

Brain Fog: Does Air Pollution Make Us Less Productive?
Annebbiamento del cervello: l'inquinamento atmosferico ci rende meno produttivi?

Silke Schmidt

Publicato: 14 maggio 2019 CID: 052001 <https://doi.org/10.1289/EHP4869>

Abstract

La regolamentazione dell'inquinamento atmosferico ha ridotto il bilancio delle malattie cardiache e polmonari. Ad esempio, gli emendamenti del Decreto Aria Pulita (Clean Air Act Amendments) del 1990 hanno contribuito a prevenire circa 160.000 morti e 86.000 ricoveri nel solo 2010. (1) Tuttavia, un corpus crescente di ricerche suggerisce che l'aria inquinata mette anche il nostro cervello in pericolo.

L'esposizione cronica a inquinanti legati al traffico può aumentare il rischio di disturbi neurologici. (2) Sia le esposizioni a breve che a lungo termine sono state associate a una riduzione delle risorse umane, tra cui il rendimento scolastico dei bambini in età scolare (3) e la produttività dei lavoratori durante la vita degli adulti. (4) Come Matthew Neidell della Columbia University e Joshua Graff Zivin dell'Università della California, San Diego, hanno scritto nel 2018, "L'ubiquità di questi impatti meno letali, rivelati dalla ricerca economica emergente sulla produttività del lavoro e sull'accumulo di risorse umane, ... può aggiungere un notevole impatto su tutta società in tutto il mondo." (4)

Componenti dell'inquinamento dell'aria interna ed esterna

La stima degli effetti subdoli dell'inquinamento atmosferico richiede dati a lungo termine sulla qualità dell'aria. Il Decreto Aria Pulita (The Clean Air Act) ha reso disponibili gran parte di queste informazioni ai ricercatori e al pubblico attraverso una vasta rete di monitoraggio per determinati inquinanti dell'aria esterna. Oggi questa rete nazionale (5) contiene oltre 4.000 stazioni di monitoraggio gestite principalmente da agenzie ambientali statali. Queste agenzie inviano misurazioni orarie o giornaliere delle concentrazioni d'inquinanti a un database centrale gestito dall'Agenzia per la Protezione Ambientale degli Stati Uniti (EPA).

L'EPA statunitense definisce e monitora sei "parametri inquinanti" nell'aria ambientale: il particolato (PM), l'ozono a livello del suolo, il biossido di zolfo, il biossido di azoto, il monossido di carbonio e il piombo. Il PM include delle varietà di minuscole particelle solide e goccioline trasportate dall'aria emesse da veicoli, fabbriche, incendi e altre fonti antropogeniche e naturali. Ulteriori inquinanti da fonti esterne includono metano, composti organici volatili (VOC), polline, metalli e altri ossidi di azoto e zolfo.

Le sostanze inquinanti generate all'aperto possono migrare all'interno, dove gli americani trascorrono in media il 90% del loro tempo. Alcune delle pratiche edilizie ad alta efficienza energetica introdotte negli anni '70 hanno permesso agli inquinanti indoor di concentrarsi; infatti dagli anni '80, i rapporti sulla "sindrome dell'edificio malato" hanno cominciato ad essere pubblicati nella letteratura medica. (52) I più recenti sistemi di classificazione degli edifici come Leadership in Energy and Environmental Design® riconoscono l'importanza di una ottimale ventilazione. (53) Immagine: © Pavel L Foto e video/Shutterstock.

Sebbene generati all'aperto, questi prodotti chimici possono raggiungere l'interno degli edifici, dove le persone trascorrono gran parte della loro giornata, ad esempio gli americani trascorrono in media il 90% del loro tempo all'interno. (6) Le concentrazioni di inquinanti esterni sono più basse all'interno che all'esterno. Ma Joseph Allen, un assistente professore di scienza della valutazione dell'esposizione all'Università di Harvard, sottolinea lo "**sporco segreto - dirty secret**" dell'inquinamento dell'aria esterna. "**Quando teniamo conto del tempo che spendiamo negli edifici, un semplice calcolo mostra che la maggior parte della nostra esposizione all'inquinamento dell'aria esterna può effettivamente verificarsi all'interno**", spiega. L'entità della penetrazione dipende dal tipo di costruzione degli edifici, dai tassi di ventilazione, dalla meteorologia locale e dalle stesse sostanze inquinanti. Un altro fattore è se le temperature esterne richiedono le finestre aperte.

Le fonti interne generano anche una miscela di inquinanti. Ad esempio, il PM viene generato dalla cottura e dal riscaldamento domestico. I comuni allergeni indoor includono muffe e feci, saliva e parti del corpo di acari della polvere e scarafaggi. E i **VOC, che evaporano a basse temperature**, sono emessi dai materiali di costruzione, vernici e rivestimenti protettivi, adesivi per tappeti e mobili, detersivi e altri prodotti.

Ma l'inquinamento dell'aria viaggia anche nell'altro senso, **dall'interno verso l'esterno**. I ricercatori hanno recentemente stimato che, con il calo delle fonti esterne di alcuni inquinanti, i VOC derivati dall'utilizzo interno dei prodotti chimici ora costituiscono una percentuale maggiore dell'inquinamento atmosferico organico esterno rispetto al passato nelle aree urbane. (7)

Quella scoperta è stata un punto di svolta per l'incidenza relativa dei VOC, secondo Allen. "Non dovremmo pensare ai VOC solo come una preoccupazione interna," dice. "**Oltre allo sporco segreto dell'inquinamento dell'aria esterna, ora abbiamo anche uno sporco segreto dell'inquinamento nell'aria interna.**"

Secondo il rapporto *State of Global Air* del 2018, (8) **si stima che il 95% della popolazione mondiale respiri aria ambientale malsana**, con un PM fine annuale (PM_{2.5}) con concentrazioni superiori allo standard stabilito dall'Organizzazione Mondiale della Sanità di 10 µg/m³. Il rapporto ha trovato che **la combinazione di PM_{2.5} esterno, con l'inquinamento dell'aria nelle case e dell'ozono rappresentano il quarto fattore di rischio per la salute umana a livello globale**. Questi tre inquinanti sono responsabili circa dell'11,2% delle morti nel mondo.

Le normative governative e la tecnologia di riduzione delle emissioni per i veicoli e le fabbriche hanno ridotto le emissioni provenienti da alcune fonti puntuali d'inquinamento dell'aria esterna. I VOC che fuoriescono dall'uso interno dei prodotti chimici ora costituiscono una quota maggiore dell'inquinamento atmosferico organico all'aperto nelle aree urbane. (7) Image: © iStockphoto/cgering.

L'ubiquità dell'aria inquinata ha motivato i ricercatori di molti campi diversi a studiare non solo i suoi effetti sulla mortalità e morbilità, ma anche gli effetti più subdoli sul cervello sano.

Effetti a breve termine degli inquinanti atmosferici sul cervello

Quando Matthew Neidell della Columbia, professore di politica e gestione della salute, iniziò a studiare l'inquinamento atmosferico e la produttività umana, incominciò con le persone che

lavorano principalmente all'aperto (i raccoglitori di frutta in California (9)). Successivamente ha eseguito studi sugli operai all'interno dell'industria manifatturiera (le confezionatrici di pere in California (10)) e sugli impiegati nel settore dei servizi (gli impiegati dei call center in Cina (11)).

Il team di Neidell ha riscontrato prove evidenti che i livelli più elevati d'inquinamento dell'aria esterna erano associati a una diminuzione della produzione dei lavoratori. Ma hanno anche visto un'associazione con gli impiegati dei call center. "Abbiamo scoperto che stavano completando un minor numero di chiamate e facevano più pause nei giorni di alto inquinamento atmosferico", afferma Neidell. Egli ipotizza che forse i lavoratori "si sono semplicemente sentiti meno in forma senza sapere il perché e si sono allontanati più spesso dalla scrivania per andare al bagno o al distributore d'acqua".

Ciò può sembrare minimo, ma il potenziale impatto economico può essere notevole. Ad esempio, nel 2014, l'indice di qualità dell'aria misurato dall'EPA statunitense nella Contea di Los Angeles ha superato i 150 valori di riferimento (un punteggio considerato "non salutare per la popolazione generale") per 28 giorni. (12) Se l'associazione stimata tra la qualità dell'aria e la produttività nei lavoratori dei call center cinesi viene applicata a tutti gli operai che lavorano nel settore dei servizi nella Contea di Los Angeles, gli autori hanno previsto che una riduzione dell'inquinamento atmosferico a valori di indice inferiori a 150 genererebbe un aumento della produttività del settore di oltre \$ 370 milioni. (11)

Per scoprire se un $PM_{2.5}$ poteva influenzare le funzioni cognitive, Neidell e il suo team si sono indirizzati verso la Borsa di New York. (13) Analizzando 10 anni di rendimenti S&P 500 come un indicatore per le prestazioni lavorative degli agenti di borsa ed hanno scoperto che un $PM_{2.5}$ ambientale superiore ai livelli a New York City era associato a minori rendimenti di borsa. Nessuna associazione di questo tipo è stata trovata tra il mercato azionario e la qualità dell'aria in una delle altre 43 principali città degli Stati Uniti.

Per interpretare questo risultato, Neidell ha fatto riferimento a studi che suggeriscono che una minore capacità cognitiva può portare a un comportamento più avverso al rischio. (14,15) "Per gli agenti di cambio, ciò potrebbe significare che le loro decisioni si spostano verso investimenti meno rischiosi," ipotizza.

Un indice ampiamente utilizzato per l'avversione al rischio di mercato, (16,17) noto come "indice della paura", era anche correlato ai livelli di $PM_{2.5}$ a New York nello studio di Neidell, a sostegno della sua ipotesi. Il rapporto con l'S&P 500 era sorprendentemente forte; ad esempio, un aumento dell'inquinamento da particolato dalla deviazione standard è stato associato a una riduzione del 11,9% dei rendimenti nella giornata.

I risultati hanno implicazioni di ampia portata perché "le variazioni dei prezzi delle azioni inviano segnali di investimento in tutta l'economia americana e internazionale", hanno scritto gli autori. (13) Un'associazione simile è stata segnalata per oltre 100.000 investitori presso una società di intermediazione tedesca. (18)

Le prove indicano il subdolo impatto che può avere l'inquinamento atmosferico sulla produttività dei dipendenti. Un team ha riportato un'associazione tra i livelli superiori nell'ambiente di $PM_{2.5}$ e i rendimenti di borsa ridotti, forse a causa della maggiore avversione al rischio. Immagine: © iStockphoto/kasto80.

Per dare seguito a questi risultati intriganti, Neidell sta facendo uno studio nel campus. Sta verificando se la capacità decisionale degli studenti della Columbia University varia con i livelli di PM₂₅ esterno, misurati nell'edificio in cui vengono valutati gli studenti.

Questo approccio si sta muovendo nella direzione di un recente studio (19) sugli inquinanti dell'aria interna condotto da Allen. Simile nello spirito a uno studio sperimentale sull'inquinamento del traffico nel 1970, (20) assegnò casualmente diversi livelli d'inquinanti e di ventilazione ai partecipanti in un ufficio, poi ha chiesto loro di completare un test cognitivo alla fine della giornata. I partecipanti e gli analisti che hanno superato i test erano accecati dallo stato di esposizione e ogni persona era il proprio controllo.

I punteggi dei test erano significativamente più alti in una stanza con livelli di VOC più bassi. I ricercatori hanno riportato risultati simili per i livelli relativamente bassi di anidride carbonica (CO₂), un marcatore di ventilazione ritenuto per lungo tempo benigno a concentrazioni interne tipiche. Uno studio successivo del team di Allen ha scoperto che i piloti delle compagnie aeree hanno ottenuto prestazioni migliori durante le manovre avanzate (come volare con un solo motore in un simulatore di volo) se esposti a minori quantità di CO₂, rispetto ad esposizioni più elevate. (21) Questa scoperta supporta ulteriormente il ruolo della CO₂ come potenziale inquinante indoor. (22)

Nello studio originale degli impiegati dell'ufficio, (19) i punteggi dei test nelle sale a bassa emissione di VOC e di CO₂ erano ancora più alti con l'aumentare dei tassi di ventilazione. Il team di Allen ha stimato il costo per aumentare gli standard di ventilazione degli edifici dagli attuali 20 piedi cubi al minuto per persona (cfm/p) a 40 cfm/p in una serie di zone climatiche statunitensi. I ricercatori hanno previsto che i costi energetici annuali aggiuntivi sarebbero al massimo di \$ 40 a persona, ma che le aziende guadagnerebbero \$ 6.500 per dipendente da una maggiore produttività. (23)

"Chiaramente, i benefici [stimati] del miglioramento della salute e della produttività umana superano ampiamente i costi ", afferma Allen. **"Per troppo tempo, l'attenzione si è concentrata sull'efficienza energetica e la salute è stata lasciata fuori dall'equazione. Ma i due concetti non si escludono a vicenda. "**

Altri studi, principalmente degli inquinanti esterni, sono coerenti con i rapporti di Allen secondo cui le esposizioni a breve termine possono compromettere una sana funzione cerebrale, non solo quella degli adulti in età lavorativa negli edifici con uffici e sugli aeroplani, ma anche degli scolari.

Ad esempio, i ricercatori guidati da Jordi Sunyer, professore di medicina preventiva e salute pubblica presso l'Università Pompeu Fabra di Barcellona, in Spagna, hanno scoperto che l'aumento del livello giornaliero d'inquinamento atmosferico legato al traffico era associato a una riduzione della durata dell'attenzione degli scolari nelle scuole elementari. (24) In Israele, i livelli giornalieri più alti di PM_{2.5} sono stati associati a prestazioni ridotte da parte degli studenti delle scuole superiori all'esame Bagrut, che ha un impatto sull'ammissione all'università. (3) I livelli di PM_{2.5} sono stati anche associati a un numero inferiore di anni di istruzione post-secondaria e a una riduzione delle retribuzioni mensili, basata sul follow-up a 28-30 anni di età. (3)

Effetti a lungo termine degli inquinanti atmosferici sul cervello

Altri studi hanno studiato l'effetto delle esposizioni croniche sul feto e nell'infanzia. Il gruppo di Frederica Perera alla Columbia University ha condotto un lavoro pionieristico in quest'area, dimostrando che l'esposizione prenatale agli idrocarburi policiclici aromatici trasportati dall'aria era associata a ritardo cognitivo dello sviluppo a 3 anni. (25)

Altri studi hanno associato **un'esposizione prolungata agli inquinanti atmosferici nell'utero o durante l'infanzia con prestazioni accademiche ridotte, (26,27,28) un maggiore rischio di disturbo dello spettro autistico, (29,30) e guadagni inferiori degli adulti.** (31) Per gli anziani, la maggior parte degli studi di esposizione a lungo termine ha trovato **associazioni con il declino cognitivo e le malattie neurodegenerative.**2,32

In Cina, un recente studio condotto da un gruppo di esperti ha attirato l'attenzione degli scienziati e dei media tradizionali. In un campione rappresentativo a livello nazionale di oltre 25.000 bambini e adulti in 162 contee, un indice d'inquinamento atmosferico più elevato era associato a **una riduzione delle funzioni cognitive, con impatti più forti stimati per le esposizioni a lungo termine (fino a 3 anni) rispetto a quelle a breve termine (da 1 a 7 giorni).** (33)

I ricercatori hanno correlato i punteggi matematici e verbali di due ondate di test d'ingresso della contea (nel 2010 e 2014) con i dati di 402 stazioni di monitoraggio della qualità dell'aria nelle città cinesi. Complessivamente, i livelli d'inquinanti erano più alti che negli Stati Uniti e in Europa, ma paragonabili ad altre parti del mondo in via di sviluppo.

Negli Stati Uniti, uno studio di questa scala - un campione di grandi dimensioni con una vasta gamma di età ed esposizioni altamente variabili, ma la stessa valutazione cognitiva - non sarà possibile, dice Jiu-Chiuan Chen, professore associato di prevenzione medica presso l'Università della California del sud. Ma le scoperte cinesi di un'associazione più forte tra uomini più anziani e meno istruiti potrebbero fare eco nelle popolazioni statunitensi, nonostante i livelli più bassi di inquinamento atmosferico nelle città americane.

Gli studi hanno mostrato associazioni negative tra i livelli d'inquinamento atmosferico e le prestazioni dei test. Le scarse prestazioni nei test di alto livello e negli esami di ammissione possono avere implicazioni a lungo termine per il potenziale di guadagno di uno studente. (3)
Immagine: © Hero Images.

"Abbiamo visto prove simili per il dimorfismo sessuale e le disparità socioeconomiche nella neurotossicità del nostro studio ", afferma Chen. "Una maggiore esposizione al PM_{2.5} nel sud della California (28) **era associata a una ridotta intelligenza negli adolescenti e nei giovani adulti, con una [associazione] più forte nei maschi e nelle famiglie con uno stato socioeconomico inferiore** ".

Nel loro studio, gli autori hanno misurato i punteggi del QI con la scala di intelligenza abbreviata di Wechsler/ Wechsler Abbreviated Scale of Intelligence. (28) La potenziale modifica dell'effetto legato al sesso o alla classe sociale è una scoperta più recente, ma Chen sottolinea che lo studio cinese è una conferma convincente della ricerca che Lilian Calderón-Garcidueñas che ha condotto in un ambiente altamente inquinato più di 15 anni fa. Ora presso l'Università del Montana a Missoula, lei è stata la prima scienziata a collegare l'inquinamento dell'aria e la neurodegenerazione dai primi anni 2000, a cominciare con il cervello dei cani di Città del Messico (34), seguita da studi sui bambini (35) e sugli adulti (36) che continuano ancora oggi.

Meccanismi biologici: la neurotossicità dell'inquinamento atmosferico urbano

Il lavoro pionieristico della Calderón-Garcidueñas ha ispirato l'interesse di Michelle Block per i meccanismi con cui gli inquinanti atmosferici danneggiano il cervello. Già nel 2002, il consulente post-dottorato di Block l'aveva avvertito che questo argomento sarebbe stato "molto più sporco - much dirtier" rispetto allo studio di un singolo metallo o diserbante. Questo, in sintesi, ha descritto la più grande sfida nel determinare quale componente specifico dell'inquinamento dell'aria urbana danneggia quale tipo di cellula, sia come PM_{2.5} e sia come VOC che sono miscele altamente complesse di molti prodotti chimici diversi.

Tuttavia, l'avvertimento non ha scoraggiato Block, che ora è un professore associato di anatomia e biologia cellulare all'Università dell'Indiana. Eppure, molti anni dopo, dice, **non sappiamo ancora esattamente cosa entri nel cervello e attraverso quale pathway (via) biologica.**

Alcuni neurotossicologi stanno perseguendo l'ipotesi di una **via di traslocazione diretta**. Le particelle ultrafini possono raggiungere il cervello attraverso il bulbo olfattivo o attraversando la barriera emato-encefalica (37,38,39) e procedere nel danneggiare alcune delle cellule altamente specializzate: circa 100 miliardi di neuroni e qualche trilione di cellule di supporto gliale, tra cui oligodendrociti, astrociti e microglia.

Block, tuttavia, punta sulla strada indiretta. (40,41) "Il mio laboratorio studia come il danno polmonare periferico abbia un impatto sul cervello attraverso la circolazione di fattori sierici che comunicano un effetto biologico al cervello", spiega. "Questo lo chiamiamo asse polmone-cervello."

Sia che si tratti della via diretta o indiretta, almeno una parte dei danni sembra essere mediata dalla microglia, cellule immunitarie residenti del cervello. Entrambi gli studi in vivo e in vitro suggeriscono che **gli inquinanti atmosferici attivano queste cellule e innescano processi infiammatori.** (42) Nei ratti esposti ai gas di scarico diesel, Block ha riscontrato la maggiore risposta nelle regioni del cervello con la più alta densità microgliale. (40) Coerentemente con questa osservazione, uno studio recente (43) ha implicato la microglia nel declino cognitivo associato all'obesità nei topi.

"Abbiamo imparato molto sui diversi ruoli della microglia e su come interagisce con il sistema immunitario periferico", afferma Block. "Poiché sappiamo che supporta il normale apprendimento e la memoria, trovo plausibile che l'inquinamento atmosferico possa influire sulle capacità cognitive dei cervelli sani attraverso i suoi effetti sulla microglia, ma non è stato ancora dimostrato."

Come l'effetto "Pac-Men" (*n.t.d. tratto dal nome del famoso videogame*) del cervello, (44) parte del ruolo quotidiano della microglia è la potatura delle sinapsi che non sono più necessarie. Le sinapsi sono le strutture fisiche che i neuroni usano per comunicare tra loro. **Con un'esposizione a lungo termine agli inquinanti atmosferici, Block ritiene che i segnali periferici possano in qualche modo riprogrammare la microglia per guidare l'infiammazione cronica e lo stress ossidativo.** Ciò può portare a un impatto duraturo sullo sviluppo e sulla funzione del cervello, spiegando come gli inquinanti atmosferici possano aumentare il rischio per il neurosviluppo e le malattie neurodegenerative.

Block sottolinea che si tratta di ipotesi di lavoro che devono ancora essere accuratamente testate in modelli sperimentali. Lucio Costa, professore di scienze della salute ambientale e occupazionale presso l'Università di Washington, concorda con tale valutazione.

"Rispetto ai metalli e ai pesticidi, studiare gli effetti neurotossici degli inquinanti atmosferici è una scienza molto recente ", afferma Costa. "Credo che la microglia svolga un ruolo centrale e sia il legame tra le malattie del neurosviluppo e quelle neurodegenerative, ma c'è ancora molto lavoro da fare per approfondire i dettagli meccanicistici che causano i danni al cervello e il modo in cui l'infiammazione periferica contribuisce a questo."

Studi sui topi suggeriscono che le regioni del cervello con un'alta densità di microglia possono essere particolarmente sensibili alle sostanze inquinanti dello scarico diesel. (40)
L'attivazione della microglia, le cellule immunitarie residenti nel cervello, **può innescare processi infiammatori e stress ossidativo**. Immagine: © Maren Winter/Shutterstock.

Costa e Block hanno alcune idee su dove potrebbero portare gli studi futuri. Entrambi credono che le immagini del cervello provenienti da grandi coorti con esposizione ambientale a lungo termine e i dati dei test cognitivi (45,46,47,48) forniscano una guida valida per il lavoro sperimentale. Pensano anche che i campioni di siero possano aiutare a valutare il ruolo del danno periferico.

Qual è il prossimo passo?

Finora, la maggior parte degli studi sull'uomo hanno applicato i modelli atmosferici ai dati provenienti dai monitor dell'EPA statunitensi per stimare l'esposizione personale agli inquinanti nei luoghi di interesse. Ora che la tecnologia ha ridotto il prezzo di alcuni monitor personali a qualche centinaio di dollari, i ricercatori stanno iniziando a utilizzare queste apparecchiature per migliorare la precisione delle loro stime di esposizione.

"Per il PM_{2.5}, alcuni dei dispositivi di consumo presenti sul mercato stanno mostrando un buon accordo con gli strumenti di laboratorio più costosi ", afferma Kirsten Koehler, professore associato di salute ambientale e ingegneria presso la Johns Hopkins University. "Ma i VOC sono ancora più eterogenei e molto più difficili da misurare [rispetto al] PM_{2.5} e anche le particelle ultrafini sono ancora molto impegnative".

In uno dei progetti in corso di Koehler, gli investigatori stanno impiegando per la ricerca - monitor tipo consumer - presso le scuole pubbliche della regione del Medio Atlantico per studiare l'impatto dei progetti di ristrutturazione volti a migliorare la qualità dell'aria interna. Utilizzando confronti prima e dopo, i ricercatori testeranno se i livelli ridotti di inquinanti interni sono associati a migliori prestazioni accademiche .

I risultati incoraggianti di questo tipo di studio sono già stati riportati per 65 scuole elementari nel Texas, anche senza misurare gli inquinanti. (49) A seguito dei tipici progetti di risanamento dalle muffe e per il miglioramento della ventilazione, gli studenti hanno ottenuto punteggi più alti nei test di matematica e di lettura. L'autore ha concluso che tali ristrutturazioni "possono essere un modo più economico per migliorare i punteggi dei test standardizzati rispetto alle riduzioni delle dimensioni delle classi".

Questo risultato era coerente con i calcoli di Allen per l'effetto positivo dell'aumento dei livelli di ventilazione sulla produttività umana. Nell'ambito della missione del suo gruppo per promuovere la progettazione di edifici sani in tutto il mondo, stanno ora iscrivendo centinaia di impiegati da almeno cinque paesi per uno studio longitudinale. Il team sta utilizzando monitor per misurare gli inquinanti dell'aria negli edifici con uffici e dei dispositivi indossabili per raccogliere informazioni sulla salute di ciascun lavoratore. Un'app per smartphone di nuova concezione fornisce ai partecipanti sintesi dei dati e un promemoria per completare i sondaggi cognitivi.

L'interesse per i monitor sulla qualità dell'aria a basso costo va oltre il mondo accademico. Nella Contea Imperiale della California, al confine tra Stati Uniti e Messico, Paul English sta aiutando i residenti a tenere sotto controllo le proprie esposizioni con una delle più grandi reti di monitoraggio dell'aria nella comunità del paese. (50) Circa la metà dei monitor PM è nelle scuole pubbliche, collegati a un sistema di allarme online che consente agli studenti di ripararsi durante le giornate di aria molto inquinata, di seguire percorsi diversi per andare a scuola o di utilizzare inalatori. English, un consulente scientifico senior presso il Dipartimento di Sanità Pubblica della California, spera che questo esempio possa ispirare progetti simili in altre comunità.

Questo può essere particolarmente importante per alcune delle 85.000 scuole pubbliche negli Stati Uniti che sono state recentemente analizzate **per le disparità socio-economiche legate all'inquinamento atmosferico**. (51) Questo studio ha scoperto che i bambini delle minoranze nei quartieri poveri sono i più esposti, con implicazioni a lungo termine per il loro futuro potenziale accademico e di guadagno.

Koehler applaude agli sforzi di monitoraggio delle comunità come quelle della California. "È compito del governo migliorare la qualità dell'aria a livello statale e nazionale, ma penso che sia fantastico che la tecnologia perfezionata fornisca alle persone informazioni fruibili per ridurre le proprie esposizioni", afferma.

Allen osserva che la traduzione dei risultati della salute pubblica in impatti economici è importante perché le considerazioni finanziarie guidano molte delle decisioni politiche. "Quando si mettono insieme tutti questi campi diversi - tossicologia, valutazione dell'esposizione, epidemiologia ed economia sanitaria - che supportano un'associazione negativa dell'inquinamento atmosferico con la produttività e l'apprendimento umano", aggiunge, "diventa una potente motivazione per un'azione normativa."

Silke Schmidt, PhD, scrive di scienza, salute e ambiente dal Madison, Wisconsin.

Referenze

1. U.S. EPA (U.S. Environmental Protection Agency). 2011. The Benefits and Costs of the Clean Air Act from 1990 to 2020. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-07/documents/summaryreport.pdf> [accessed 12 March 2019]. Google Scholar
2. Kilian J, Kitazawa M. 2018. The emerging risk of exposure to air pollution on cognitive decline and Alzheimer's disease—evidence from epidemiological and animal studies. *Biomed J* 41(3):141–162, PMID: 30080655, 10.1016/j.bj.2018.06.001. Crossref, Medline, Google Scholar

3. Ebenstein A, Lavy V, Roth S. 2016. The long-run economic consequences of high-stakes examinations: evidence from transitory variation in pollution. *Am Econ J Appl Econ* 8(4):36–65, 10.1257/app.20150213. Crossref, Google Scholar
4. Graff Zivin J, Neidell M. 2018. Air pollution's hidden impacts. *Science* 359(6371):39–40, PMID: 29302005, 10.1126/science.aap7711. Crossref, Medline, Google Scholar
5. U.S. EPA. Outdoor Air Quality Data: Air Data Basic Information. <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/air-data-basic-information> [accessed 18 March 2019]. Google Scholar
6. U.S. EPA. 2018. Indoor Air Quality. Report on the Environment. 2018. <https://www.epa.gov/report-environment/indoor-air-quality> [accessed 11 Dec 2018]. Google Scholar
7. McDonald BC, de Gouw JA, Gilman JB, Jathar SH, Akherati A, Cappa CD, et al. 2018. Volatile chemical products emerging as largest petrochemical source of urban organic emissions. *Science* 359(6377):760–764, PMID: 29449485, 10.1126/science.aaq0524. Crossref, Medline, Google Scholar
8. Health Effects Institute. 2018. State of Global Air 2018. <https://www.stateofglobalair.org/> [accessed 11 December 2018]. Google Scholar
9. Zivin JG, Neidell M. 2012. The impact of pollution on worker productivity. *Am Econ Rev* 102(7):3652–3673, PMID: 26401055, 10.1257/aer.102.7.3652. Crossref, Medline, Google Scholar
10. Chang T, Zivin JG, Gross T, Neidell M. 2016. Particulate pollution and the productivity of pear packers. *Am Econ J Econ Pol* 8(3):141–169, 10.1257/pol.20150085. Crossref, Google Scholar
11. Chang TY, Zivin JG, Gross T, Neidell M, et al. 2019. The effect of pollution on worker productivity: evidence from call center workers in China. *Am Econ J Appl Econ* 11(1):151–172, 10.1257/app.20160436. Crossref, Google Scholar
12. U.S. EPA. Outdoor Air Quality Data: Air Quality Index Daily Values Report. <https://www.epa.gov/outdoor-air-quality-data/air-quality-index-daily-values-report> [accessed 3 April 2019]. Google Scholar
13. Heyes A, Neidell M, Saberian S. 2016. The effect of air pollution on investor behavior: evidence from the S&P 500. NBER working paper no. 22753. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research. <https://www.nber.org/papers/w22753> [accessed 11 December 2018]. Google Scholar
14. Dohmen T, Falk A, Huffman D, Sunde U. 2010. Are risk aversion and impatience related to cognitive ability? *Am Econ Rev* 100(3):1238–1260, 10.1257/aer.100.3.1238. Crossref, Google Scholar
15. Rabin M, Weizsäcker G. 2009. Narrow bracketing and dominated choices. *Am Econ Rev* 99(4):1508–1543, 10.1257/aer.99.4.1508. Crossref, Google Scholar
16. Coudert V, Gex M. 2008. Does risk aversion drive financial crises? Testing the predictive power of empirical indicators. *J Empir Finance* 15(2):167–184, 10.1016/j.jempfin.2007.06.001. Crossref, Google Scholar
17. Whaley RE. 2009. Understanding the VIX. *J Portfolio Manage* 35(3):98–105, 10.3905/JPM.2009.35.3.098. Crossref, Google Scholar
18. Meyer S, Pagel M. Fresh air eases work: the effect of air quality on individual investor activity. New York, NY: Columbia University, Columbia University in the City of New York, Columbia Business School Research Archive. <https://www8.gsb.columbia.edu/researcharchive/articles/25560> [accessed 11 December 2018]. Google Scholar
19. Allen JG, MacNaughton P, Satish U, Santanam S, Vallarino J, Spengler JD. 2016. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic

- compound exposures in office workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. *Environ Health Perspect* 124(6):805–812, PMID: 26502459, 10.1289/ehp.1510037. Link, Google Scholar
20. Lewis J, Baddeley AD, Bonham KG, Lovett D. 1970. Traffic pollution and mental efficiency. *Nature* 225(5227):95–97, 10.1038/225095a0. Crossref, Medline, Google Scholar
 21. Allen JG, MacNaughton P, Cedeno-Laurent JG, Cao X, Flanigan S, Vallarino J, et al. 2018. Airplane pilot flight performance on 21 maneuvers in a flight simulator under varying carbon dioxide conditions. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, PMID: 30089876, 10.1038/s41370-018-0055-8. Crossref, Medline, Google Scholar
 22. Satish U, Mendell MJ, Shekhar K, Hotchi T, Sullivan D, Streufert S, et al. 2012. Is CO₂ an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO₂ concentrations on human decision-making performance. *Environ Health Perspect* 120(12):1671–1677, PMID: 23008272, 10.1289/ehp.1104789. Link, Google Scholar
 23. MacNaughton P, Pegues J, Satish U, Santanam S, Spengler J, Allen J. 2015. Economic, environmental and health implications of enhanced ventilation in office buildings. *Int J Environ Res Public Health* 12(11):14709–14722, PMID: 26593933, 10.3390/ijerph121114709. Crossref, Medline, Google Scholar
 24. Sunyer J, Suades-González E, García-Esteban R, Rivas I, Pujol J, Alvarez-Pedrerol M, et al. 2017. Traffic-related air pollution and attention in primary school children: short-term association. *Epidemiology* 28(2):181–189, PMID: 27922536, 10.1097/EDE.0000000000000603. Crossref, Medline, Google Scholar
 25. Perera FP, Rauh V, Whyatt RM, Tsai W-Y, Tang D, Diaz D, et al. 2006. Effect of prenatal exposure to airborne polycyclic aromatic hydrocarbons on neurodevelopment in the first 3 years of life among inner-city children. *Environ Health Perspect* 114(8):1287–1292, PMID: 16882541, 10.1289/ehp.9084. Link, Google Scholar
 26. Marcotte DE. 2017. Something in the air? Air quality and children’s educational outcomes. *Econ Educ Rev* 56:141–151, 10.1016/j.econedurev.2016.12.003. Crossref, Google Scholar
 27. Bharadwaj P, Gibson M, Zivin JG, Neilson C. 2017. Gray matters: fetal pollution exposure and human capital formation. *J Assoc Environ Resour Econ* 4(2):505–542, 10.1086/691591. Crossref, Google Scholar
 28. Wang P, Tuvblad C, Younan D, Franklin M, Lurmann F, Wu J, et al. 2017. Socioeconomic disparities and sexual dimorphism in neurotoxic effects of ambient fine particles on youth IQ: a longitudinal analysis. *PLoS One* 12(12):e0188731, PMID: 29206872, 10.1371/journal.pone.0188731. Crossref, Medline, Google Scholar
 29. Costa LG, Cole TB, Coburn J, Chang Y-C, Dao K, Roque P, et al. 2014. Neurotoxicants are in the air: convergence of human, animal, and in vitro studies on the effects of air pollution on the brain. *Biomed Res Int* 2014:736385, PMID: 24524086, 10.1155/2014/736385. Crossref, Medline, Google Scholar
 30. Flores-Pajot M-C, Ofner M, Do MT, Lavigne E, Villeneuve PJ. 2016. Childhood autism spectrum disorders and exposure to nitrogen dioxide, and particulate matter air pollution: a review and meta-analysis. *Environ Res* 151:763–776, PMID: 27609410, 10.1016/j.envres.2016.07.030. Crossref, Medline, Google Scholar
 31. Isen A, Rossin-Slater M, Walker WR. 2017. Every breath you take—every dollar you’ll make: the long-term consequences of the Clean Air Act of 1970. *J Polit Econ* 125(3):848–902, 10.1086/691465. Crossref, Google Scholar
 32. Power MC, Adar SD, Yanosky JD, Weuve J. 2016. Exposure to air pollution as a potential contributor to cognitive function, cognitive decline, brain imaging, and dementia: a systematic review of epidemiologic research. *Neurotoxicology* 56:235–253, PMID: 27328897, 10.1016/j.neuro.2016.06.004. Crossref, Medline, Google Scholar

33. Zhang X, Chen X, Zhang X. 2018. The impact of exposure to air pollution on cognitive performance. *Proc Natl Acad Sci USA* 115(37):9193–9197, PMID: 30150383, 10.1073/pnas.1809474115. Crossref, Medline, Google Scholar
34. Calderón-Garcidueñas L, Azzarelli B, Acuna H, Garcia R, Gambling TM, Osnaya N, et al. 2002. Air pollution and brain damage. *Toxicol Pathol* 30(3):373–389, PMID: 12051555, 10.1080/01926230252929954. Crossref, Medline, Google Scholar
35. Calderón-Garcidueñas L, González-Maciel A, Reynoso-Robles R, Kulesza RJ, Mukherjee PS, Torres-Jardón R, et al. 2018. Alzheimer's disease and alpha-synuclein pathology in the olfactory bulbs of infants, children, teens and adults ≤ 40 years in Metropolitan Mexico City. APOE4 carriers at higher risk of suicide accelerate their olfactory bulb pathology. *Environ. Res* 166:348–362, PMID: 29935448, 10.1016/j.envres.2018.06.027. Crossref, Medline, Google Scholar
36. Calderón-Garcidueñas L, Mukherjee PS, Kulesza RJ, Torres-Jardón R, Hernández-Luna J, Ávila-Cervantes R, et al. 2019. Mild cognitive impairment and dementia involving multiple cognitive domains in Mexican urbanites. *J Alzheimers Dis* 68(3):1113–1123, PMID: 30909241, <https://content.iospress.com/articles/journal-of-alzheimers-disease/jad181208>. Medline, Google Scholar
37. Oberdörster G, Sharp Z, Atudorei V, Elder A, Gelein R, Kreyling W, et al. 2004. Translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicol* 16(6–7):437–445, PMID: 15204759, 10.1080/08958370490439597. Crossref, Medline, Google Scholar
38. Block ML, Calderón-Garcidueñas L. 2009. Air pollution: mechanisms of neuroinflammation and CNS disease. *Trends Neurosci* 32(9):506–516, PMID: 19716187, 10.1016/j.tins.2009.05.009. Crossref, Medline, Google Scholar
39. Maher BA, Ahmed IAM, Karloukovski V, MacLaren DA, Foulds PG, Allsop D, et al. 2016. Magnetite pollution nanoparticles in the human brain. *Proc Natl Acad Sci USA* 113(39):10797–10801, PMID: 27601646, 10.1073/pnas.1605941113. Crossref, Medline, Google Scholar
40. Levesque S, Taetzsch T, Lull ME, Kodavanti U, Stadler K, Wagner A, et al. 2011. Diesel exhaust activates and primes microglia: air pollution, neuroinflammation, and regulation of dopaminergic neurotoxicity. *Environ Health Perspect* 119(8):1149–1155, PMID: 21561831, 10.1289/ehp.1002986. Link, Google Scholar
41. Mumaw CL, Levesque S, McGraw C, Robertson S, Lucas S, Stafflinger JE, et al. 2016. Microglial priming through the lung-brain axis: the role of air pollution-induced circulating factors. *FASEB J* 30(5):1880–1891, PMID: 26864854, 10.1096/fj.201500047. Crossref, Medline, Google Scholar
42. Block ML, Elder A, Auten RL, Bilbo SD, Chen H, Chen J-C, et al. 2012. The outdoor air pollution and brain health workshop. *Neurotoxicology* 33(5):972–984, PMID: 22981845, 10.1016/j.neuro.2012.08.014. Crossref, Medline, Google Scholar
43. Cope EC, LaMarca EA, Monari PK, Olson LB, Martinez S, Zych AD, et al. 2018. Microglia play an active role in obesity-associated cognitive decline. *J Neurosci* 38(41):8889–8904, PMID: 30201764, 10.1523/JNEUROSCI.0789-18.2018. Crossref, Medline, Google Scholar
44. Stevens B. 2015. Big idea: the brain's best kept secret. *Popular Science*, Health section, online edition. 22 December 2015. <https://www.popsci.com/big-idea-brains-best-kept-secret> [accessed 11 December 2018]. Google Scholar
45. Chen J-C, Wang X, Wellenius GA, Serre ML, Driscoll I, Casanova R, et al. 2015. Ambient air pollution and neurotoxicity on brain structure: evidence from Women's Health Initiative Memory Study. *Ann Neurol* 78(3):466–476, PMID: 26075655, 10.1002/ana.24460. Crossref, Medline, Google Scholar
46. Wilker EH, Preis SR, Beiser AS, Wolf PA, Au R, Kloog I, et al. 2015. Long-term exposure to fine particulate matter, residential proximity to major roads and measures of brain

- structure. *Stroke* 46(5):1161–1166, PMID: 25908455, 10.1161/STROKEAHA.114.008348. Crossref, Medline, Google Scholar
47. Wilker EH, Martinez-Ramirez S, Kloog I, Schwartz J, Mostofsky E, Koutrakis P, et al. 2016. Fine particulate matter, residential proximity to major roads, and markers of small vessel disease in a memory study population. *J Alzheimers Dis* 53(4):1315–1323, PMID: 27372639, 10.3233/JAD-151143. Crossref, Medline, Google Scholar
48. Power MC, Lamichhane AP, Liao D, Xu X, Jack CR, Gottesman RF, et al. 2018. The association of long-term exposure to particulate matter air pollution with brain MRI findings: the ARIC study. *Environ Health Perspect* 126(2):027009, PMID: 29467108, 10.1289/EHP2152. Link, Google Scholar
49. Tafford TM. 2015. Indoor air quality and academic performance. *J Environ Econ Manage* 70:34–50, 10.1016/j.jeem.2014.11.002. Crossref, Google Scholar
50. English PB, Olmedo L, Bejarano E, Lugo H, Murillo E, Seto E, et al. 2017. The Imperial County Community Air Monitoring Network: a model for community-based environmental monitoring for public health action. *Environ Health Perspect* 125(7):074501, PMID: 28886604, 10.1289/EHP1772. Link, Google Scholar
51. Grineski SE, Collins TW. 2018. Geographic and social disparities in exposure to air neurotoxicants at U.S. public schools. *Environ Res* 161:580–587, PMID: 29245126, 10.1016/j.envres.2017.11.047. Crossref, Medline, Google Scholar
52. Riesenber DE, Arehart-Treichel J. 1986. “Sick building” syndrome plagues workers, dwellers. *JAMA* 255(22):3063, PMID: 3702012, 10.1001/jama.1986.03370220021005. Crossref, Medline, Google Scholar
53. USGBC (U.S. Green Building Council). 2014. LEED v4 User Guide. Washington DC:U.S. Green Building Council. <http://www.usgbc.org/resources/leed-v4-user-guide> [accessed 4 March 2019]. Google Scholar