur lenta, culminata nel 2017 con un +1,6%, cui sono seguiti due anni di crescita positiva ma lieve. Nel 2020, lo scoppio della crisi pandemica ha causato un nuovo crollo dell'economia italiana, facendo registrare una contrazione del Pil dell'8,8%, la più profonda degli ultimi 25 anni.

Le ragioni che hanno portato a questa contrazione non sono paragonabili a quelle che hanno dato luogo alle recessioni del passato, sebbene l'andamento delle principali variabili economiche abbia registrato lo stesso segno (figura 2).

Si sono, infatti, registrati cali significativi negli investimenti (-15% nel 2009 contro -11% nel 2020), nelle importazioni (-13% nel 2009 contro -12% nel 2020) e nelle esportazioni (-18% contro -13%), legate alla natura mondiale del fenomeno e



alle restrizioni a esso associato in varie parti del pianeta. A differenza di quanto avvenuto nel periodo 2008-2009, nel 2020 si è registrata una più considerevole contrazione delle spese per consumi (-1% nel 2009 contro -8% nel 2020), dettata dall'elevato grado di incertezza e dalla debole domanda interna che ha riguardato non solo la contrazione dei consumi di beni durevoli, tipica dei periodi di recessione, ma anche dei beni non durevoli, a causa della contrazione del reddito disponibile delle famiglie. Il confronto dell'andamento trimestrale del Pil nazionale e dei contagi ha evidenziato l'esistenza di una chiara correlazione nei periodi di maggiore

rigore delle misure di contenimento volte a ridurre la diffusione del Sars-cov-2, che spiega il rimbalzo di crescita registrato nel terzo trimestre del Pil all'indomani delle riaperture di tutte le attività produttive e ricreative.

Le successive misure introdotte dal Governo, tra cui l'introduzione di un sistema di misure differenziato con restrizioni crescenti a seconda dell'andamento epidemiologico della regione, hanno portato a chiusure e aperture di alcune attività con frequenze diversificate a livello regionale dipendenti dall'andamento dei numeri dei contagi e dei ricoverati in ospedale.

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 4.2 PULVIRUS

Task 4.2 - Valutazione degli effetti della riduzione dovuta al Covid-19 dei gas climalteranti rientranti nella Convenzione quadro delle Nazioni Unite in termini di cambiamento climatico, con particolare riferimento agli impatti sul sistema italiano

Enea: Cecilia Camporeale, Martina Iorio, Sergio La Motta, Giacomo Pallante, Maurizio Sciortino, Marco Stefanoni, Maria Velardi

Ispra: Antonio Caputo, Marina Colaiezzi, Monica Pantaleoni, Emanuele Peschi

Se nella crisi del 2008-2009 la contrazione del valore aggiunto è stata dovuta principalmente alla pesante caduta dell'industria manifatturiera (-18,5%), con riduzioni più contenute nei servizi e nell'agricoltura (rispettivamente -2,2% e -1,5%), nel 2020, il calo è stato il risultato della forte contrazione registrata in tutti e tre i settori: agricoltura (-4,7%), industria (-11,4%) e servizi (-8,5%). Il confronto tra l'andamento dei consumi economici ed energetici e l'evoluzione delle misure di contenimento dell'epidemia adottate mostra l'esistenza di una chiara correlazione nei periodi di maggior rigore delle misure, particolarmente evidente durante il blocco totale (11 marzo - 3 maggio 2020), in cui il 45% delle aziende ha dovuto sospendere le proprie attività e oltre il 22% dopo una fase di blocco ha potuto riprenderle.

I consumi di energia finali nel 2020 sono diminuiti dell'8,9% rispetto all'anno precedente, a causa della contrazione dei consumi registrata in tutti i settori economici.

Guardando l'andamento delle principali fonti energetiche, il gas naturale ha fatto segnare una contrazione del 4,2% (pari a 68,5 Gm³) colpendo tutti i settori di impiego. Le contrazioni maggiori si sono registrate per i consumi dei settori industriale (-5,7%) e termoelettrico (-5,2%), seguiti dal settore civile (-2,7%). La graduale ripresa da maggio ha seguito la progressiva apertura delle attività economiche e sociali. Solo a luglio 2020, i consumi sono tornati a livelli normali, seguiti dalla consueta contrazione di agosto dovuta alle chiusure per le vacanze estive.

Anche i consumi di energia elettrica e di prodotti petroliferi hanno fatto registrare una contrazione rispettivamente del 5% e del 14% nel 2020, contrazioni legate alla minor domanda dovuta alle ripercussioni delle misure di contenimento dell'epidemia. La chiusura delle imprese e dei servizi ha comportato infatti una forte riduzione della domanda elettrica non compensata dall'aumento del consumo domestico dell'elettricità. In particolar modo, con l'inizio del lockdown totale (11 marzo - 3 maggio 2020), quale misura contenitiva per la diffusione del Covid-19, i consumi elettrici sono crollati rispettivamente del -10% a marzo, del -17% ad aprile e del -10% a maggio rispetto agli stessi mesi dell'anno precedente, per poi riprendersi nei mesi successivi, giacché le restrizioni per singola regione hanno inciso più modestamente sui consumi.

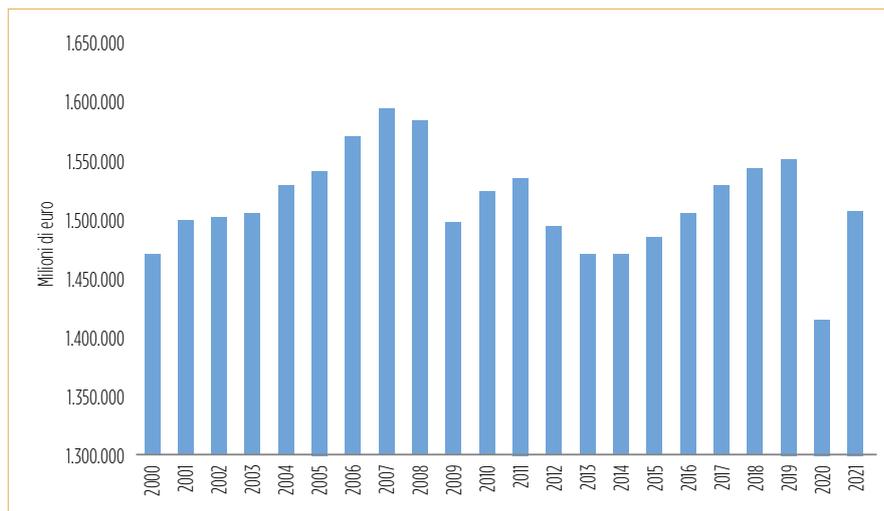


FIG. 1 ANDAMENTO VALORE AGGIUNTO
Milioni di euro, valori concatenati anno di riferimento 2015.

Fonte: elaborazione su dati Istat

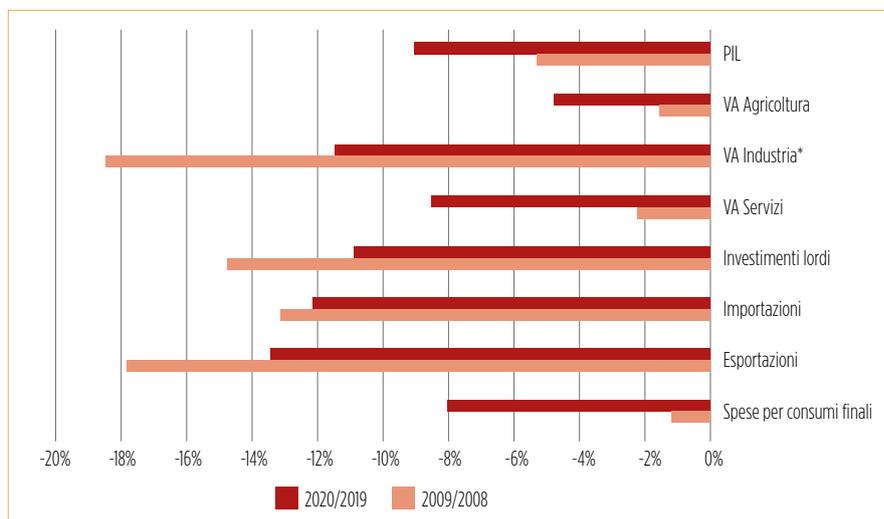


FIG. 2 VARIABILI ECONOMICHE
Andamento delle principali variabili economiche: crisi 2009/2008 e 2020/2019.

Fonte: elaborazione su dati Istat

Un approfondimento specifico sull'andamento del consumo elettrico a livello territoriale è stato condotto con riferimento alle 6 aree zonali fisiche in cui è composto il nostro sistema elettrico, per meglio cogliere quanto l'andamento della pandemia abbia inciso sull'andamento del fabbisogno elettrico a un livello quanto più geograficamente rispondente. L'analisi ha mostrato un'evidente correlazione tra il consumo elettrico e la curva epidemiologica particolarmente marcata nella prima ondata di contagi, nel periodo di lockdown marzo-maggio 2020 (figura 3). Da maggio a fine settembre 2020, i consumi elettrici sono ripresi e il numero dei contagiati è rimasto pressoché costante. Diversa è la relazione intercorrente tra consumi elettrici e seconda ondata epidemica iniziata a ottobre 2020: a Nord la variazione è stata di appena

-1,2% rispetto allo stesso mese dell'anno precedente, -0,3% per il Sud e le isole, mentre al centro i consumi elettrici sono stati pressoché stazionari. A novembre, con il peggioramento degli indici legati alla pandemia e l'attribuzione del colore rosso a diverse regioni del Nord (prima tra tutte la Lombardia) i consumi elettrici si sono contratti del -2,4%, mentre al centro la contrazione è stata del -0,8%. L'alternarsi dei colori (giallo-arancione-rosso) indica il diverso grado di restrizioni per le regioni che compongono la stessa area zonale che giustifica il recupero dei consumi in tutte le aree a partire da dicembre 2020.

Sempre legato alle restrizioni degli spostamenti a livello mondiale, nazionale e regionale è il crollo dei consumi di benzina, gasolio e carboturbo. Infatti, l'entrata in vigore del Dpcm del 9

marzo 2020 ha determinato un blocco prolungato delle attività economiche ma anche della vita sociale e della mobilità della popolazione, causando una rilevante contrazione dei consumi petroliferi, riduzione che si è estesa fino a fine agosto, mentre successivamente si è registrato un recupero dei consumi, che però sono comunque rimasti al di sotto dei livelli pre-Covid. Solo nel primo semestre 2021 tali consumi sono tornati ai livelli precedenti. Invero, se la contrazione registrata per il consumo di benzina e carboturbo è del tutto ascrivibile alle limitazioni alla mobilità passeggeri, sia entro i confini nazionali sia esteri, la contrazione del diesel è stata più modesta, dato che il trasporto di merci è continuato anche nei mesi con maggiori restrizioni, seppur verosimilmente in forme e modalità almeno parzialmente diverse da quelle abituali.

In termini di emissioni di gas serra, guardando all'andamento della serie storica nel suo insieme, gli effetti delle misure restrittive adottate nel 2020 hanno confermato il trend di riduzione già in corso per il settore industriale ed energetico. Nel 1990, infatti, la quota di gas serra emessi da questi settori era rispettivamente del 18% e del 27% del totale nazionale, mentre nel 2020 si attesta intorno al 12% e al 21%. Le emissioni del settore civile, composto dai settori residenziale e terziario, mostrano un andamento altalenante lungo tutta la serie storica, legato principalmente ai gradi giorno che determinano la domanda di riscaldamento e il conseguente consumo di combustibili. Per quanto riguarda i trasporti, le loro emissioni rappresentavano il 20% nel 1990, per poi salire al 25% nel 2019, a causa della crescente mobilità dei passeggeri e delle merci (+32% e +7% rispetto al 1990), mentre nel 2020, con le limitazioni della mobilità soprattutto passeggeri, il peso del settore sul totale delle emissioni è sceso al 22%. È questo il settore su cui si sono osservate le ricadute maggiori in termini di riduzione delle emissioni. I dati preliminari per il 2021 e il 2022 mostrano però una ripresa molto forte delle emissioni del settore, con probabili ricadute problematiche in merito al rispetto degli obblighi di riduzione delle emissioni derivanti dall'accordo di Parigi.

Cecilia Camporeale¹, Emanuele Peschi²

- 1. Enea
- 2. Ispra

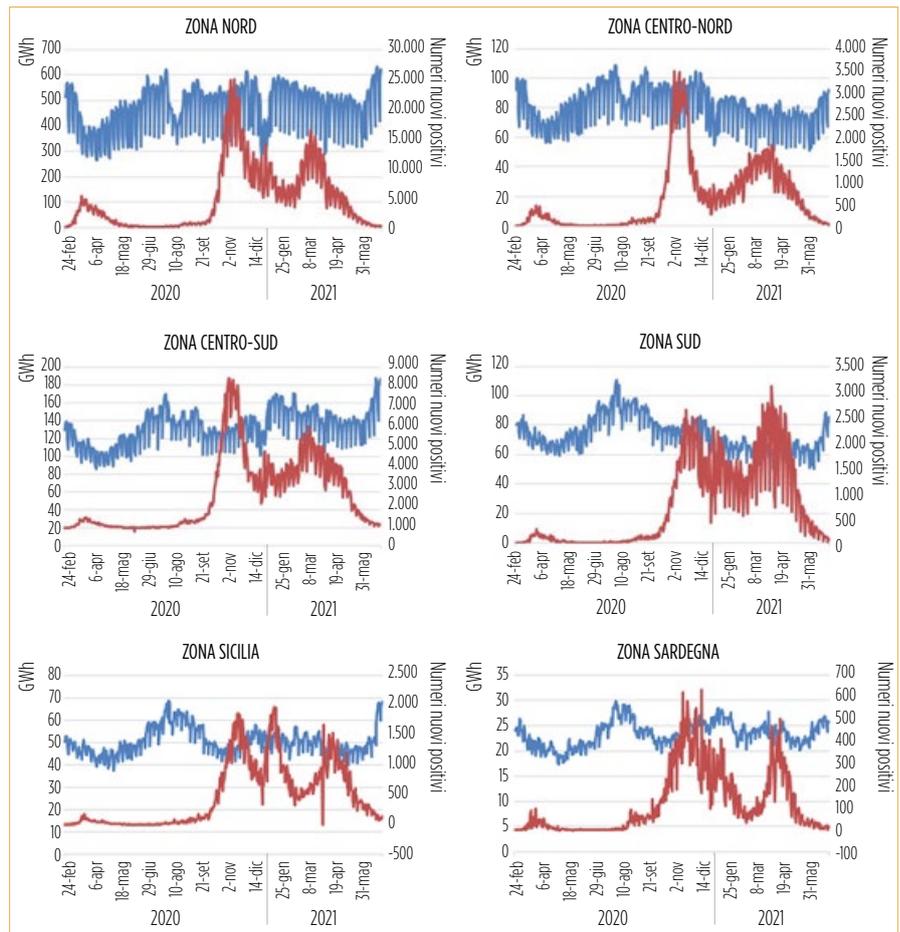


FIG. 3 CONSUMI ELETTRICI
Confronto dell'andamento dei consumi elettrici (blu) e dell'andamento dei nuovi contagi (rosso) per aree zonali.

Fonte: Elaborazione su dati Terna e Protezione civile.



QUELLO STRANO RAPPORTO FRA CORONAVIRUS E PARTICOLATO

UNO STUDIO SPERIMENTALE CON UN VIRUS MODELLO HA DIMOSTRATO CHE IL PM ATMOSFERICO È ESTREMAMENTE TOSSICO PER IL SARS-COV-2 E RIDUCE, FINO A QUASI ANNULLARE, LA SUA CAPACITÀ INFETTIVA. IL PM TUTTAVIA STIMOLA UN'ANALOGA RISPOSTA IMMUNITARIA E INFIAMMATORIA, AGENDO DA BOOSTER ALL'AZIONE DEL VIRUS.

In questi giorni di gennaio, tre anni fa, la notizia di un nuovo virus respiratorio che si stava rapidamente diffondendo in Cina aveva già iniziato a riempire le pagine dei giornali, senza intaccare la (fallace) sicurezza che era da escludere che lo stesso virus potesse abbattersi come un uragano sul nostro moderno sistema sanitario. Il virus non aveva ancora un nome, ma i sintomi della malattia virale erano talmente simili a quelli descritti nel 2002-2003 per la sindrome acuta respiratoria severa (Sars) che si passò ben presto dal più generico termine di nuovo coronavirus al nome ufficiale di Sars-cov-2. In un mese il virus era in Italia e il fatto che colpisse prevalentemente la pianura Padana, bastò per formulare l'ipotesi che il virus avesse intrecciato uno stretto rapporto con il particolato atmosferico, che abbonda in quell'area di grandi industrie, traffico sostenuto e intensi scambi commerciali, e che questo connubio fosse la reale causa di così tanti casi.

È indubbio che l'inquinamento giochi un ruolo fondamentale nell'esacerbazione delle malattie respiratorie, siano queste malattie sostenute da agenti infettivi, quali l'influenza o la tubercolosi, o patologie cronico-degenerative, quali l'asma o la broncopneumopatia cronico ostruttiva. Il comune denominatore di questa relazione è dato dalla risposta infiammatoria dell'organismo umano ad agenti estranei, biologici o chimici che siano. L'infiammazione è la conseguenza diretta della risposta difensiva messa in atto dal sistema immunitario, ed è sempre commisurata all'estensione dell'esposizione, indipendentemente dall'agente che l'ha determinata. All'aumentare dell'esposizione, per durata o concentrazione, aumenta la risposta immunitaria che sostiene l'infiammazione. Gli eventi acuti, come quelli derivati da infezioni o da picchi di inquinamento, determinano l'aumento abnorme della produzione dei mediatori

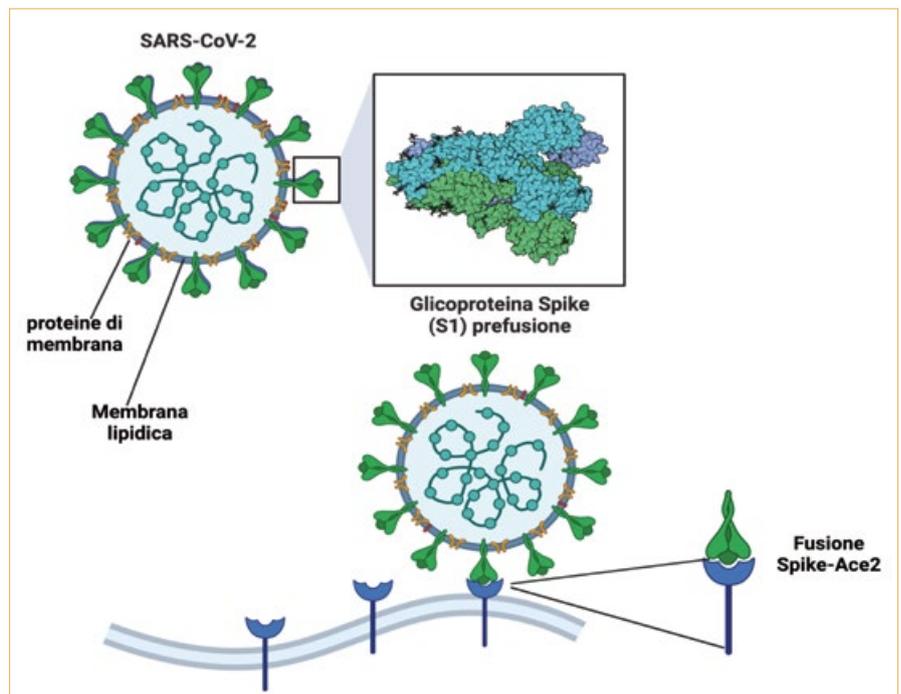


FIG. 1 STRUTTURA DEL VIRUS SARS-COV-2

Rappresentazione schematica della struttura di Sars-cov-2. Il virus presenta una membrana formata da un doppio strato di lipidi, in tutto simile alla membrana umana, e proteine di membrana, modificate dall'attacco dei glicani. La proteina spike (S1) è la glicoproteina utilizzata dal virus per agganciare le cellule umane attraverso il recettore ACE2. Le glicoproteine sono strutture flessibili e fragili che regolano il tropismo verso l'ospite e l'entrata del virus. Sars-cov-2 modifica continuamente la proteina spike, dando origine a nuove varianti in grado di evadere la risposta immunitaria.

chimici dell'infiammazione, le cosiddette citochine. L'esposizione prolungata e ripetuta a inquinanti atmosferici può invece contribuire alla cronicizzazione della risposta infiammatoria. In quei primi mesi del 2020, tuttavia, l'ipotesi che veniva avanzata da alcuni gruppi di studiosi era che il particolato servisse a veicolare il virus, facilitandone la diffusione e la capacità infettiva.

Era un'ipotesi tutta da dimostrare e, per questo motivo, uno degli obiettivi del progetto interistituzionale Pulvirus, l'obiettivo 5, fu costruito interamente sulla possibilità di identificare e comprendere quale fosse il reale rapporto tra Sars-cov-2 e PM. Sebbene la letteratura scientifica offrisse poco o nulla sul tema, che sembrava appassionare solamente i ricercatori

italiani, le poche informazioni disponibili sull'interazione di PM e virus influenzale (H1N1 o H3N4) sembrava suggerire un'azione tossica delle componenti del PM nei riguardi del virus. Sars-cov-2, al pari dei virus dell'influenza comune, è un virus incapsulato, possiede, cioè, una membrana formata da un doppio strato di lipidi, costruita a spese dell'ospite. In parole povere, Sars-cov-2, così come i suoi fratelli e cugini incapsulati, si riveste di una membrana uguale a quella delle cellule umane. Nella strategia virale, quella membrana di origine umana serve a ingannare il sistema immunitario e a facilitare la penetrazione del virus. Immerse in questa membrana ci sono le proteine, prodotte dal virus, che vengono utilizzate per legare i recettori ed entrare nella cellula ospite. Le proteine sono poi modificate da carboidrati tramite il processo di glicosilazione, per dare origine alle glicoproteine (proteine e glicani) che rappresentano strutture flessibili, ma estremamente fragili (figura 1). I glicani, infatti, possono essere distrutti da molti composti chimici, anche non particolarmente aggressivi, dal comune alcol etilico all'ipoclorito di sodio. Questa descrizione è valida per tutti i virus incapsulati, quali, ad esempio, il virus Hiv, il virus H1N1, ritenuto il virus della pandemia Spagnola, il virus dell'epatite C. Sars-cov-2 ha particolarmente curato lo sviluppo di una glicoproteina, ormai

conosciutissima con il nome di *spike*, la proteina che presenta una piccola sequenza di aminoacidi che legano con specificità ed efficienza il recettore ACE2 delle cellule umane. La *spike* è l'arma di Sars-cov-2 che, come tutte le armi dei killer navigati, viene tenuta

nascondita in una fondina, rappresentata dai glicani. Questi formano un piccolo velo di mucina, che nasconde l'arma perché sfugga alla ricognizione dello scanner immunitario. Al momento opportuno, la struttura di glicani si apre, la *spike* viene esposta e lega il recettore (figura 1).

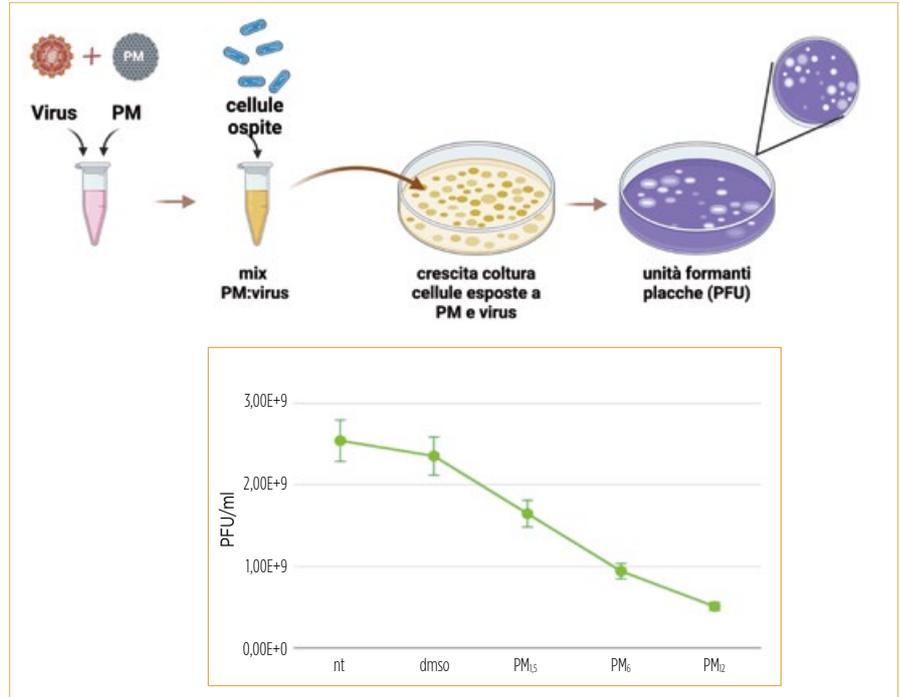


FIG. 2 INTERAZIONE TRA PM E SARS-COV-2
 Studio sperimentale per la verifica degli effetti del particolato atmosferico (PM) sulla capacità replicativa del virus. Particelle virali sono state esposte a concentrazioni crescenti di estratti organici da PM_{2.5}. La miscela di virus e PM è stata aggiunta a una coltura cellulare (cellule ospiti). Il grafico mostra come la capacità replicativa del virus, espressa come unità formanti colonie, diminuisca all'aumentare della concentrazione di estratto organico (Serra S. et al, 2023, in pubblicazione).

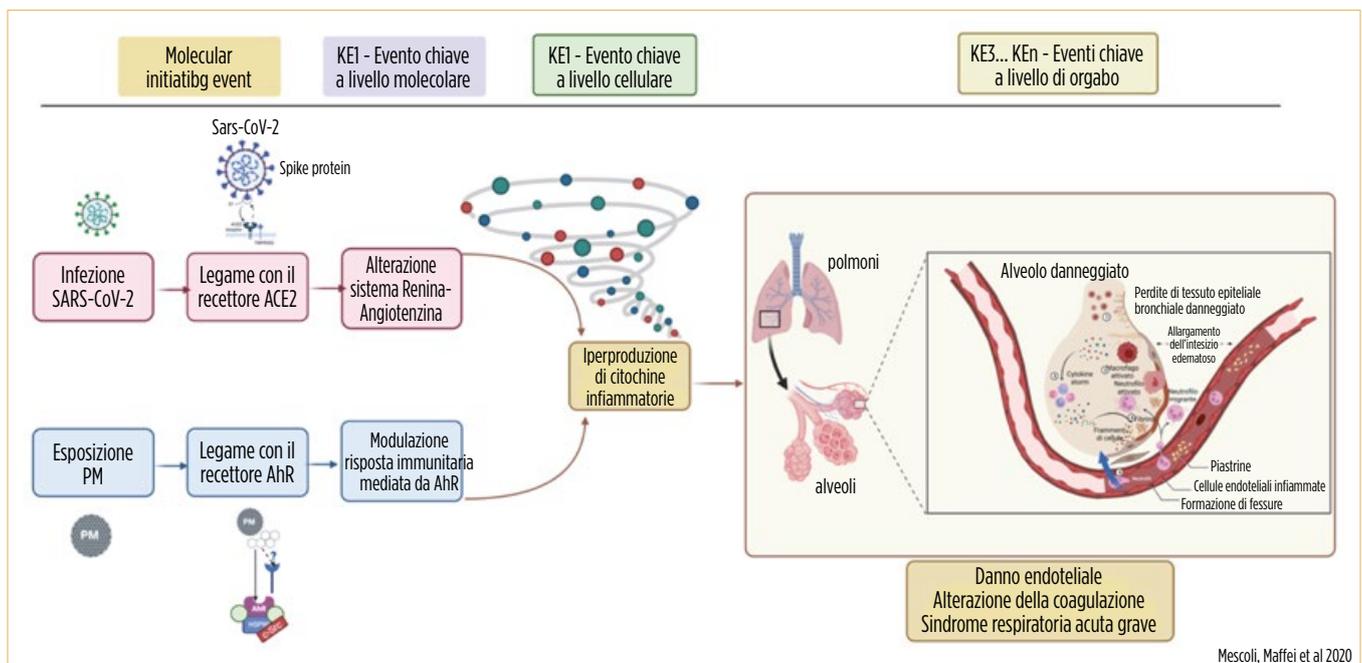


FIG. 3 EVENTI CHIAVE NELLA RISPOSTA ALL'INFEZIONE DA SARS-COV-2 E ALL'ESPOSIZIONE AL PARTICOLATO ATMOSFERICO (PM)
 Gli eventi iniziali, indipendenti e mediati da recettori diversi, convergono nella sublimazione della risposta infiammatoria dando origine al fenomeno conosciuto come tempesta di citochine (cytokine storm). Gli eventi chiave che portano al danno degli alveoli sono gli stessi e possono essere schematizzati come segue: 1) entrata dell'agente virale o chimico; 2) attivazione del sistema immunitario; 3) le citochine attivano i globuli bianchi che producono ancora più citochine, instaurando un circolo che esacerba il processo infiammatorio; 4) formazione e deposito di fibrina che concorre al danno; 5) formazioni di fessure nell'endotelio dei vasi sanguigni e aumentata permeabilità ai fluidi nella cavità dei polmoni. Con la sola infezione virale, il processo può portare a una malattia COVID-19 grave con polmonite interstiziale. L'esposizione a PM determina l'insorgenza di malattie respiratorie e patologie del polmone. Coronavirus e PM concorrono ad aumentare il danno alveolare.

L'entrata del virus è guidata dai glicani disposti lungo la proteina. La strategia infettiva del virus è, dunque, strettamente correlata all'integrità dei glicani. La fragilità delle glicoproteine diventa, così, un target per la difesa dall'infezione. Ma se le glicoproteine sono inattivate da acidi

deboli e alcol, cosa succede in presenza di molecole con maggiore tossicità, come quelle veicolate dal PM? Per rispondere a questo quesito, è stato approntato uno studio sperimentale con un virus modello, utilizzato per comprendere i meccanismi di infezione e riproduzione

di Sars-cov-2, ed è stata analizzata la capacità del virus di penetrare all'interno delle cellule e di replicarsi, in presenza di concentrazioni crescenti di estratti organici di PM, raccolto appositamente per lo scopo di questo studio. I risultati hanno chiaramente dimostrato che le componenti organiche del PM sono estremamente tossiche e riducono, fino ad annullare, la capacità infettiva del virus *figura 2*.

Il nostro studio non esclude che il PM possa trasportare il virus, o, forse, più facilmente, parti di esso, ma quella che deriva da questo connubio è una relazione tossica, in cui a soccombere è il virus. Gli studi da noi condotti hanno, tuttavia, mostrato come il virus e il PM siano in grado di stimolare la risposta immunitaria e l'infiammazione immuno-mediata attraverso gli stessi meccanismi molecolari e utilizzando gli stessi bersagli molecolari e cellulari (*figura 3*).

PM e virus penetrano per vie diverse, ma convergono sugli stessi sentieri all'interno delle cellule. Questa interazione esacerba la gravità della malattia di Covid-19, per il contributo del PM a quella tempesta di citochine che caratterizza un'abnorme risposta infiammatoria e altera la permeabilità e l'integrità dell'endotelio, evento che dà plausibilità biologica agli effetti avversi sul sistema cardiovascolare, operati sia dal virus sia dal PM (*figura 4*). I risultati ottenuti all'interno del progetto confermano che il PM ha un ruolo di *booster*, di amplificatore, negli effetti derivanti da infezioni di virus respiratori e mostrano quali sono i meccanismi attraverso cui l'amplificazione degli effetti si realizza.

Questa interazione, tuttavia, non è una cooperazione diretta tra agenti chimici e agente virale, ma un'azione portata avanti, indipendentemente, sugli stessi bersagli cellulari e che si realizza dopo che il virus e il PM sono penetrati nelle cellule polmonari, in maniera indipendente e in tempi diversi.

I risultati ottenuti dimostrano che, sebbene le componenti strutturali del PM e le glicoproteine del virus si sentano spinte le une verso le altre, l'abbraccio finale è un abbraccio mortale. La conseguenza di un'attrazione fatale.

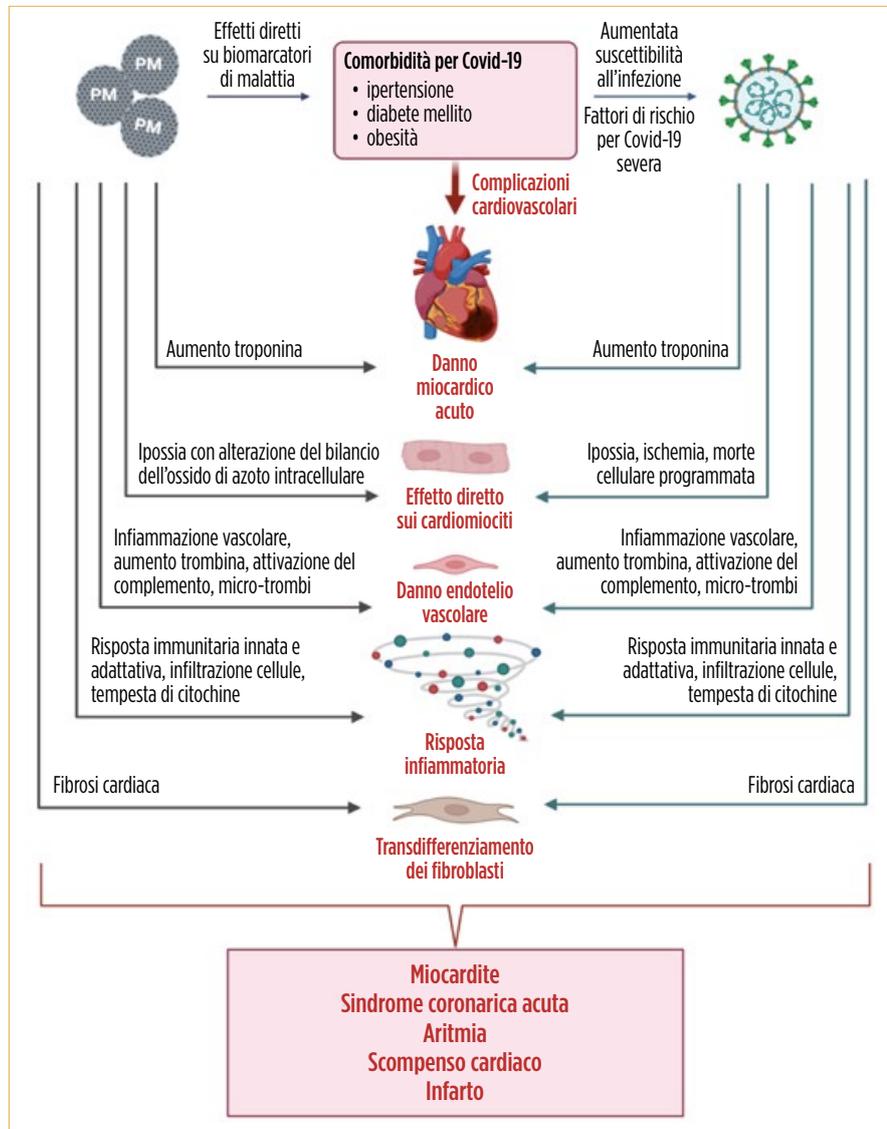


FIG. 4 PM, SARS-COV-2 E DANNO CARDIOVASCOLARE

Meccanismi condivisi dal PM e dal virus Sars-cov-2 nell'eziopatogenesi del danno cardiovascolare. Il PM ha un ruolo attivo nell'indurre modulazione dei geni coinvolti nell'insorgenza delle malattie dismetaboliche, come l'obesità, del diabete e dell'ipertensione, strettamente correlate all'obesità. Tutte queste condizioni possono essere responsabili di aumentata suscettibilità all'infezione di Sars-cov-2 e della malattia Covid-19 inaggravante. Obesità, diabete e ipertensione sono fattori di rischio per la malattia cardiovascolare. Tuttavia, sia il PM sia il nuovo coronavirus possono agire attraverso altri meccanismi coinvolti nell'insorgenza di danno cardiovascolare. La possibilità di condividere gli stessi meccanismi da parte di PM e Sars-cov-2 potrebbe facilitare o accelerare il processo di insorgenza di una patologia cardiovascolare anche in soggetti con un rischio basso.

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 5 PULVIRUS

Coordinamento: Annamaria Colacci (Arpa Emilia-Romagna)

Ob. 5.1 Responsabile: Caterina Arcangeli (Enea)

Ob. 5.2 Responsabili: Stefania Serra, Monica Vaccari (Arpa ER)

Ob. 5.3 Responsabili: Maria Grazia Mascolo, Gelsomina Pillo (Arpa ER)

Ob. 5.4 Responsabili: Stefano Marchesi, Stefano Zauli Sajani (Arpa ER)

Gdl obiettivo: Annamaria Colacci (Arpa ER), Stefania Marcheggiani (Iss), Caterina Arcangeli (Enea), Simonetta Fuser (Arpav)

Annamaria Colacci

Arpa Emilia-Romagna

Gli studi sperimentali sono stati condotti da Maria Grazia Mascolo, Gelsomina Pillo, Stefania Serra, Monica Vaccari (Struttura tematica Ambiente, prevenzione e salute di Arpa-Emilia Romagna), Federico Aldrovandi, Giangabriele Maffei e Ada Mescoli (Alma Institute on Healthy Planet, Università di Bologna)

INTERAZIONI TRA PARTICOLATO E VIRUS SARS-COV-2

L'APPROCCIO IN SILICO DEI RICERCATORI ENEA, BASATO SU SIMULAZIONI NUMERICHE, HA MOSTRATO COME VIRUS E PARTICOLATO TENDANO A INTERAGIRE. SERVONO ULTERIORI STUDI PER CAPIRE SE IL LORO LEGAME RIMANE STABILE DURANTE I PROCESSI DI DISPERSIONE E TRASFORMAZIONE DEL PM IN ATMOSFERA E SE IL VIRUS RIMANE VITALE E INFETTIVO.

La possibilità che il particolato atmosferico (PM) possa agire da vettore nella trasmissione aerodispersa del virus Sars-cov-2 è ancora oggi una questione controversa e oggetto di dibattito (Anand et al., 2021). Per poter funzionare da vettore il PM deve possedere alcune caratteristiche specifiche. In particolare, deve essere in grado di "legare" il virus instaurando una serie di interazioni più o meno specifiche con le proteine virali di superficie. Allo stesso tempo, la stabilità del legame tra il PM e il virus deve essere mantenuta durante tutti i processi di dispersione e trasformazione in atmosfera del particolato, senza che la conformazione molecolare delle proteine virali, e

l'integrità del virus stesso, vengano compromessi. Inoltre in qualità di vettore, il PM deve anche essere in grado di rilasciare il virus quando quest'ultimo entra in contatto con la cellula ospite a livello dell'apparato respiratorio, per consentirne il legame specifico con il bersaglio molecolare, l'enzima 2 convertitore dell'angiotensina (ACE2). Nell'ambito del progetto Pulvirus, per verificare la presenza di alcune delle caratteristiche sopraelencate, è stato allestito un esperimento *in silico*, basato sull'uso delle simulazioni numeriche di dinamica molecolare classica, sfruttando il calcolo ad alte prestazioni (Hpc) fornito dall'infrastruttura Enea-Cresco 6 (Iannone et al. 2019).

Cosa sono le simulazioni di dinamica molecolare classica?

Le simulazioni di dinamica molecolare classica sono in grado di prevedere – sulla base di un modello generale della fisica che governa le interazioni inter atomiche – l'evoluzione temporale delle posizioni di ogni atomo in un sistema, mediante l'integrazione delle loro equazioni di moto (Hollingsworth, 2018). Il risultato di una simulazione è una traiettoria delle configurazioni molecolari, in funzione del tempo, del sistema simulato. Pertanto, mediante le simulazioni è possibile ottenere una mappa dinamica delle interazioni di un complesso molecolare,

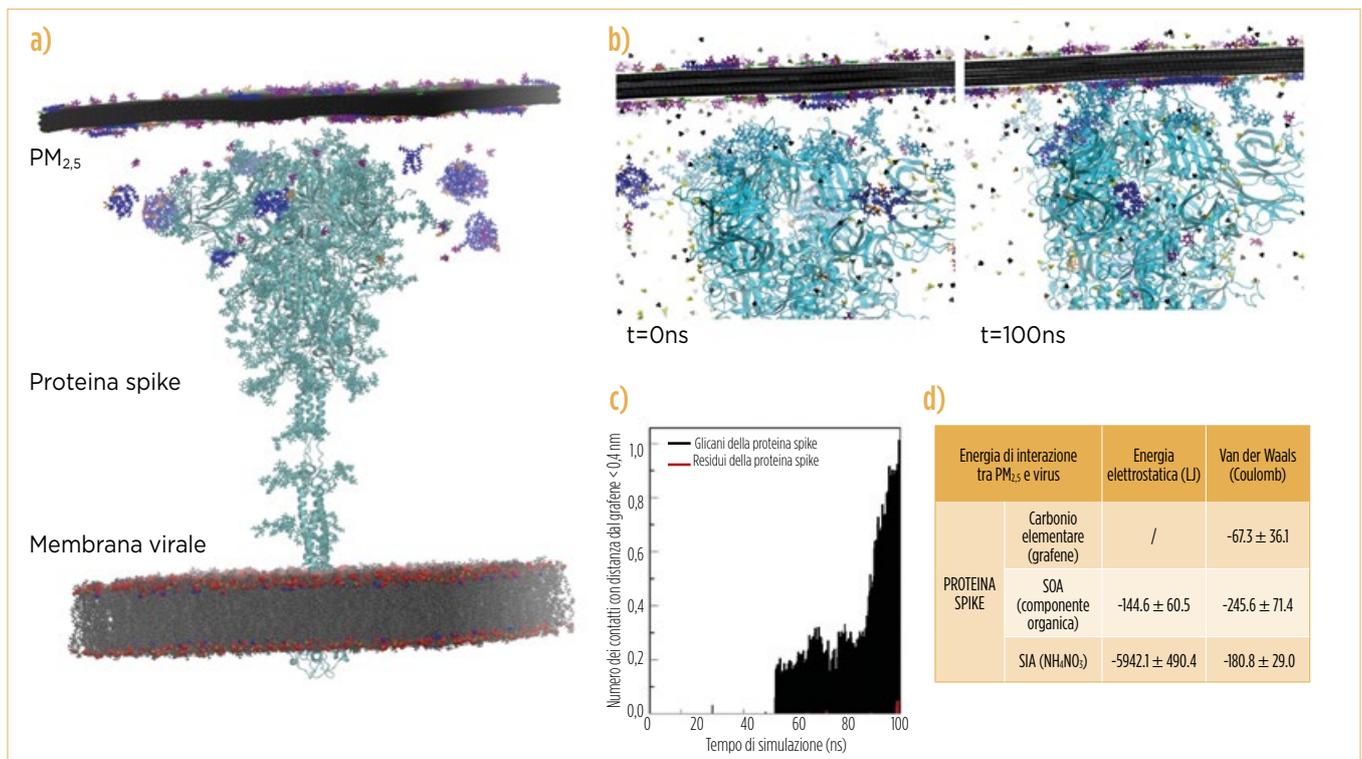


FIG. 1 MODELLO STRUTTURALE DEL COMPLESSO PM/VIRUS

a) Modello dell'interfaccia PM_{2.5}/Sars-cov-2.

b) Istantanee estratte dalla traiettoria di simulazione della durata totale di 100 ns. Nelle immagini sono mostrati il foglietto di grafene (grigio) che mima il nucleo carbonioso del PM, le molecole di benzo[a]pirene (rosso), acido palmitico (blu), acido ftalico (arancio), levoglucosano (porpora), acido ossalico (verde), NH₄NO₃ (nero e giallo), la proteina spike (ciano) e i glicani (ciano chiaro).

c) Numero dei contatti a una distanza inferiore di 0,4 nm dal foglietto di grafene a carico dei glicani (istogramma nero) e dei residui (istogramma rosso) della proteina spike in funzione del tempo di simulazione

d) Energie di interazione medie calcolate negli ultimi 50 ns di simulazione.

ad esempio tra il PM (vettore) e il virus (trasportato), con una risoluzione spaziale e temporale difficilmente accessibile alle tecniche sperimentali.

La costruzione del modello strutturale del complesso PM/virus

All'interno del progetto Pulvirus, per identificare le potenziali interazioni molecolari e quantificare la stabilità del legame tra il particolato e Sars-cov-2, è stato realizzato un complesso che

rappresenta una possibile interfaccia PM/virus (figura 1a). Per ridurre il costo computazionale, la strategia adottata è consistita nella realizzazione di modelli semplificati di particolato e di Sars-cov-2. Per rappresentare il virus, è stato realizzato un frammento della membrana lipidica dell'involucro virale nel quale è stato inserito il modello strutturale della glicoproteina di superficie spike (Woo et al., 2020). La costruzione del modello strutturale del PM ha richiesto un enorme sforzo di modellazione a causa delle scarsissime informazioni disponibili riguardo i modelli di struttura

di aerosol secondario. Un modello semplificato di una porzione di PM_{2,5} è stato in particolare realizzato a partire da una tipica composizione chimica registrata in campioni (filtri) raccolti dal Laboratorio di inquinamento atmosferico dell'Enea durante la stagione invernale 2021 nell'area padana. In base ai dati raccolti, il PM_{2,5} viene a essere costituito da oltre il 50% da nitrato di ammonio, che nel modello rappresenta la frazione di aerosol secondario inorganico (Sia), e da una miscela eterogenea di composti organici rappresentativi delle classi di molecole (idrocarburi aromatici

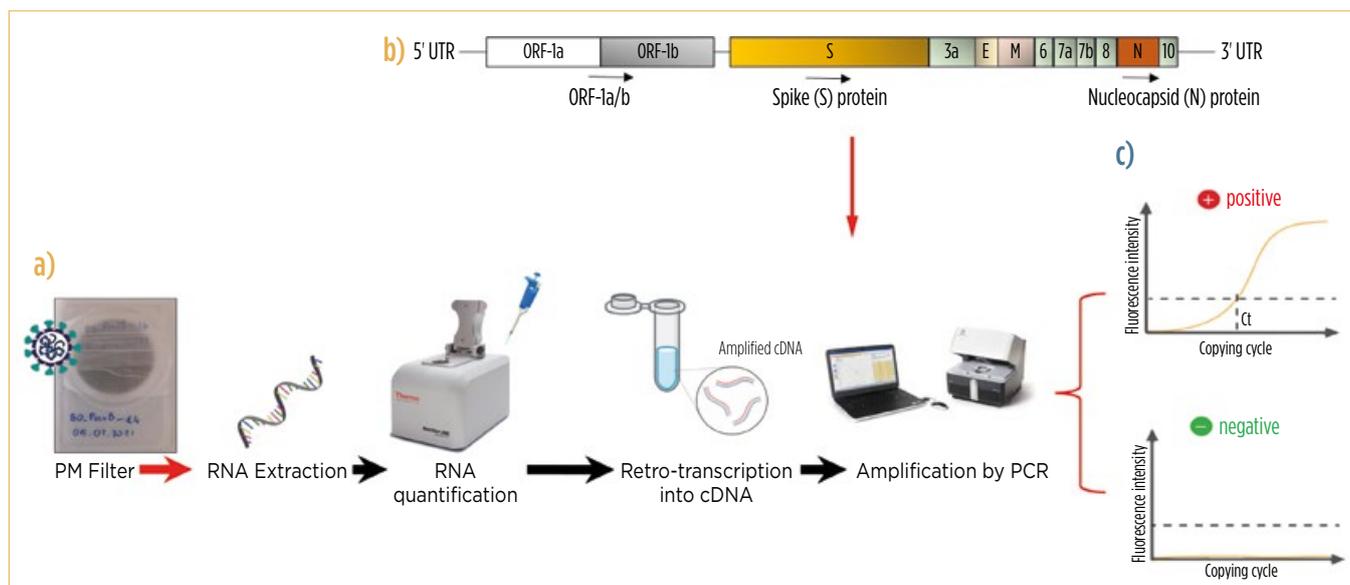


FIG. 2 PRESENZA DEL GENOMA VIRALE SUI FILTRI PER IL CAMPIONAMENTO DEL PM

- a) Organizzazione del genoma di Sars-cov-2.
- b) Workflow dell'approccio sperimentale.
- c) Esempio di curve di amplificazioni positive e negative di un gene.



poli-ciclici, carboidrati, acidi alcaloidi, acidi aromatici e acidi alifatici) che costituiscono la frazione di aerosol secondario organico (Soa). Il nucleo di carbonio elementare di un tipico PM_{2,5} è stato invece semplificato costruendo un foglietto di grafene a tre strati. Questo modello è stato sottoposto a simulazione di dinamica molecolare per permettere ai composti organici e inorganici di stratificarsi sul foglietto di grafene, mimando la disposizione delle molecole attorno al nucleo di carbonio del PM_{2,5}.

La simulazione dell'interazione tra PM_{2,5} e la proteina spike

Il complesso PM_{2,5}-spike è stato successivamente sottoposto a simulazione numerica per seguire la dinamica del potenziale legame tra particolato e virus e quantificare la loro stabilità. L'analisi della traiettoria di simulazione dell'interazione tra il modello rappresentativo del virus e il frammento di particolato ha dimostrato che la proteina spike, durante 100 nanosecondi di simulazione, tende ad avvicinarsi al foglietto di grafene (figura 1b) e che un ruolo importante per il legame con il nucleo carbonioso del PM viene giocato dagli zuccheri (glicani) che rivestono la proteina spike. Come mostrato nella figura 1c sono proprio i glicani della proteina, dopo circa 50 ns di simulazione, a instaurare numerosi contatti ravvicinati (<0,4 nm) con gli atomi del foglietto di grafene. La stabilità del legame è stata stimata mediante l'analisi delle energie di interazione, ovvero delle forze elettrostatiche e di van der Waals. I risultati di questa analisi sono riassunti nella figura 1d e mostrano che sono soprattutto i componenti inorganici del particolato a svolgere un ruolo di "legante" fra il virus e la parte carboniosa del PM.

Presenza del genoma virale sui filtri per il campionamento del PM

Accanto all'approccio *in silico* sono state effettuate anche delle analisi atte a verificare l'eventuale presenza del genoma a Rna di Sars-cov-2 su campioni di PM_{2,5} raccolti nella città di Bologna tra il 19 gennaio e il 6 febbraio 2021. Dai filtri di fibra di quarzo usati per il campionamento del PM_{2,5} è stato estratto l'Rna genomico virale, successivamente purificato, applicando un protocollo specifico, ottimizzato

in Enea, per aumentare resa, stabilità e integrità dell'Rna genomico¹. Dopo la quantificazione spettrofotometrica, l'Rna è stato retro-trascritto e analizzato mediante quantitative real-time Pcr², utilizzando sonde specifiche³ per tre geni virali – ORF-1a/b, proteina spike (S) e proteina del nucleocapside (N) – di Sars-cov-2 (figura 2a). Mediante qPCR, la sequenza ORF-1a/b è stata individuata in 6 campioni, la N in 3 e la S solamente in 1 filtro su 15 totali. In particolare, nessuna delle tre sequenze è stata rilevata contemporaneamente su un unico filtro. Il workflow dell'approccio sperimentale condotto è riportato nella figura 2b. Il grafico di amplificazione dei campioni viene riportato nella figura 2c dove sono stati considerati positivi (presenza del genoma virale) tutti i valori di CT compresi nell'intervallo tra 36 e 40 cicli di amplificazione.

Conclusioni

I principali risultati di questo studio risiedono nel raggiungimento, per la prima volta, di un modello strutturale di PM fine e di una prima caratterizzazione dell'interfaccia PM/virus, attraverso simulazioni di dinamica molecolare classica⁴. Inoltre, l'approccio integrato,

basato sulla caratterizzazione della presenza del genoma di Sars-cov-2 su filtri di quarzo PM_{2,5} raccolti nell'area di Bologna nell'inverno 2021, combinata con gli esperimenti *in silico* dell'interazione tra la superficie del virus e un modello di particolato fine, ha dimostrato che, sebbene il ruolo del PM come vettore del virus non sia da escludere, questi esperimenti non sono in grado di concludere se il legame rimane stabile per tutta la durata dei processi di dispersione e trasformazione del PM in atmosfera e se lo stesso virus rimane vitale e infettivo. Ulteriori studi sono necessari per chiarire questi aspetti.

A cura del gruppo di lavoro per la realizzazione dell'obiettivo 5.1 del progetto Pulviris

NOTE

¹ L'Rna genomico virale è stato estratto mediante Trizol® (Thermo Fisher) e purificato su Quick-Rna Miniprep Kit (Zymo Research).

² qPCR: Eco-Illumina.

³ Sonda TaqMan 2019-nCoV Assay Kit v1.

⁴ I risultati di questo lavoro sono sottomessi alla rivista scientifica *peer-reviewed* "The Science of the Total Environment".

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 5.1 PULVIRIS

Caterina Arcangeli¹, Alice Romeo², Roberto Pellegrini^{1,2}, Maurizio Gualtieri³, Barbara Benassi¹, Massimo Santoro¹, Federico Iacovelli², Milena Stracquadanio³, Mattia Falconi², Carmela Marino¹, Gabriele Zanini³

1. Divisione Tecnologie e metodologie per la salvaguardia della salute, Enea, Roma
2. Dipartimento di Biologia, Università di Tor Vergata, Roma
3. Divisione Modelli e tecnologie per la riduzione degli impatti antropici e dei rischi naturali, Enea, Bologna

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Anand U., Cabrerós C., Mal, J., Ballesteros F., Sillanpää M., Tripathi V., Bontempi E., 2021, "Novel coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic: From transmission to control with an interdisciplinary vision", *Environmental Research*, 197, 111126, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111126>.

Iannone F., Ambrosino F., Bracco G., De Rosa M., Funel A., Guarnieri G., Migliori S., Palombi F., Ponti G., Santomauro G., Procacci P., 2019, "Cresco Enea HPC clusters: a working example of a multifabric GPFS Spectrum Scale layout", *International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS)*. Presented at the 2019 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), pp. 1051-1052, <https://doi.org/10.1109/HPCS48598.2019.9188135>.

Hollingsworth S.A., Dror R.O., 2018, "Molecular dynamics simulation for all", *Neuron*, 99, 1129-1143, <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2018.08.011>.

Woo H., Park S.-J., Choi Y.K., Park T., Tanveer M., Cao Y., Kern N.R., Lee J., Yeom M.S., Croll T.I., Seok C., Im W., 2020, "Developing a fully glycosylated full-length Sars-cov-2 spike protein model in a viral membrane", *The Journal of Physical Chemistry B*, 124, 7128-7137, <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.0c04553>.

PROTOCOLLI OPERATIVI E SISTEMI DI ALLERTA PRECOCE

IL GRUPPO DI LAVORO DELL'OBIETTIVO 6 DEL PROGETTO PULVIRUS HA COORDINATO ED ELABORATO RACCOMANDAZIONI PER IL TRATTAMENTO DI CAMPIONI DI PARTICOLATO E VALUTAZIONI PRELIMINARI ALLO SVILUPPO DI UN MODELLO PREDITTIVO DI ALLERTA PRECOCE CONSEGUENTE ALLA PRESENZA DI TRACCE DI COVID-19 SUL PARTICOLATO ATMOSFERICO.

Il contesto emergenziale dovuto all'aggressiva e tragica situazione pandemica ha spinto la comunità scientifica a individuare bisogni e strumenti provenienti da altri settori, come quello ambientale, atti a supportare e rafforzare le misure di prevenzione adottate dal settore sanitario per contrastare la diffusione del virus Sars-cov-2. Proprio in questo contesto e filosofia, nella primavera del 2020, è nato il progetto Pulviris, dall'alleanza scientifica fra l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (Enea), l'Istituto superiore di sanità (Iss) e il Sistema nazionale per la protezione ambientale (Snpa) composto da Ispra e dalle Agenzie regionali per la protezione ambientale (Arpa) sottoscritta dai tre presidenti. L'Iss, nonostante fosse in prima linea a supporto del Ministero della Salute nella gestione della pandemia e delle misure di prevenzione, ha sposato l'iniziativa. I ricercatori dell'Iss, hanno messo a comune, nella comunità scientifica Pulviris, le proprie competenze che, congiuntamente ai contributi di tutti i ricercatori degli altri enti, hanno condotto alla stesura delle attività del progetto. Lo scopo principale era di dimostrare con evidenze scientifiche se il particolato atmosferico potesse aver contribuito alla diffusione di Sars-cov-2, ed è stato articolato in 6 obiettivi. L'Iss ha avuto un ruolo attivo nella stesura delle attività, in particolare dell'obiettivo 6, e contribuito per la parte di competenza all'obiettivo 5 nella definizione della struttura di governo del progetto, ha inoltre partecipato alle attività degli obiettivi 1, 2 e 3 e a tutte le attività di disseminazione e comunicazione. Essendo il progetto nato in piena pandemia, come ricercatori coinvolti nella fase sperimentale abbiamo congiuntamente deciso di non lavorare con il virus al fine di non gravare sul consumo di reagenti di biologia molecolare necessari per la

FIG. 1
RISULTATI
DELL'OBIETTIVO 6

I documenti prodotti dall'obiettivo 6 del progetto Pulviris.



caratterizzazione dei tamponi molecolari e per il sequenziamento delle varianti. L'Istituto superiore di sanità ha coordinato le attività dell'obiettivo 6: raccomandazioni per il trattamento di campioni di particolato e valutazioni preliminari allo sviluppo di un modello predittivo di allerta precoce conseguente alla presenza di tracce di Covid-19 sul particolato atmosferico e formazione. La modalità di lavoro è stata quella di condivisione con gli esperti coinvolti attraverso webinar e scambi via email dei documenti di avanzamento lavoro e aggiornamento delle attività condotte nell'ambito del Comitato tecnico scientifico. L'indicazione della presenza di virus

o acidi nucleici sui campioni di aria, inclusa l'eventuale presenza di altri patogeni, è fondamentale per indirizzare un'azione preventiva precoce per proteggere la salute umana. L'obiettivo principale era contribuire a costruire la base di monitoraggio della sorveglianza ambientale quando si verificano eventi estremi, atta a implementare le misure di prevenzione per la salute umana in un'ottica *One Health* e *Planetary Health* per la prevenzione della pandemia attraverso la realizzazione delle seguenti attività:
- A1) realizzazione di protocolli operativi per raccolta, trasporto e conservazione dei campioni di aria ove potenzialmente presente materiale biologico

- A2) studio di fattibilità e sviluppo di un sistema di allerta precoce per la previsione della circolazione virale nell'aria
- A3) formazione del personale tecnico per il trasferimento dei risultati.

A1) Il campionamento è una procedura estremamente complessa e delicata che condiziona le operazioni successive e di conseguenza può compromettere la corretta interpretazione (attendibilità/affidabilità) dei risultati analitici. A livello nazionale e internazionale, protocolli e norme di riferimento per il campionamento delle diverse matrici ambientali, alimentari e cliniche sono ben definiti per settori e per tipo di analisi a cui devono essere sottoposte: chimiche, biologiche, fisiche. Al contrario, il contesto emergenziale ha evidenziato l'urgente necessità di sviluppare e ottimizzare metodi per il campionamento e gestione dei campioni di aria per la determinazione del particolato atmosferico (PM) e di agenti infettivi (Ai) quali virus a trasmissione aerea atti a rafforzare la gestione delle infezioni. Si è partiti da quelli standard utilizzati a livello nazionale per il campionamento dell'aria, implementati con le preclusioni da attuare per il materiale biologico, al fine di garantire la qualità dei risultati. Sono stati elaborati due protocolli operativi di raccolta, trasporto e conservazione dei campioni ambientali, sia negli ambienti *outdoor* sia in quelli *indoor*, da utilizzare nei monitoraggi di emergenza/indagine. I due protocolli contengono le indicazioni necessarie per la preservazione e quindi per la determinazione dell'eventuale materiale genetico o agente infettivo da ricercare. Il primo protocollo è stato realizzato per la prima campagna di campionamento eseguita dall'obiettivo 3 a Bologna nel 2020.

A2) I Sistemi di allerta precoce (Sap), sono utilizzati per identificare, attraverso attività di monitoraggio e sorveglianza, la presenza di stati di pericolosità (agenti chimici o infettivi) prima che si rendano visibili i loro effetti su una comunità. Di conseguenza sono propedeutici all'analisi di rischio e allo sviluppo di sistemi predittivi (scenari) e quindi strumenti di comunicazione e di informazione sui rischi imminenti alle quali una popolazione può essere esposta prima del verificarsi dell'evento. Sono utilizzati per la definizione degli scenari quali innalzamento delle temperature, inquinanti atmosferici, fioritura di pollini, ondate calore o esposizione ai raggi Uv

svolgendo un ruolo nella prevenzione della sanità pubblica.

La proposta Pulvirus-Sap realizzata si è basata sulle osservazioni ambientali, integrate con quelle di ricerca prodotti nell'ambito del progetto. Lo schema utilizzato della proposta è quello introdotto dalla Conferenza internazionale di allerta precoce, basato su quattro elementi: conoscenza del rischio; monitoraggio e sistema di allarme; divulgazione e comunicazione; capacità di risposta (United Nations, 2003). Tuttavia siamo in fase di verifica sull'efficacia poiché maggiori evidenze scientifiche sono necessarie circa il tipo di interazione, *carrier*, tra particolato e virus. Si può concludere che la fattibilità di un Pulvirus-Sap è plausibile a valle di due assunti:

- l'identificazione precoce dell'agente infettivo, in questo caso, Sars-cov-2, che nel caso ambientale si verifica a valle dell'aumento dell'incidenza dei malati che siano essi umani o animali. Il tipo

d'interazione che l'Ai ha in questo caso con il PM.

Il Sap sviluppato potrebbe essere utile alla definizione della probabilità di insorgenza (*hotspot*) o re/insorgenza dell'infezione in una determinata area anche riferendosi ad altri agenti infettivi.

A3) La formazione del personale tecnico potrà essere avviata nel proseguo del progetto come intenzione manifestata dai tre presidenti degli enti durante il convegno finale del 24 ottobre 2022. I protocolli di campionamento e la struttura del Pulvirus-Sap sono disponibili nella versione integrale sul sito www.pulvirus.it.

Stefania Marcheggiani, Camilla Puccinelli, Filippo Chiudioni, Anna Maria D'Angelo, Maria Eleonora Soggiu, Marco Inglessis, Gaetano Settimo, Laura Mancini

Istituto superiore di sanità

GRUPPO DI LAVORO OBIETTIVO 6 PULVIRUS

Coordinatrice: Stefania Marcheggiani (Istituto superiore di sanità)
 Istituto superiore di sanità: Laura Mancini, Camilla Puccinelli, Filippo Chiudioni, Anna Maria D'Angelo, Maria Eleonora Soggiu, Gaetano Settimo, Marco Inglessis
 Enea: Francesca Pacchierotti
 Ispra: Francesca De Maio
 Arpa Emilia-Romagna: Annamaria Colacci
 Arpa Veneto: Claudia Visentin, Simonetta Fuser
 Arpa Lombardia: Guido Lanzani, Cristina Colombi, Umberto Dal Santo, Vorne Luigi Gianelle
 Arpa Lazio: Stefano Listrani, Manuela Riva, Donatella Occhiutto, Fabio Vantaggio

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Zanini G., Marcheggiani S., Mancini L., Pini A., 2020, "Pulvirus, per capire i legami tra Covid-19 e inquinamento", *Ecoscienza*, 3/2020, 26-27.
 United Nations, 2003, *Early warning systems*, UN-Spider Portale della conoscenza dell'Ufficio per gli affari dello spazio extraatmosferico, disponibile on line www.un-spider.org/risks-and-disasters/early-warning-systems (ultimo accesso 26/01/2023).

