

Leggi «Speciale
Coronavirus»,
l'approfondimento
sempre aggiornato
su Aula di Scienze

La chimica ai tempi della pandemia

I VIRUS: NON SOLO BIOLOGIA

COVID-19, o *CO*rona*V*irus-*i*nduced *D*isease 2019, è il nome che definisce la sindrome provocata dall'infezione di SARS-CoV-2, un particolare tipo di coronavirus. Dall'inizio della pandemia, dichiarata dall'Organizzazione Mondiale della Sanità a marzo 2020, queste sigle riempiono i bollettini medici quotidiani, così come gli studi di virologia e di epidemiologia.

Tuttavia, la scienza moderna non è settoriale: competenze diverse sono fondamentali in ogni gruppo di ricerca e la collaborazione è alla base della crescita della conoscenza. SARS-CoV-2 e la pandemia che ha provocato, quindi, sono oggetto di studio e di interesse non solo della biologia e della medicina, ma di tutti i settori della conoscenza come la fisica, l'ingegneria, la filosofia o la sociologia. E, ovviamente, della chimica.

Una foto di SARS-CoV-2
al microscopio elettronico.

Science Photo Library/CDC

I virus come molecole

I virus si dividono in due classi, i virus a DNA e quelli a RNA. In entrambi i casi, questi filamenti di acidi nucleici definiscono il genoma del virus e sono protetti da un involucro di proteine, detto *capside*. Grazie a specifiche proteine sulla sua superficie, le *glicoproteine*, il capsid regola l'interazione del virus con le cellule con cui viene a contatto. I virus, infatti, hanno bisogno di penetrare in una cellula ospite per riprodursi. Questo processo, detto *infezione*, può essere del tutto innocuo oppure avere effetti drammatici sulla vita della cellula, determinandone l'alterazione e persino la morte.

Per via dei loro effetti dannosi sugli organismi, nel linguaggio comune i virus sono spesso associati a batteri e parassiti. Tuttavia, a differenza di questi patogeni, i virus non si considerano esseri viventi veri e propri, perché non sono in grado di replicare

il proprio patrimonio genetico senza sfruttare un ospite cellulare.

Da un punto di vista chimico, quindi, possiamo guardare ai virus più come a una molecola, o meglio a un sistema organizzato e complesso di molecole, che a un essere vivente. Questo ci permette di trattarlo come un qualsiasi agente tossico che deve essere individuato, analizzato ed eliminato.

Vediamo allora in che modo la chimica può contribuire allo studio di SARS-CoV-2 e alla comprensione della pandemia che ne è derivata.

Come si vedono i virus?

I virus hanno dimensioni comprese tra 20 nm e 200 nm, cioè sono centinaia di volte più piccoli di un batterio (e migliaia di volte più piccoli di una cellula eucariote).

Per «vedere» i virus, quindi, non basta affidarsi ai microscopi ottici, né tantomeno ai nostri occhi, ma si deve ricorrere a uno strumento più sofisticato che in chimica si usa per osservare nanoparticelle o macromolecole: il **microscopio elettronico** (figura 1).

Questo strumento è stato inventato negli anni '30 del 1900 da due scienziati tedeschi, Ernst Ruska (1906-1988) e Max Knoll (1897-1969), il primo dei quali fu insignito del Premio Nobel per la fisica nel 1936 per questa scoperta. Nel microscopio elettronico, un fascio di elettroni emessi da un *cannone elettronico* è condotto sul campione in analisi da una serie di lenti elettromagnetiche. Dopo aver interagito con il campione, una parte degli elettroni viene trasmessa, cioè continua il proprio cammino fino a un detector che ne rileva la presenza (da qui il nome della tecnologia: *microscopio elettronico a trasmissione*, TEM dall'acronimo inglese). La quantità e la direzione degli elettroni trasmessi, che dipendono dalla natura della superficie con cui il fascio ha interagito, permettono di ricostruire l'immagine del campione.

Questo meccanismo di funzionamento è simile a quello del microscopio ottico, in cui il campione è illuminato con un fascio di luce visibile che viene in parte assorbita e in parte trasmessa o riflessa verso l'occhio umano (oppure verso una telecamera). Tut-

Dal punto di vista chimico i virus somigliano più a una molecola che a un essere vivente.

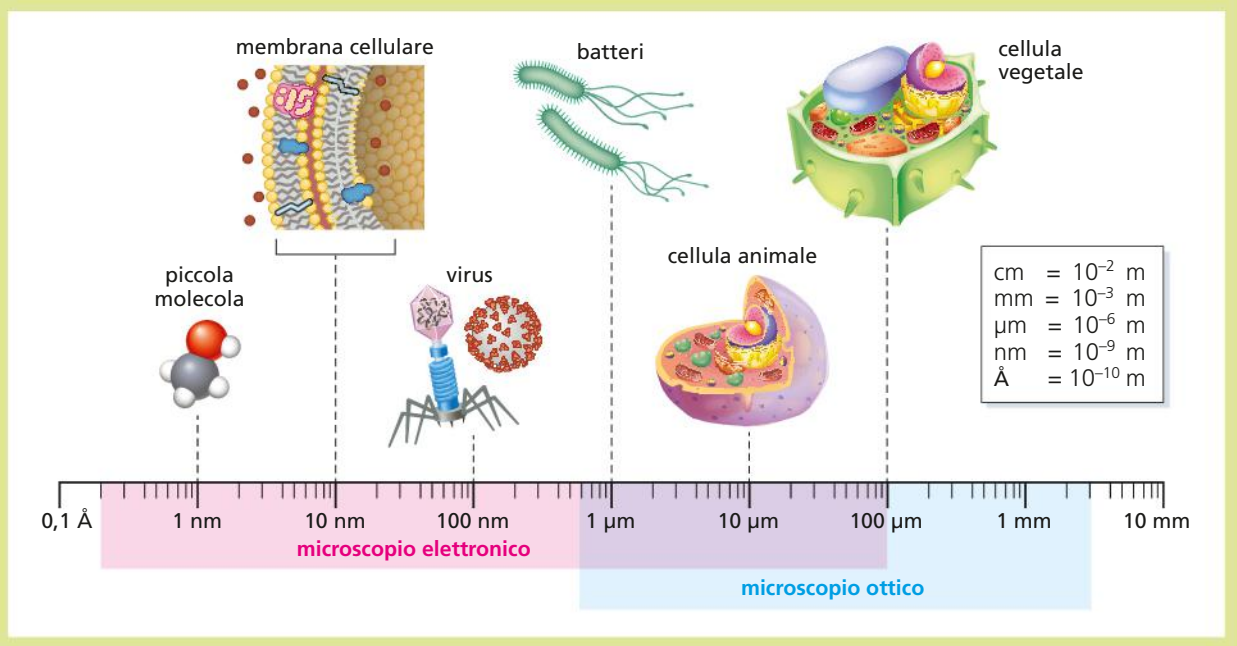


Figura 1 ▶ Osservare la materia: dalle molecole alle cellule.

tavia, un microscopio che impiega luce visibile, come quello ottico, permette di riconoscere oggetti non più piccoli di 200-300 nm. Questo perché ogni microscopio ha un limite di risoluzione che corrisponde a circa la metà della lunghezza d'onda della radiazione che incide sul campione (come affermato dal principio di Abbe).

Nel TEM, applicando un potenziale elettrico molto elevato al cannone elettronico, si riesce a generare un fascio di elettroni con una lunghezza d'onda decine di migliaia di volte più piccola di quella ottenuta con la luce visibile. Di conseguenza, la risoluzione dei microscopi elettronici permette non solo di individuare la presenza delle particelle virali in un campione, ma anche di risolverne la struttura tridimensionale (figura 2). Nella figura 3, per esempio, vediamo come appare al TEM il virus SARS-CoV-2, di cui riconosciamo la forma sferica e la corona di glicoproteine, tipica della famiglia dei coronavirus.

Per analizzare un virus con un microscopio elettronico, tuttavia, non basta depositare su un vetrino un campione biologico infetto, come si fa con i mi-

croscopi ottici: la camera nella quale viaggiano gli elettroni e nella quale è inserito il campione, infatti, deve trovarsi sottovuoto. In queste condizioni una goccia di muco o di sangue evaporerebbe all'istante, distruggendo tutte le strutture al suo interno.

Per superare questo limite è stata sviluppata la *crio-microscopia elettronica* che consente di congelare il campione e portarlo sottovuoto senza danneggiarlo. Questa tecnica è oggi una delle più utilizzate da chimici e biologi per lo studio di microrganismi e di molecole di rilevanza biologica, motivo per il quale i suoi inventori sono stati insigniti del Premio Nobel per la chimica nel 2017.

La microscopia elettronica è l'unica tecnica in grado di mostrarci la struttura del virus nella sua interezza: tuttavia è troppo lenta e complessa per essere utilizzata come metodo diagnostico. Per questo scopo si usano tecniche analitiche biologiche, che rilevano la presenza del virus in modo indiretto, come il tampone *naso-faringeo*.

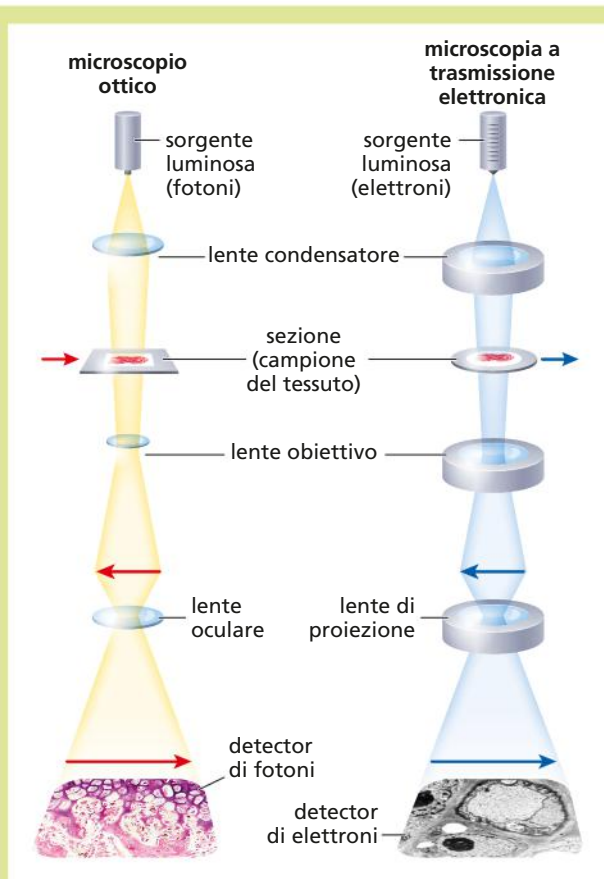


Figura 2 ▶ Rappresentazione di un microscopio a trasmissione elettronica (destra) e di un microscopio ottico (sinistra).

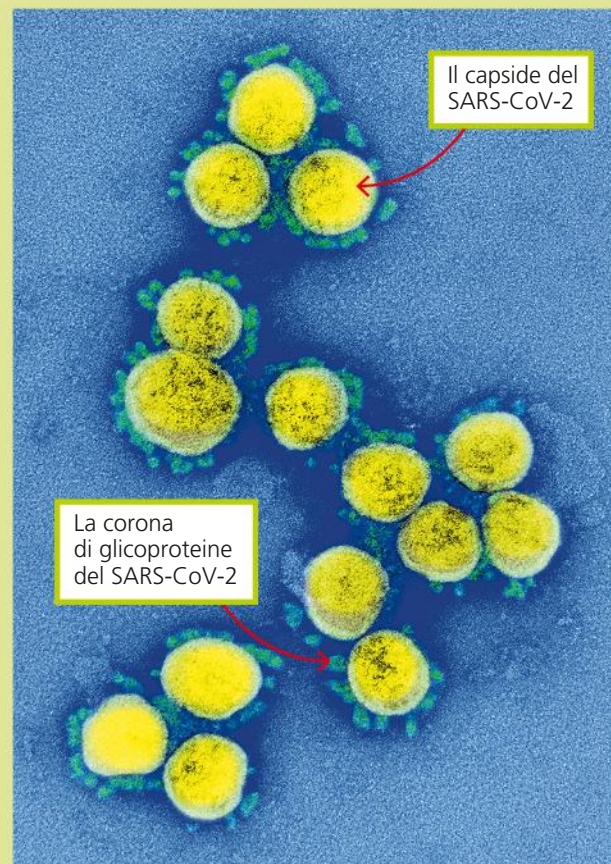


Figura 3 ▶ SARS-CoV-2 osservato al microscopio elettronico in trasmissione. L'immagine, inizialmente prodotta in scala di grigi dal microscopio, è stata colorata artificialmente.

Science Photo Library/National Institutes Of Health

PROTEGGERSI DA SARS-COV-2

Osservare la geometria e le dimensioni di un virus è un aspetto molto importante per comprenderne la natura e per classificarlo. Tuttavia, questo non è sufficiente per capire come evitare di essere infettati.

La prima cosa da capire per proteggersi da un agente tossico o da un patogeno, infatti, è come questo può penetrare nel nostro organismo e in che dosi è in grado di danneggiarci. Per esempio, alcune

Le mascherine sono filtri che permettono di separare i miscugli liquido-gas.

sostanze chimiche sono tossiche per contatto, perché superano la barriera protettiva offerta dalla pelle: per manipolarle, quindi, dobbiamo usare dei dispositivi di protezione come i guanti. Non tutti i tipi di guanti, tuttavia, sono adeguati: per avere la giusta protezione dobbiamo verificare che

il materiale di cui sono costituiti impedisca il passaggio della sostanza tossica. L'uso degli adeguati dispositivi, a sua volta, non garantisce la protezione: questi sono efficaci solo se adoperati in modo corretto. Per esempio, dobbiamo evitare di toccarci il viso o altre parti del corpo se i guanti che indossiamo possono essere contaminati.

Sia che vogliamo evitare l'intossicazione da una sostanza pericolosa, sia che vogliamo proteggerci dalle infezioni da batteri o da virus come SARS-CoV-2 dobbiamo porci le stesse domande:

1. in che modo questi agenti possono superare le barriere protettive del nostro corpo?
2. quali sono i dispositivi più adatti per proteggerci?

Come si trasmette il SARS-CoV-2

In generale, i virus si trasmettono da un ospite a un altro in molti modi, che dipendono soprattutto dalla resistenza di ogni specifico patogeno alle condizioni ambientali in cui si trova. Le conoscenze acquisite su SARS-CoV-2 indicano che la sua trasmissione può avvenire (**figura 4**):

- **tramite le vie aeree**, cioè senza che vi sia contatto fisico. Mentre parliamo, starnutiamo, tossiamo o semplicemente respiriamo, infatti, produciamo particelle acquose di dimensioni che vanno da poche centinaia di nanometri (*aerosol*) a svariati micrometri (*droplet*). Se le particelle più grandi si depositano in fretta, quelle più piccole possono rimanere sospese in aria anche per alcuni minuti. Il virus, che viene inglobato in queste micro-gocce, resta quindi sospeso in aria pronto per essere respirato da un nuovo ospite. Questa, detta *trasmissione diretta*, è identificata come la forma più probabile di contagio e quindi come la più pericolosa.
- **tramite il contatto con oggetti contaminati** dal virus. In questo caso la trasmissione, detta *indiretta*, può avvenire quando liquidi biologici infetti (come saliva, muco o lacrime) entrano in contatto con le mucose respiratorie o con gli occhi di un potenziale ospite.

Una volta individuate le possibili vie di trasmissione del virus, dobbiamo capire come disattivarlo prima che riesca a infettarci. Ed è qui che la chimica entra direttamente in gioco.

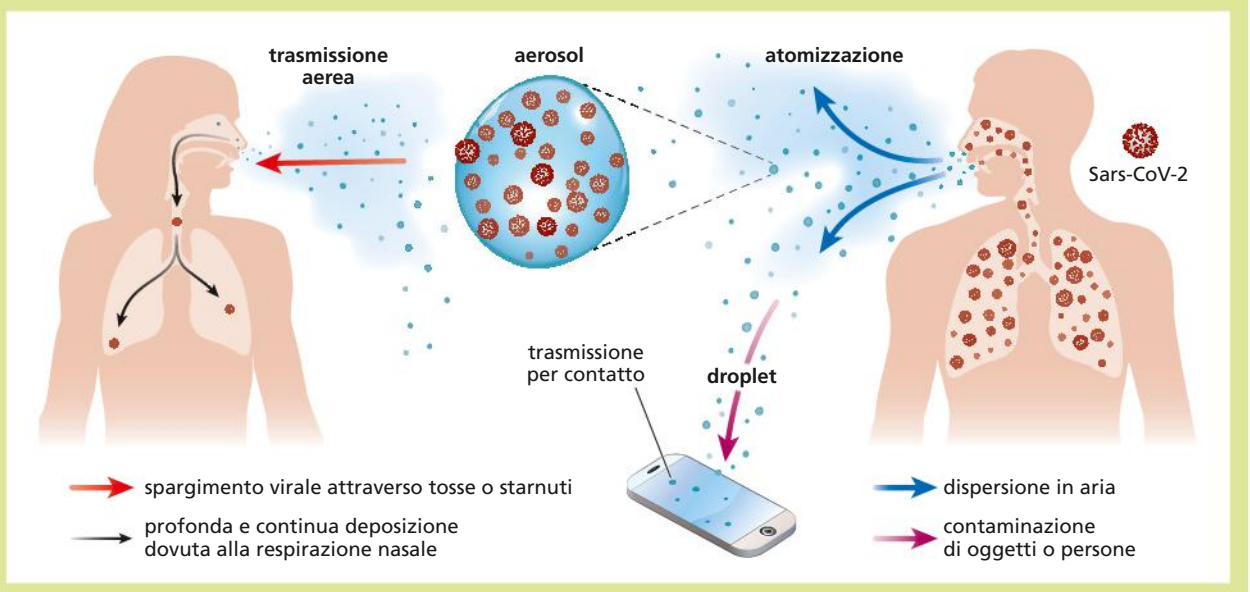


Figura 4 ▶ Schema modalità di trasmissione del SARS-CoV-2

Protegersi dalla trasmissione diretta

I virus della categoria beta-CoV, come SARS-CoV-2, hanno una forma sferica o ellittica con diametro medio fra 65 e 125 nm. Come accennato, non si trasmettono direttamente ma dopo essere stati inglobati in goccioline di fluidi corporei: la trasmissione per via aerea, quindi, avviene per inalazione di aria in cui sono disperse goccioline acquose. Per evitare di essere contagiati, possiamo allora usare le mascherine, ovvero dei **filtri** in grado di separare meccanicamente i miscugli liquido-gas sulla base delle dimensioni delle particelle dei suoi componenti: quando indossiamo la mascherina, l'aria che espiriamo attraversa i pori e viene rilasciata nell'ambiente; *aerosol* e *droplet* restano intrappolati nella parte interna del dispositivo.

La capacità delle mascherine di proteggerci dal virus dipende quindi dalle dimensioni dei pori, ma anche da caratteristiche meccaniche, come la capacità di aderire al volto. Inoltre devono essere biocompatibili, per non mettere a rischio la salute di chi le indossa. Questi parametri, che ne influenzano anche la facilità di produzione, la disponibilità e il prezzo, sono alla base della grande varietà di modelli che esiste in commercio (**figura 5**).

- Le mascherine **FFP3** hanno pori dell'ordine dei 300 nm, cioè di dimensioni maggiori a quelle del virus ma inferiori a buona parte delle particelle vettore, che siano *droplets* o *aerosol*. Sono più efficienti nel prevenire il passaggio dell'aerosol contenente cariche virali di SARS-CoV-2, quindi sono quelle che riducono al minimo la probabilità di venire contagiati. Per questo sono utilizzate dagli operatori sanitari, che entrano in contatto con pazienti infetti.

- Le mascherine **FFP2** e **FFP1** hanno capacità di filtrazione dell'aerosol via via decrescenti.
- Le mascherine **chirurgiche**, benché siano quelle più comunemente utilizzate, hanno dimensioni dei pori dell'ordine di alcuni micrometri, quindi più di cento volte la dimensione del virus e molto superiori a quelle dell'aerosol prodotto durante la respirazione. Inoltre, a differenza delle FFP3, FFP2 e FFP1, (dette anche *respiratori*), le mascherine chirurgiche non aderiscono perfettamente al volto, permettendo così il passaggio di una componente non trascurabile di aria non filtrata. Le mascherine chirurgiche, quindi, hanno un'efficienza di filtrazione inferiore rispetto alle altre mascherine in commercio (circa il 50%). Nonostante questa apparente inefficienza, uno studio pubblicato sulla rivista *Nature Medicine* ha dimostrato che l'utilizzo della mascherina chirurgica riduce drasticamente la probabilità di trasmissione del virus. Questo potrebbe essere correlato al fatto che alla filtrazione meccanica si aggiunge quella elettrostatica, che permette di intrappolare particelle dell'ordine del centinaio di nanometri.

Le mascherine chirurgiche e i respiratori sono tipicamente ottenuti con materiali compositi (cioè materiali diversi combinati in modo da ottenere prestazioni più efficienti) principalmente di natura polimerica e di origine sintetica. Le proprietà meccaniche delle mascherine come la traspirabilità, la resistenza agli spruzzi e la capacità filtrante sono molto influenzate dal modo in cui i polimeri sono sintetizzati e poi combinati.

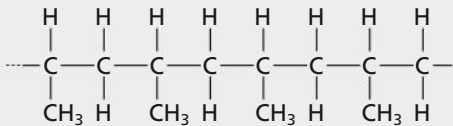
Per questo, la progettazione e realizzazione delle mascherine richiedono competenze tecnologiche specifiche, tra cui quelle di biologi, ingegneri e chimici.



Figura 5 ▶ I modelli più comuni di mascherine.

COME È FATTA UNA MASCHERINA CHIRURGICA?

Una mascherina chirurgica è formata da almeno tre strati di tessuto di fibre di polipropilene



I due strati più esterni sono formati da *tessuto non tessuto* (TNT), ovvero una sorta di ragnatela di fibre di polipropilene depositate casualmente l'una sull'altra. Gli strati sono poi fissati con un trattamento termico o meccanico che li fonde nei punti di contatto, in modo da garantire la resistenza meccanica del tessuto.

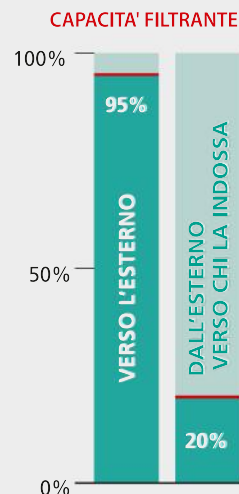
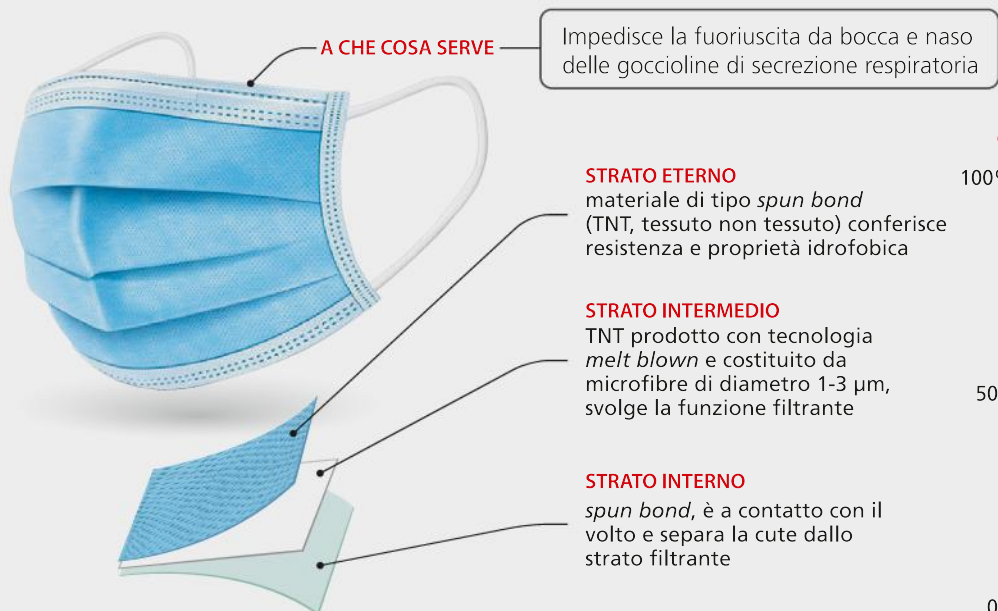
Fra i due strati di TNT c'è la membrana filtrante, anch'essa fatta di tessuto non tessuto in polipropilene ma preparata con una tecnica diversa, detta *soffiatura da fuso*. Anche questa si basa sulla deposizione di una ragnatela di fibre di polipropilene ma, in questo caso, il polimero fuso viene fatto passare attraverso molti piccoli fori e spinto da aria calda verso la superficie di un rullo. Il polimero si solidifica così in fibre spesse appena 1 µm che formano una trama estremamente



fitta. Queste membrane, tuttavia, sono piuttosto fragili, per questo devono essere protette tra diversi strati di materiali più resistenti. Modificando il numero di strati e/o il processo tecnologico usato per realizzarle, si possono produrre mascherine con proprietà filtranti diverse. Nonostante sembri semplicissima, quindi, una mascherina è un oggetto complesso realizzato da ricercatori e ricercatrici sulla base di conoscenze multidisciplinari. Per questo, l'utilizzo di mascherine auto-prodotte con tessuti di varia natura o non

certificate per l'utilizzo specifico è fortemente sconsigliato.

Nonostante durante le prime fasi di lockdown sia stata promossa questa soluzione di emergenza, a causa delle carenze di *dpi* (dispositivi di protezione individuale) disponibili sul mercato, l'utilizzo di mascherine «fai da te» non dà garanzie di efficacia e anzi può rivelarsi dannoso perché abbassa la soglia di cautela, che è fondamentale per rispettare le misure di distanziamento sociale e limitare il contagio.



Protegersi dalla trasmissione indiretta

Anche se la trasmissione diretta è la più pericolosa, non possiamo trascurare quella per contatto con superfici contaminate da fluidi infetti.

Sappiamo che in particolari condizioni le molecole subiscono reazioni chimiche, cioè si modificano o si rompono. Questo può renderle incapaci di subire alcuni processi o svolgere specifiche funzioni: si dice allora che la molecola si *degrada*. La degradazione è favorita dalla luce, dal calore o dal contatto con alcune sostanze presenti sulle superfici.

Anche i virus e le loro componenti molecolari si degradano, cioè si distruggono e diventano incapaci di infettare le cellule. Vediamo come si possono sfruttare le reazioni chimiche per degradare SARS-CoV-2.

DISINFETTARE LE SUPERFICI

I primi studi hanno mostrato che il contatto di SARS-CoV-2 con alcune superfici aumenta la sua velocità di degradazione (figura 6).

Tracce di virus attivo sono state osservate fino a 72 ore su superfici plastiche e fino a 48 ore su acciaio inossidabile; i tempi si riducono a meno di 24 ore sul cartone o sul rame. Nelle particelle di aerosol, quindi in ambiente acquoso ma a contatto con l'aria e in presenza di luce, il virus resta attivo per poche ore. Questo è uno degli aspetti di cui tenere conto quando valutiamo la frequenza con cui si devono *disinfettare* le superfici. Ma che cosa significa, esattamente, disinfettare un oggetto? Per saperlo occorre conoscere la natura chimica della sostanza che usiamo, la sua reattività e le caratteristiche del «nemico» che desideriamo debellare.



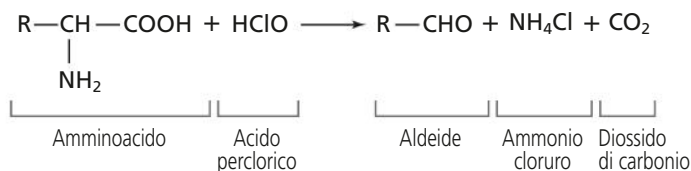
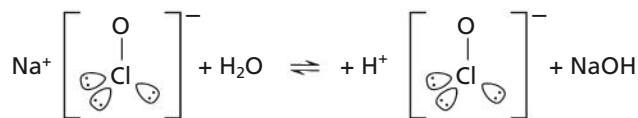
Figura 6 ▶ Tempi di sopravvivenza di SARS-CoV-2 su diverse superfici.

Vediamo alcune classi di sostanze che si possono usare per disinfettare superfici contaminate da virus come SARS-CoV-2.

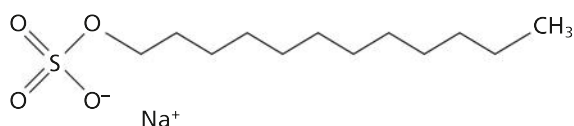
- **Acidi corrosivi**, cioè agenti chimici come acido solforico o acido cloridrico. Possono distruggere i legami chimici del capsido, gli acidi nucleici e le proteine che costituiscono il virus. Poiché sono sostanze altamente corrosive, devono essere sempre abbondantemente diluiti, si possono usare solo su superfici resistenti agli acidi (da evitare metalli e materiali calcarei, con cui reagiscono violentemente) e bisogna evitare il contatto con la pelle.

La degradazione è favorita dalla luce, dal calore o dal contatto con alcune sostanze.

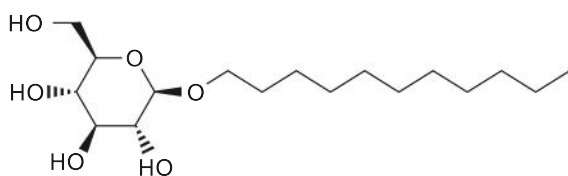
- **Agenti ossidanti**, cioè molecole e composti con elevato potere ossidante. Ossidano i gruppi funzionali e distruggono la struttura tridimensionale delle macromolecole che costituiscono il virus. Tra queste ci sono le soluzioni acquose di perossido di idrogeno (conosciuta come acqua ossigenata) e di ipoclorito di sodio (conosciute come candeggina o varechina) che si possono usare per disinfettare superfici e tessuti vivi come la pelle, a condizione che siano diluite in modo controllato. Per uso topico, per esempio, si considerano tollerabili soluzioni acquose di acqua ossigenata al 3%, mentre soluzioni al 6% non si possono usare per l'elevato potere corrosivo. L'ipoclorito di sodio, invece, si usa in soluzioni al 5-10% per la pulizia di superfici, o al 0,05% per disinfettare alimenti oppure oggetti che entrano in contatto con le mucose.



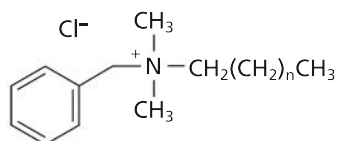
- **Solventi organici**, cioè sostanze come l'etanolo o il fenolo. Sono in grado di denaturare gli amminoacidi e gli acidi nucleici, ovvero di rompere i legami deboli che garantiscono la struttura tridimensionale di DNA, RNA e proteine. I solventi si usano spesso per disinfettare le mani o altre parti del corpo perché sono molto più delicati rispetto agli acidi o alle sostanze ossidanti. La miscela acqua-etanolo rappresenta il componente principale della maggior parte dei disinfettanti per le mani disponibili in commercio. A queste soluzioni spesso si aggiungono piccole percentuali di acqua ossigenata per attaccare, allo stesso tempo, anche eventuali batteri.
- **Saponi e molecole anfifiliche**. I tensioattivi, ovvero i principali componenti dei saponi, sono specie chimiche anfifiliche, proprio come i fosfolipidi che costituiscono il capsido dei virus. Questa somiglianza chimica rende i saponi capaci di scomporre la struttura del capsido e di portare in soluzione i fosfolipidi. I tensioattivi possono essere: *composti ionici*, come i sali degli acidi grassi, *molecole non ioniche* oppure composti di ammonio quaternario, detti *quats*, in cui un azoto carico positivamente costituisce la parte idrofilica e quattro catene idrofobiche garantiscono l'anfifilicità. I primi sono più delicati, per cui si usano per la disinfezione personale, al contrario i quats sono più aggressivi e sono molto efficaci come disinfettanti in ambito sanitario (**figura 7**).



Un esempio di tensioattivo ionico



Un esempio di tensioattivo non-ionico



Un esempio di quaternario

- Un ulteriore metodo di disinfezione sfrutta le **radiazioni ultraviolette**, dette anche UV. Queste radiazioni, che hanno una lunghezza d'onda inferiore rispetto a quelle della luce visibile, sono dotate di un contenuto energetico che le rende in grado di distruggere alcuni legami chimici fondamentali per le strutture biologiche, come quelli del DNA e dell'RNA. Si tratta infatti delle componenti della radiazione solare dalla quale dobbiamo proteggerci durante l'esposizione al sole. Per lo stesso motivo, esporre alla luce solare materiali contaminati da virus come SARS-CoV-2, ne accelera la degradazione spontanea e riduce la probabilità di trasmissione indiretta. Di conseguenza, in assenza di contatti multipli e ravvicinati nel tempo, non è necessario sanificare di continuo le superfici esposte al sole come strade o oggetti da esterno. Le radiazioni UV si possono produrre anche artificialmente, con le «lampade di Wood» (**figura 8**) o con particolari LED. Una volta generate in modo controllato, si possono usare per irradiare e quindi sterilizzare qualunque superficie, ma anche fluidi come l'acqua potabile o l'aria in una stanza (ovviamente non devono essere usate per disinfettare la pelle!).



Figura 7 ▶ I disinfettanti in ambito sanitario.



Figura 8 ▶ Lampade UV.

Altre forme di trasmissione del SARS-CoV-2

Alle modalità di trasmissione per via aerea e per contatto si aggiunge la **trasmissione oro-fecale** ovvero il passaggio del virus dall'apparato digerente di un individuo malato a quello di un individuo sano. È un meccanismo di contagio comune a numerosi virus che si verifica per ingestione di acque contaminate da feci infette oppure per contatto di feci con insetti che si depositano poi sul cibo.

Il SARS-CoV-2 permane nelle feci anche dopo la negativizzazione del tampone orale: la trasmissione oro-fecale, di conseguenza, diventa un problema rilevante, soprattutto quando i servizi igienici o le reti fognarie sono insufficienti (o inesistenti). Queste condizioni sono purtroppo piuttosto comuni in molti Paesi in via di sviluppo, in cui la povertà diffusa riduce anche la possibilità di minimizzare la trasmissione con altri trattamenti.

Lo studio del SARS-CoV-2, che ha coinvolto il lavoro intenso di un numero enorme di gruppi di ricerca in tutto il mondo, ha portato ad acquisire in fretta una quantità immensa di conoscenze. Alcune di queste, come le vie di contagio che abbiamo elencato, sono state confermate rapidamente; altre, come spesso accade quando la ricerca indaga sistemi nuovi, hanno portato a interrogativi più complessi che richiedono ulteriori approfondimenti. Una di queste è il contagio facilitato dalla presenza di **particolato atmosferico**.

Questo tipo di trasmissione è stato verificato in passato per virus come il morbillo e si basa sul fatto che particelle di inquinanti, con un meccanismo simile a quello dei droplet acquosi, siano in grado di catturare il virus e veicolare la trasmissione aerea su distanze anche molto elevate. Alcuni studi ipotizzano che questo meccanismo sia alla base della prevalenza di contagi e di decessi causati da SARS-CoV-2 in zone con bassa qualità dell'aria, come la pianura Padana in Italia (**figura 9**). Tuttavia, la complessità degli studi rende necessari ulteriori approfondimenti per confermare o rigettare questa tesi per quanto riguarda SARS-CoV-2.

Allo stesso tempo, la cattiva qualità dell'aria potrebbe aver giocato un ruolo indiretto, rendendo più vulnerabile la popolazione. È ormai noto, infatti, che l'inquinamento atmosferico favorisce l'insorgenza di patologie respiratorie (e causa ogni anno circa 76 000 morti premature solo in Italia).

Benché a oggi non vi sia consenso su quale delle due ipotesi descriva meglio la realtà, sappiamo che l'inquinamento ha giocato un ruolo nella comparsa, nella diffusione e nella mortalità del virus. Per questo, è fondamentale che l'approccio alla comprensione della pandemia e alla tutela della salute non sia limitato agli aspetti strettamente medici, ma tenga in considerazione l'ambiente in cui viviamo e l'impatto dell'essere umano sul pianeta.

Quando la ricerca si occupa di sistemi nuovi, non sempre ottiene risultati immediati.

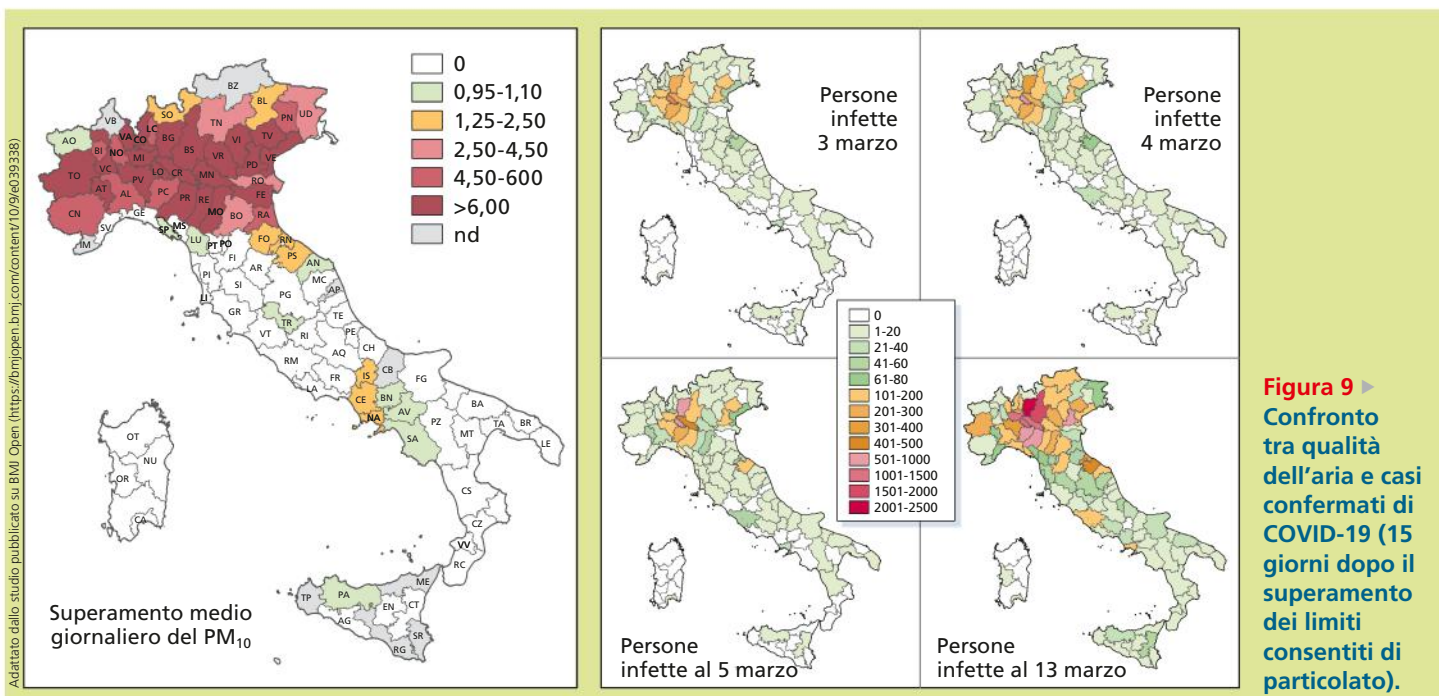


Figura 9 ▶ Confronto tra qualità dell'aria e casi confermati di COVID-19 (15 giorni dopo il superamento dei limiti consentiti di particolato).

LA PANDEMIA E L'AMBIENTE

La scienza non ci permette di avere verità assolute, ma ci fornisce gli strumenti per fare delle previsioni la cui precisione dipende da molti fattori tra cui la bontà dei dati di partenza, l'affidabilità dei modelli e il numero di variabili che si devono prendere in considerazione. Per esempio, calcolare la traiettoria di una palla da biliardo per sapere se andrà in buca o meno può essere relativamente semplice. Se le palle sul tavolo aumentano, cresce il numero di variabili: il calcolo diventa più difficile, ma si può ancora risolvere in modo deterministico.

La situazione si complica quando si studiano gli effetti dei cambiamenti climatici o le conseguenze di una pandemia. In questi casi il sistema (cioè il tavolo e le palle da biliardo) è l'intero pianeta Terra, con tutti i suoi ecosistemi interconnessi e gli organismi di ogni specie che lo abitano. Nonostante la complessità di questi sistemi, la comunità scientifica

sta facendo progressi tali nella comprensione di questi eventi da riuscire a effettuare previsioni piuttosto accurate. Da diversi anni, per esempio, era teorizzata la possibile diffusione di una nuova mutazione di coronavirus che, dopo un salto di specie da un pipistrello all'essere umano, si sareb-

be diffuso in ogni continente trasmettendosi per via aerea. Queste informazioni, messe a disposizione con largo anticipo dalla comunità scientifica, tuttavia, non sono state recepite con prontezza dalle istituzioni e dalla società: quasi tutti i Paesi del mondo si sono trovati impreparati quando, l'11 marzo del 2020 l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha dichiarato lo stato di pandemia da SARS-CoV-2.

Da quel momento i governi hanno dovuto attuare politiche emergenziali di contenimento del virus, sebbene queste non siano state né uniformi né ugualmente rigide in ogni luogo. Molti Stati, tra cui l'Italia, hanno messo in atto un completo lockdown, interrompendo la maggior parte delle attività produttive, annullando gli spostamenti considerati non necessari e riducendo al minimo i contatti tra i cittadini non conviventi.

Queste scelte hanno avuto ricadute mai viste sui sistemi produttivi, sull'economia, sulle comunità e sul pianeta per come lo conosciamo, tanto che alcuni scienziati hanno considerato il periodo di pandemia come un enorme esperimento sociale e ambientale.

La disponibilità dei reagenti

Uno degli effetti immediati del lockdown è stata la scomparsa dai negozi di beni che davamo per scontati come i disinfettanti, l'alcol per le pulizie, la farina o il lievito. Se alcune di queste carenze sono state facili da ovviare, altre hanno condizionato la gestione dell'epidemia.

I primi test in grado di riconoscere i pazienti affetti da COVID-19, per esempio, si potevano usare solo per i pazienti più gravi: oltre al ridotto numero di ricercatori e di strutture in grado di effettuare i test, infatti, nei laboratori mancavano i «reagenti». Con questo termine vago, ci si riferiva alle sostanze necessarie per la PCR (*Polymerase Chain Reaction*), che permette di amplificare sequenze di materiale genetico. Fra queste ci sono solventi come il cloroformio o l'isopropanolo, sali inorganici (per la preparazione delle soluzioni tampone) e molecole complesse come il guanidinio tiocianato (che serve per separare l'RNA del capsido). La scarsa disponibilità di queste sostanze è dipesa da fatto che molte aziende produttrici sono state messe alla prova nelle prime fasi dell'epidemia, anche perché molte avevano delocalizzato parte della produzione in Cina, dove il lockdown è stato imposto prima che nel resto del mondo.

Problemi simili hanno riguardato dispositivi come guanti, mascherine, camici e disinfettanti, rendendo molto pericoloso il lavoro degli operatori sanitari durante l'emergenza (figura 10).

Per ovviare a queste carenze, molti laboratori hanno reindirizzato la produzione verso materiali e sostanze indispensabili per affrontare la pandemia e studiato protocolli per aggirare la mancanza di prodotti specifici.



Figura 10 ► Produzione industriale di mascherine.

Il volume dei rifiuti medici aumenterà di cinque volte rispetto alla media annuale.

Gli effetti dell'uso dei dispositivi di sicurezza sull'ambiente

Reagenti e dispositivi di protezione usati su larga scala, insieme alle politiche di distanziamento sociale, hanno permesso di contenere il virus. Tuttavia, fin dalle prime fasi della pandemia, è stato evidente che la diffusione di oggetti monouso e spesso non riciclabili avrebbe avuto un impatto sull'ambiente che non poteva essere trascurato (figura 11).

L'utilizzo dei dispositivi di protezione usa e getta è iniziato negli anni ottanta. Processi di produzione sterili e controllati, infatti, li rendevano più sicuri rispetto a quelli riutilizzabili, che all'epoca erano i più comuni. Tuttavia, la transizione è stata dettata anche da logiche di mercato, che ha visto in quello della sanità un enorme potenziale settore di crescita.

Oggi, secondo i dati dell'OMS, è previsto un aumento della produzione di dispositivi di sicurezza pari al 40% della produzione mensile precedente la pandemia, per un totale di 89 milioni di mascherine, 76 milioni di paia di guanti e 1,6 milioni di occhiali protettivi al mese.

La pandemia da COVID-19, quindi, è un'occasione di profitto per i produttori di dispositivi medici usa e getta e ci pone di fronte agli evidenti limiti di questo modello di consumo: il volume di rifiuti medici aumenterà di oltre 5 volte rispetto alla media annuale. A differenza dei comuni rifiuti plastici, inoltre, il loro smaltimento avviene secondo rigide procedure. In Italia, secondo il protocollo diffuso durante le prime fasi di contrasto alla pandemia, i dispositivi usati in ambito ospedaliero devono essere sigillati in sacchetti di plastica e stoccati in stanze apposite

per evitare diffusione di particolato. I sacchetti vengono quindi sigillati in contenitori specifici, a loro volta raccolti in contenitori metallici chiusi ermeticamente e spostati all'interno degli ospedali seguendo percorsi appositamente disegnati per poi essere caricati su mezzi per lo smaltimento. Tutto questo, ovviamente, deve avvenire in assoluta sicurezza e il personale dedicato deve indossare a sua volta dispositivi di protezione individuale.

Infine, lo smaltimento avviene esclusivamente per incenerimento, senza possibilità di riciclo per il rischio di contaminazione. Gli inceneritori di ultima generazione, o termovalorizzatori, consentono di recuperare parte del contenuto energetico come energia elettrica, ma la combustione è comunque inquinante: l'impatto ambientale viene solo in parte mitigato dall'utilizzo di filtri innovativi, che selezionano e separano i gas prodotti, come la CO₂.

A questo si aggiunge il fatto che non tutti i dispositivi medici sono impiegati in contesti protetti come gli ospedali, ma ogni singolo cittadino deve farne uso in casa propria e smaltirli in modo autonomo. Secondo un rapporto del *World Wildlife Fund* (WWF), se anche solo l'1% delle mascherine venisse smaltito in maniera scorretta, ogni mese circa dieci milioni di esse finirebbero in natura.

È evidente, quindi, che l'uso di dispositivi di sicurezza è imprescindibile, ma lo è anche una profonda riflessione sul modo in cui questo deve e può avvenire così da garantire che sia sostenibile. Un altro problema, questo, che si può affrontare solo con la giusta sinergia tra la comunità scientifica, che deve elaborare soluzioni efficienti, e le istituzioni, che devono imporre o favorire la loro applicazione.



Figura 11 ► Usare le mascherine è fondamentale per prevenire il contagio da SARS-CoV-2.

istock/izido

Vediamo le possibili strategie che si stanno esplorando per affrontare il problema.

- *Il recupero dei rifiuti contaminati e il loro successivo riciclo.* Alcune aziende chimiche stanno sviluppando programmi di questo tipo, tuttavia il costo di queste procedure è elevato e la scala di applicazione ancora ridotta.
- *La disinfezione e il riutilizzo dei dpi.* Uno studio pubblicato dalla Società Chimica Americana dimostra che i respiratori N95, l'analogo statunitense delle mascherine FFP3, si possono riutilizzare fino a 50 volte se riscaldati a 85 °C in condizioni di bassa umidità. Tuttavia, evidenzia anche che la capacità filtrante cala in modo drastico in condizioni di disinfezione diverse, come una temperatura superiore a 85 °C.
- *La realizzazione di dpi ecocompatibili.* I guanti in lattice e nitrile, per esempio, si possono rendere parzialmente biodegradabili con l'aggiunta di componenti biocompatibili, come alcuni derivati dell'amido vegetale. Le mascherine, invece, si possono preparare con materiali naturali quali la seta, il cotone o lo chiffon. Per esempio, quelle a base di cotone finissimo hanno capacità di filtrazione superiori a quelle chirurgiche. Tuttavia, gli studi

scientifici si realizzano su materiali con proprietà, dimensioni e struttura controllati: non c'è nessuna garanzia che una generica mascherina «fai da te», anche se realizzata con gli stessi materiali, ottenga prestazioni comparabili (figura 12). Ovviamente, l'uso di materiali biocompatibili, benché

promettente, non risolve da solo il problema dello smaltimento di rifiuti contaminati.

Non ci sono garanzie che una mascherina «fai da te» garantisca prestazioni adeguate.



Figura 12 ► Mascherine «Fai da te».

Il prezzo del petrolio

Le possibili strategie per la riduzione dell'inquinamento devono fare i conti con le politiche economiche e le dinamiche del mercato, le quali, in assenza di una forte spinta da parte delle istituzioni, difficilmente coincidono con la tutela dell'ambiente.

Bisogna infatti tenere conto del fatto che già da alcuni anni il prezzo delle materie plastiche più comuni è in costante calo. Nel 2020 il prezzo del polietilene ad alta densità è quasi dimezzato rispetto all'inizio del 2018, mentre quello del polipropilene è sceso di oltre un terzo. Il prezzo del polietilene tereftalato vergine, di cui sono fatte le comuni bottiglie d'acqua, è sceso così tanto da essere oggi inferiore al suo analogo riciclato. Queste variazioni sono dovute a una serie di fattori, tra cui il calo del prezzo della materia prima con cui questi oggetti sono prodotti: il petrolio (figura 13).

Se per il consumatore questo significa un gradito risparmio sul rifornimento dell'automobile, per l'ambiente la notizia è assai meno positiva: il petrolio economico fa calare il prezzo della plastica vergine e quindi quello di tutti gli oggetti con essa prodotti, inclusi quelli monouso come i dispositivi medici.

A questo si aggiunge la complessa situazione sanitaria ed economica globale, causata anche dalle misure di contrasto alla pandemia, che rischia di rallentare le misure previste per il contrasto dell'inquinamento. Per esempio, i governi di Inghilterra e Portogallo hanno rimandato la messa al bando dei prodotti plastici usa e getta per preoccupazioni legate alla trasmissione del COVID-19.



Figura 13 ► Andamento prezzo del greggio.

Gli effetti del lockdown sull'ambiente

L'aumento del consumo di plastica non riciclabile è solo uno degli aspetti che legano la pandemia da COVID-19 alla sostenibilità ambientale. Le misure di distanziamento sociale e il lockdown diffuso a molti Paesi, infatti, hanno rallentato alcune attività come i trasporti e la produzione industriale. Nei primi mesi della pandemia, per esempio, in Cina si è osservata una riduzione del 25% di emissioni di CO₂ e del 50% degli ossidi di azoto, ovvero i principali inquinanti atmosferici di origine antropica.

Lo stesso fenomeno è stato osservato in tutte le aree del mondo in cui sono state applicate misure di distanziamento sociale, fra cui l'Italia (figura 14). A livello globale, ad aprile 2020 le emissioni di CO₂ hanno raggiunto un minimo, con un calo del 17% rispetto allo stesso giorno dell'anno precedente.

La riduzione dell'inquinamento e della presenza umana, dovute al rallentamento della produzione industriale e del turismo, hanno portato anche a un temporaneo miglioramento delle condizioni delle spiagge e delle acque costiere; il blocco degli spostamenti privati e pubblici ha indotto un calo dell'inquinamento acustico e ha permesso un graduale ripopolamento di zone limitrofe alle aree abitate da parte

della fauna locale, oltre a un miglioramento della qualità della vita nelle zone urbane.

Tuttavia, come facilmente prevedibile e da un certo punto di vista auspicabile, le condizioni restrittive imposte dal lockdown non sono destinate a essere parte della nostra quotidianità. Viceversa, l'emergenza climatica che stiamo vivendo e la distruzione degli ecosistemi sono processi a lungo termine, che richiedono misure altrettanto lungimiranti. Inoltre, l'ambiente è un sistema complesso, cioè costituito da molti sottosistemi che interagiscono tra loro in modo non lineare: modificare una variabile di questo sistema può avere su tutte le altre effetti a cascata difficili da prevedere.

A conferma di ciò sappiamo che la riduzione delle emissioni di anidride carbonica che si è verificata durante il lockdown, per quanto importante nel breve intervallo temporale, ha avuto un impatto praticamente nullo sul totale di anidride carbonica in atmosfera: nel maggio 2020 infatti, nonostante le chiusure, la concentrazione totale di CO₂ nell'atmosfera ha raggiunto un picco mai registrato nella storia umana: 418 parti per milione.

Nel maggio 2020 nonostante le chiusure, la concentrazione totale di CO₂ nell'atmosfera ha raggiunto un picco mai registrato nella storia umana.

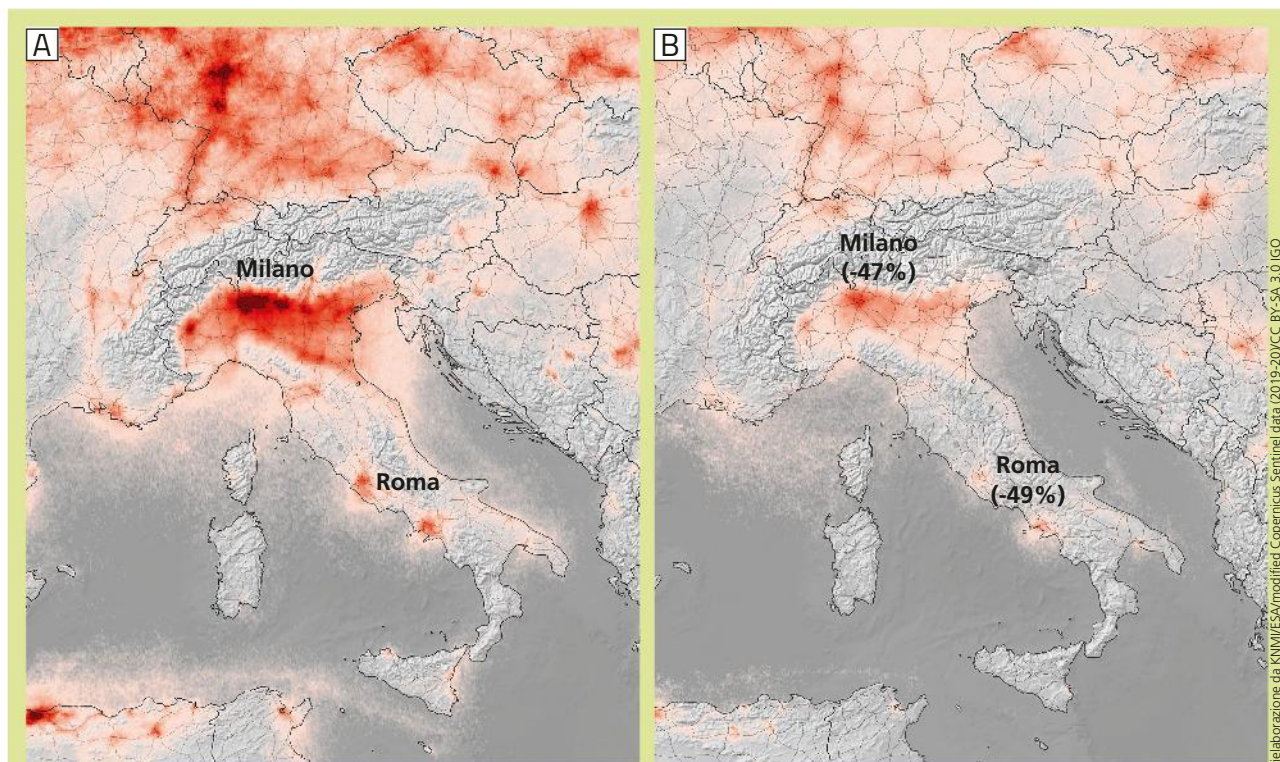


Figura 14 ▶ Concentrazione del diossido di azoto in Italia a confronto: (A) marzo 2019 e (B) marzo 2020 (durante il lockdown).

Le scelte dopo la pandemia

Quali saranno le ricadute della pandemia sull'ambiente? Questo evento ci ha aiutato e ci aiuterà a combattere la crisi climatica? Di certo la pandemia ci ha offerto molte questioni sulle quali riflettere, ma la risposta a queste domande oggi non esiste: dipende dal tipo di scelte individuali e collettive che decideremo di fare, senza dimenticare che nessuno dei miglioramenti osservati nei periodi di chiusura può e deve essere dato per scontato.

Questo risultato, evidente fin dalle prime riaperture, è confermato da periodi simili che si sono succeduti nella storia. Eventi eccezionali come epidemie o carestie hanno provocato nel breve periodo una crisi economica dovuta al rallentamento delle attività, che è sempre stata seguita dal cosiddetto «rimbalzo», ovvero una rapida ripresa dovuta alla necessità di recuperare il tempo e le risorse perse durante la fase di crisi. Di solito, queste fasi sono accompagnate da un uso delle risorse, degli spostamenti e degli investimenti anche superiore a quello che si era raggiunto prima della crisi. La sensazione di urgenza diffusa durante la ripresa economica si concentra su investimenti con un ritorno economico immediato e potrebbe far passare in secondo piano concetti come la sostenibilità.

Prima della pandemia da COVID-19, molti Paesi nel mondo si erano impegnati in progetti a lungo termine di investimento nelle tecnologie sostenibili e nel passaggio da un'economia *lineare* a una *circolare*. Tuttavia, questo improvviso stop delle attività produttive ha portato a una serie di ripensamenti tra i governanti del pianeta.

A marzo 2020, per esempio, il numero di permessi per la costruzione di centrali a carbone in Cina ha visto per la prima volta un incremento, dopo anni di investimenti sulle energie rinnovabili. Secondo i dati dell'Istituto Nazionale di Ricerche Spaziali del Brasile (INPE), il disboscamento della foresta amazzonica è stato più rapido del 64% rispetto all'anno precedente (**figura 15**). Questo è stato, almeno in parte, causato dall'assenza di provvedimenti del governo brasiliano impegnato nelle prime fasi della pandemia.

Nonostante il fragile contesto in cui ci troviamo, tuttavia, l'impulso di organismi politici ed economici può ancora sovvertire questa prospettiva e sfruttare questa fase delicata per un rilancio delle politiche di sostenibilità ambientale. Per esempio, prima della pandemia l'Unione Europea si era impegnata nel promuovere il *Green Deal*, ovvero una serie di misure

per rendere più sostenibili la produzione di energia e lo stile di vita dei cittadini europei.

Nel maggio 2020, nonostante l'ostracismo di alcuni componenti, sempre l'Unione Europea ha avviato un pacchetto per il rilancio dell'economia chiamato *Next Generation EU*, un programma attraverso cui stanziare cospicui fondi per rilanciare l'economia dopo la pandemia favorendo il contrasto ai cambiamenti climatici, la tutela del territorio e l'esclusione di attività inquinanti o pericolose.

Le politiche e i finanziamenti provenienti dall'Unione Europea possono davvero modificare e orientare lo sviluppo dei singoli Paesi e persino delle piccole comunità, come hanno dimostrato alcuni successi ottenuti negli ultimi decenni. Tuttavia, perché questi piani funzionino, i singoli cittadini sono chiamati a informarsi e contribuire attivamente, non solo con le proprie scelte, ma anche partecipando attivamente alla vita pubblica e politica.

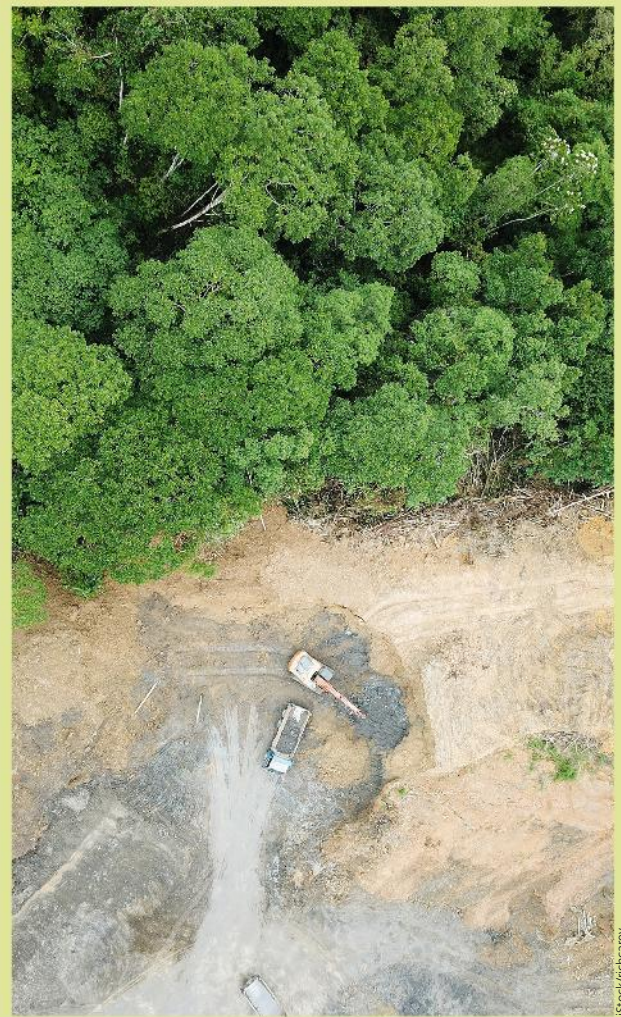


Figura 15 ► Il disboscamento della Foresta Amazzonica mette in pericolo molti ecosistemi.

PANDEMIA, RICERCA SCIENTIFICA E COMUNICAZIONE

La diffusione del COVID-19 ha messo la scienza sotto i riflettori: è diventata argomento di conversazione, fonte di timori, speranze e aspettative in un modo a cui non eravamo abituati.

Durante i mesi di pandemia abbiamo atteso trepidanti le informazioni sui contagi, sulle cure e sui vaccini; i governi e le istituzioni si sono affidati agli esperti per decidere quali attività interrompere, quali aree geografiche decretare zone rosse, quali regole di comportamento imporre ai cittadini.

Allo stesso tempo ci siamo accorti che molto di ciò che ci veniva comunicato cambiava da un momento all'altro: si pensi al dibattito sulla necessità di usare la mascherina o su quale fosse il modo migliore per monitorare la diffusione del virus.

Come è possibile tutto ciò, se la scienza si basa sui dati e non sulle opinioni? E come possiamo fidarci se il sapere cambia di continuo e chi se ne occupa sembra non avere mai una posizione condivisa?

Sappiamo che il sapere scientifico non è un edificio monolitico e immutabile, ma l'insieme degli edifici di una città in continua espansione. La crescita non avviene in modo lineare, come la sommatoria di

informazioni puntuali acquisite nel tempo, ma è un percorso ramificato: alcune zone della città vengono popolate altre trovano degli ostacoli e smettono di essere edificate.

Durante lo studio della scienza a scuola faticiamo a capire quanto sia tortuoso il percorso delle scoperte, perché abbiamo a che fare con conoscenze sedimentate che hanno provato la loro validità per centinaia di anni (questo non significa che non possano essere falsificate, ma che finora nessuno è riuscito a farlo).

Quando ci avviciniamo al sapere contemporaneo, invece, dovremmo immaginare la comunità scientifica come un conciliabolo di dottoresse di diverse specializzazioni che, raccolte intorno a un paziente, riportano ciascuna le proprie valutazioni: dopo aver verificato che le informazioni a disposizione sono state raccolte e riportate nel modo corretto, provano a combinarle per comprendere la malattia che affligge il malato. La diagnosi può essere veloce oppure richiedere l'acquisizione di nuovi dati; le dottoresse possono scontrarsi e fare ipotesi che poi si rivelano sbagliate, ma questo non rende il processo meno scientifico. Al

contrario è la prova di un modo di procedere non dogmatico, che richiede continue validazioni.

Nella realtà della comunità scientifica, questi confronti possono verificarsi direttamente nei laboratori o durante i convegni, ma più spesso avvengono in modo indiretto attraverso le *pubblicazioni scientifiche*. Perché possano essere considerate universalmente valide, queste devono riportare in modo oggettivo studi rigorosi e riproducibili.

L'affidabilità delle pubblicazioni scientifiche è garantita da un processo di revisione fra pari detto *peer-review*, che consiste in una serie di controlli effettuati da ricercatori e ricercatrici (detti appunto *pari*) prima della loro pubblicazione.

Il processo implica che uno studio venga pubblicato in tempi relativamente lunghi (di solito nell'ordine dei mesi). Questi sono accettabili nell'ambito della ricerca scientifica in tempi ordinari ma decisamente inadeguati a soddisfare la fame di notizie del pubblico e delle istituzioni durante un'emergenza.

A questo punto si intuisce uno dei problemi legati alla comunicazione della scienza durante la pandemia: i



istock/Stigur Már Karlsson/Heimsmýndir



NASA/NOAA/GSFC/Suomi NPP/WIIRS/Norman Kuring

SEGUE ►

singoli scienziati sono stati chiamati a raccontare i loro risultati quotidiani senza confrontarsi e sedimentare il sapere al livello di comunità. Ciò ha portato alla diffusione di notizie ancora non pubblicate oppure a processi di *peer-review* meno rigorosi, pubblicazione di articoli errati o parzialmente corretti. Ne sono esempi alcuni studi sulla possibilità di sfruttare comuni antivirali, come la cloroquina e l'idrossicloroquina, per la cura del COVID-19.

Nonostante gli articoli scorretti vengano sempre ritirati dalle riviste di settore, le informazioni si diffondono in fretta tra la popolazione e, talvolta, molto più di quanto non vengano poi dimenticate. Si pensi a quanto accaduto con l'articolo pubblicato nel 1998 (e ritirato nel 2011) che sosteneva che ci fosse correlazione tra il vaccino per il morbillo e l'insorgenza dell'autismo.

Ciò non significa che tutti gli studi pubblicati in condizioni di emergenza non siano affidabili, né che la scienza sia inadeguata ad affrontare la realtà. Tuttavia, è importante essere consapevoli che un fatto si può considerare valido solo quando è condiviso dalla comunità scientifica, che è costituita di un numero enorme di individui, con le più disparate formazioni e originari di ogni luogo del pianeta. Prima che questo momento di accettazione avvenga, il parere di uno scienziato non può e non deve essere considerato come una verità scientifica.

Per rispondere alle emergenze, quindi, ci si può affidare alla scienza perché le conoscenze acquisite in tempi ordinari possono aiutare a rispondere ai bisogni immediati e a supportare le scelte future: tuttavia, né i cittadini né le istituzioni possono pretendere soluzioni dogmatiche e immutabili.

Allo stesso tempo, non dobbiamo dimenticare che la scienza fornisce alla collettività gli strumenti per prevenire le crisi. La società, a sua volta, dovrebbe imparare a sfruttarli meglio di quanto non abbia fatto fino a questo punto.

Da questo, e da molti punti di vista, la pandemia da COVID-19 è stata una sorta di prova generale di quello che dovremo affrontare quando le conseguenze del cambiamento climatico saranno più evidenti. La comunità scientifica, in tempo di pace, ci ha messo di fronte ai rischi che corriamo e ora sappiamo che potrebbe non essere in grado di trovare soluzioni abbastanza in fretta quando la situazione sarà emergenziale. Per questo dobbiamo prevenire il peggio e farlo in fretta: la pandemia ci ha insegnato che, nel mondo che conosciamo, niente può essere dato per scontato.



Shutterstock/rooftoo