

Qualità dell'aria

2



INTRODUZIONE

La qualità dell'aria è uno dei principali fattori di rischio ambientale per la salute dell'uomo e per l'ambiente nel suo complesso.

Numerosi e significativi sono i segnali di miglioramento della qualità dell'aria presenti in Europa e in Italia: le emissioni dei principali inquinanti continuano infatti a diminuire, così come i livelli atmosferici mostrano *trend* decrescenti. Questi segnali positivi sono però insufficienti e la situazione della qualità dell'aria permane critica: per il particolato atmosferico, il biossido di azoto e l'ozono troposferico in particolare si continuano a registrare livelli elevati, che troppo spesso superano gli *standard* normativi in aree molto vaste. Nel quadro europeo, l'Italia con il bacino padano, rappresenta una delle aree di maggior criticità.

Il rischio collegato all'inquinamento atmosferico è ben presente anche nella consapevolezza individuale dei cittadini europei, come risulta dall'Eurobarometro del 2014, dal quale emerge che la maggiore preoccupazione dei cittadini (56%) è relativa proprio all'inquinamento atmosferico¹.

Una particolare attenzione merita il benzo(a)pirene, idrocarburo policiclico aromatico di accertata cancerogenicità (IARC², Gruppo 1), costituente del particolato atmosferico prodotto nei processi di combustione. Il benzo(a)pirene è l'unico inquinante, tra quelli regolamentati dalle Direttive europee 2008/50/CE³ e 2004/107/CE⁴ e dal D.Lgs. 155/2010⁵, a presentare livelli atmosferici in crescita in Europa e in Italia. Questo aspetto è strettamente legato alle crescenti emissioni di particolato, soprattutto PM_{2,5}, dalla combustione delle biomasse per il riscaldamento domestico. Negli ultimi anni l'uso delle biomasse per il riscaldamento domestico, incentivato nel piano nazionale per le energie rinnovabili, si è diffuso ampiamente assumendo un ruolo piuttosto importante; in particolar modo è cresciuto l'utilizzo della legna per il suo basso costo e per una generalizzata percezione che questa scelta sia *green*. Se da un lato il crescente uso della legna ha contribuito alla riduzione di CO₂, e quindi al raggiungimento degli obiettivi del Protocollo di Kyoto⁶, dall'altro è diventato una sorgente rilevante di polveri e composti tossici come il benzo(a)pirene.

La qualità dell'aria è uno dei principali fattori di rischio ambientale per la salute dell'uomo e per l'ambiente.

L'aumentato impiego di legna per il riscaldamento domestico è la causa dei crescenti livelli atmosferici di benzo(a)pirene.

¹ http://ec.europa.eu/public_opinion/archives/ebs/ebs_416_en.pdf

² *International Agency for Research on Cancer* (<http://www.iarc.fr>)

³ Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008, relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa

⁴ Direttiva 2004/107/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 15 dicembre 2004, concernente l'arsenico, il cadmio, il mercurio, il nickel e gli idrocarburi policiclici aromatici nell'aria ambiente

⁵ Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155. Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa

⁶ http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

È evidente che molto è necessario fare per una reale integrazione delle politiche ambientali sui cambiamenti climatici e sull'inquinamento atmosferico e, sul piano della comunicazione e formazione, per evitare che i comportamenti individuali siano condizionati da distorte percezioni del rischio.

Attualmente in Europa e in tutti i Paesi membri sono in corso i lavori per la realizzazione di un nuovo sistema di gestione e comunicazione di dati e informazioni sulla qualità dell'aria dai Paesi membri verso l'Europa (Commissione Europea e Agenzia Europea dell'Ambiente), finalizzato sia alla valutazione della conformità agli *standard* normativi sia allo scambio reciproco di dati sulla qualità dell'aria. Il precedente sistema, caratterizzato da differenti e non coordinati flussi di dati e informazioni, sarà sostituito, sulla base di quanto previsto nella Decisione 2011/850/UE⁷, da un nuovo sistema di *e-Reporting* basato sull'uso esclusivo di tecnologie informatiche e in allineamento alla Direttiva INSPIRE⁸. A livello nazionale, il nuovo sistema, denominato InfoARIA, di gestione e comunicazione dei dati di qualità dell'aria dal livello locale (regioni e province autonome) a quello centrale (ISPRA e Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare) e quello europeo è al momento in fase di sviluppo.

In Europa e in Italia sono in corso i lavori per la realizzazione di un nuovo sistema di gestione e comunicazione di dati e informazioni sulla qualità dell'aria.

Lo stato della qualità dell'aria

In Europa si continuano a registrare elevati livelli atmosferici e frequenti superamenti degli *standard* normativi per il particolato atmosferico, l'ozono troposferico (O₃), il biossido di azoto (NO₂) e anche il benzo(a)pirene⁹.

Nel 2012, il valore limite giornaliero del PM₁₀ (VLg, 50 µg/m³ da non superare più di 35 volte in un anno civile) è stato superato nella regione balcanica, in Bulgaria, Italia, Polonia, Slovacchia e Turchia e, più limitatamente nella penisola iberica e nel Nord Europa (Figura 2.1). Nei 28 paesi della UE, il 21% delle stazioni è risultato in superamento. Se consideriamo il valore di riferimento delle linee guida WHO (20 µg/m³ come media annuale)¹⁰, il 66% delle stazioni in Europa è in superamento.

Il *trend* decrescente, già registrato per il PM₁₀ nel periodo 2002-2011, è confermato per gli anni 2003-2012 nella quasi totalità delle stazioni (solo nel 2% delle stazioni si osserva un *trend* crescente).

Europa, 2012: PM₁₀, PM_{2,5}, NO₂, O₃, e B(a)P continuano a essere gli inquinanti più critici.

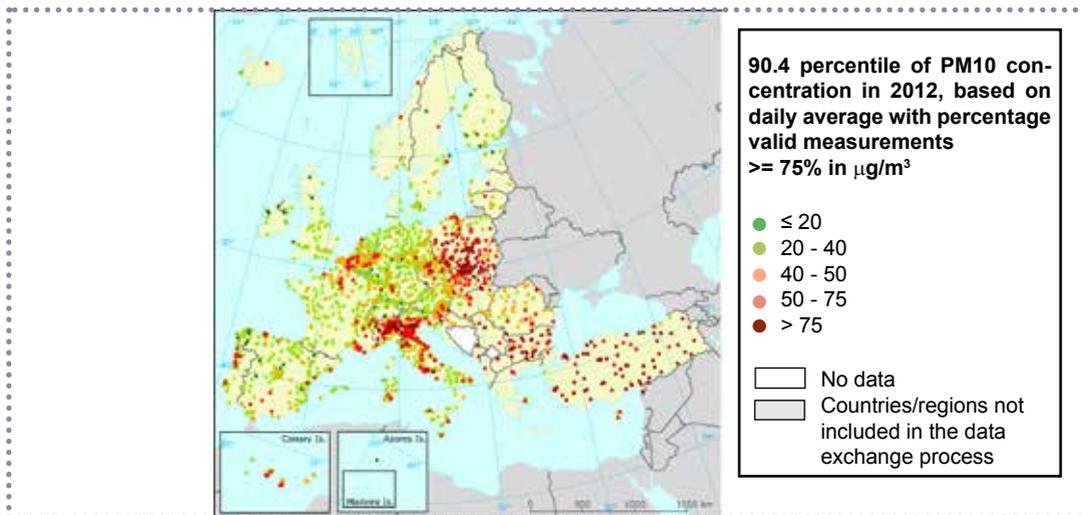
⁷ Decisione di esecuzione della Commissione del 12 dicembre 2011 recante disposizioni di attuazione delle direttive 2004/107/CE e 2008/50/CE del Parlamento europeo e del Consiglio per quanto riguarda lo scambio reciproco e la comunicazione di informazioni sulla qualità dell'aria ambiente (2011/850/UE)

⁸ Direttiva 2007/2/CE, che istituisce un'infrastruttura per l'informazione territoriale nella Comunità europea recepita in Italia con il D.Lgs. 27 gennaio 2010, n. 32

⁹ EEA Report N.5/2014, *Air quality in Europe-2014 report*

¹⁰ WHO (World Health Organization) 2013, *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project, tecnica report, World Health Organization, Regional office for Europe, Copenhagen, Denmark*

Figura 2.1: Concentrazioni di PM10 (2012) - Mappa dei superamenti del valore limite giornaliero qui rappresentati dal 90,4 percentile delle serie dei dati



Fonte: AirBase (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/airbase-the-european-air-quality-database-8>)

Nota:

I superamenti sono identificati dai punti di colore rosso e rosso scuro

Nel 2012, il valore limite giornaliero del PM10 è stato superato nella regione balcanica, in Bulgaria, Italia, Polonia, Slovacchia e Turchia e, più limitatamente nella penisola iberica e nel Nord Europa.

Per quanto riguarda il PM2,5, sebbene la copertura spaziale in Europa non sia ancora soddisfacente¹¹, superamenti del valore obiettivo (VO, 25 µg/m³, come media annua) si registrano in Bulgaria, nella Repubblica Ceca, in Italia, in Polonia, in Romania, in Slovacchia e in Francia (in quest'ultima un solo superamento in una stazione da traffico).

Il valore limite annuale del biossido di azoto (VLa, 40 µg/m³, come media annua) nel 2012 è superato nella gran parte dei paesi europei. La maggior parte dei superamenti si registra nelle stazioni da traffico (il 37% di quest'ultime è in superamento). Le concentrazioni di NO₂ mostrano un chiaro *trend* decrescente nel periodo 2003-2012.

I livelli di ozono mostrano un andamento crescente dal Nord al Sud Europa, con le concentrazioni più elevate nei paesi mediterranei. I livelli più elevati di ozono si registrano nelle stazioni rurali seguite dalle quelle di fondo urbane e da quelle orientate al traffico. Alte concentrazioni possono essere osservate in stazioni a elevata altitudine.

¹¹ Nel 2012, in Europa le serie di dati con copertura temporale superiore al 75% sono 926 (902 nel 2011)

Nel 2012 il valore obiettivo a lungo termine (OLT, 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, come media massima giornaliera sulle 8 ore) è superato nella gran parte dei paesi europei. Il valore di riferimento delle linee guida WHO (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ come media massima giornaliera sulle 8 ore) è rispettato solo in 2 delle 507 stazioni rurali di fondo.

I dati relativi al periodo 2003-2012 mostrano un generale debole *trend* decrescente¹².

Le aree maggiormente interessate da elevati livelli di benzo(a)pirene sono localizzate in Europa orientale e centrale, compresa l'Italia (bacino del Po)¹³. Il valore obiettivo del B(a)P (1 ng/m^3) è superato nel 45% delle stazioni. Il *trend*, costruito su un numero limitato di dati e riferito a un periodo di soli sei anni (2007-2012), mostra comunque un andamento crescente.

Anche in Italia il particolato atmosferico, l'ozono troposferico, il biossido di azoto e il benzo(a)pirene sono gli inquinanti per i quali si continuano a registrare livelli atmosferici superiori agli standard normativi (D.Lgs. 155/2010), soprattutto nel bacino padano e nelle grandi aree urbane. In quest'ultime in particolare, come risulta dal Rapporto Aree Urbane ed. X¹⁴, nel 2013 il valore limite giornaliero del PM10 è stato superato in circa la metà delle aree urbane indagate (totale aree urbane: 63); i valori più elevati sono stati registrati nel bacino padano e in alcune città del Centro, del Sud Italia e Isole.

Per quanto riguarda il PM2,5, è emersa una situazione di maggior rispetto dello *standard* normativo; infatti, nel 2013, in 40 aree urbane delle 48 indagate sono stati registrati livelli di PM2,5 inferiori al valore obiettivo.

Per l'ozono, l'obiettivo a lungo a termine per la protezione della salute umana nel 2013 è stato superato nella gran parte delle aree urbane: solo nel 9% (5 su un totale di 56 aree urbane) tutte le stazioni di monitoraggio sono risultate conformi all'OLT.

Nel 2013, il valore limite annuale per la protezione della salute umana del biossido di azoto è stato superato nel 45% delle 65 aree urbane indagate. I superamenti hanno riguardato molte aree urbane del bacino padano e alcune del Centro, del Sud e delle Isole.

Nel 2013, i dati per il benzo(a)pirene, disponibili solo per 36 aree urbane principalmente localizzate nel Nord Italia, hanno evidenziato il superamento del valore obiettivo (VO, 1,0 ng/m^3 come media annua) in 10 aree urbane.

Italia, 2013: nel 50% e nel 17% delle aree urbane, rispettivamente, il VLg del PM10 e il VO del PM2,5 sono superati.

Italia, O₃: nel 2013, nel 91% delle aree urbane l'OLT è superato.

Italia, NO₂: nel 2013 nel 45% delle aree urbane il VLa è superato.

Italia, B(a)P: nel 2013, nel 28% delle aree urbane il VO è superato.

¹² Nelle stazioni da traffico si registra il minor *trend* decrescente probabilmente a causa del minor consumo di O₃ da parte di NO come risultato della diminuzione delle emissioni da traffico di NOx

¹³ Nel Sud-Est dell'Europa il B(a)P ancora non è sufficientemente monitorato

¹⁴ <http://www.isprambiente.gov.it/it/publicazioni/publicazioni-del-sistema-agenziale/qualita-dellambiente-urbano-x-rapporto-edizione-2014>

Le emissioni dei principali inquinanti

Per comprendere il fenomeno dell'inquinamento atmosferico è fondamentale conoscere le emissioni degli inquinanti, dei loro precursori¹⁵ e il loro andamento nel tempo.

In Europa (EU28) le emissioni di ossidi di azoto (NO_x) si riducono dal 1990 al 2013 del 54%¹⁶.

L'Italia è tra i paesi che svolgono un ruolo determinante nella loro riduzione: sulla base dell'Inventario Nazionale delle Emissioni elaborato da ISPRA¹⁷, risulta infatti una decrescita delle emissioni nazionali del 60% a partire dal 1990 (la riduzione riscontrata nell'ultimo anno è circa il 5%).

Il settore che, a livello europeo, contribuisce maggiormente è il trasporto stradale (39%), seguito dalla produzione e distribuzione di energia (21%), dal settore commerciale, istituzionale e delle famiglie (15%). Anche in Italia il trasporto stradale, con un contributo del 49%, è il settore preponderante (19% le altre sorgenti mobili, 11% la combustione non industriale) nonostante la consistente riduzione delle emissioni riscontrata dal 1990 a seguito dell'installazione dei catalizzatori nei veicoli. Le altre principali misure che hanno contribuito all'abbattimento delle emissioni nazionali di NO_x sono l'adozione di misure volte al miglioramento dei processi di combustione e di tecnologie di abbattimento dei fumi nella produzione energetica e nell'industria, e il passaggio dall'olio e il carbone al gas naturale, come combustibile principale, così come la diminuzione dell'uso di combustibili fossili per la produzione di energia.

Le emissioni di composti organici volatili non metanici (COVNM) dal 1990 al 2013 mostrano una riduzione del 60% e del 53%, rispettivamente, a livello europeo e italiano.

In Europa il settore dell'utilizzo dei solventi, con un contributo circa del 45%, è il maggior responsabile. Nel 2013 l'Italia è tra i paesi che contribuiscono maggiormente alle emissioni (12,6% sul totale EU28). Anche in Italia l'utilizzo dei solventi, che contribuisce per il 40%, è il settore maggiormente responsabile. Il trasporto stradale, che rappresenta il 19% delle emissioni, è il settore che registra il decremento maggiore dal 1990, pari all'81% (l'introduzione di sistemi di controllo e limitazione dei processi evaporativi, come il *canister*, è stata determinante per la generale decrescita delle emissioni evaporative),

2013: le emissioni di NO_x continuano a diminuire in Europa e in Italia. Il settore dei trasporti si conferma come il principale settore emissivo.

2013: prosegue la diminuzione nelle emissioni di COVNM. L'utilizzo dei solventi è sempre il principale settore emissivo.

¹⁵ I precursori sono quelle sostanze che attraverso reazioni fotochimiche che avvengono in atmosfera portano alla formazione di altri inquinanti

¹⁶ European Union emission inventory report 1990–2012 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP), EEA Technical report n. 12/2014. <http://www.eea.europa.eu/publications/lrtap-2014>

¹⁷ <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni>

mentre la combustione non industriale, e in particolare della legna, contribuisce per il 22% al totale delle emissioni nazionali.

In Europa, le emissioni di particolato, PM10 e PM2,5, si riducono del 21%, a partire dal 2000; il riscaldamento civile rimane la principale fonte di emissioni con circa il 50% delle emissioni totali nel 2013 (mentre il 13% proviene dal trasporto stradale e il 10% dai processi industriali). In Italia, le emissioni di PM10 si riducono del 17% a partire dal 1990; nel 2013 dalla combustione non industriale si origina il 60% delle emissioni totali nazionali (più del triplo delle emissioni registrate nel 1990) mentre le emissioni dai trasporti su strada sono pari al 12% del totale. Il decremento più significativo dal 1990, pari a -97%, si registra nel settore della combustione nell'energia e nell'industria di trasformazione, che nel 2013 rappresentano meno dell'1% del totale. Per quanto riguarda il PM2,5, la riduzione, a partire dal 1990, è meno consistente (9%) e le emissioni per il riscaldamento degli edifici (prevalentemente con l'utilizzo della legna) rappresentano il 67% delle emissioni nazionali. L'Italia risulta tra i paesi che contribuiscono maggiormente al totale europeo (10,2% sul totale EU 28).

Le emissioni di idrocarburi policiclici aromatici (IPA)¹⁸ si mantengono sui livelli del 1990 (solo un aumento del 6%) in Italia, mentre decrescono del 53% in Europa.

Le emissioni del riscaldamento civile (73% del totale) registrano un forte incremento (pari a circa tre volte quelle del 1990) a causa della crescita dei consumi di biomassa per il riscaldamento degli edifici.

Dall'analisi del quadro emissivo nazionale ed europeo si evince un trend generalmente decrescente a partire dal 1990 anche per gli ossidi di zolfo (-92% in Italia e -87% in Europa), per l'ammoniaca, (-15% in Italia e -27% in Europa) e per il monossido di carbonio (-63% in Italia e -67% in Europa).

La Figura 2.2 illustra l'andamento decrescente delle emissioni nazionali dal 1990 al 2013 di alcuni inquinanti a fronte dell'aumento del PIL e del consumo energetico nazionale totale¹⁹. Per ulteriori approfondimenti sull'andamento delle emissioni consultare l'*Informative Inventory Report 2015*²⁰.

2013: le emissioni di PM10 e PM2,5 continuano a diminuire in Europa e Italia.

Il principale settore emissivo è il riscaldamento civile.

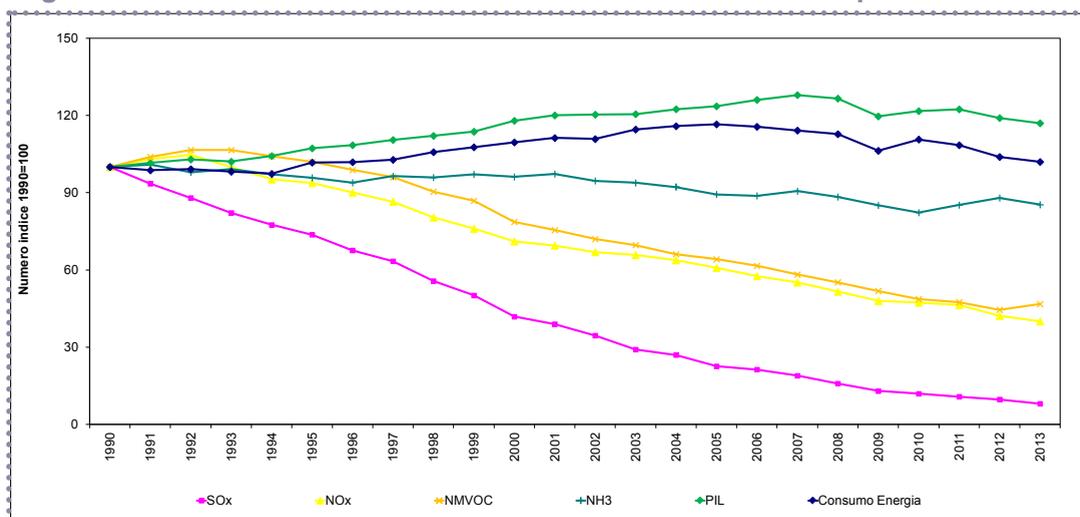
Le emissioni di IPA da riscaldamento civile aumentano fortemente a causa della crescita dei consumi della biomassa.

¹⁸ benzo(a)pirene, benzo(b)fluorantene, benzo(k)fluorantene e indeno(1,2,3-cd)pirene

¹⁹ Consumo interno lordo come riportato nel Bilancio energetico nazionale preparato dal Ministero dello sviluppo economico <http://dgerm.sviluppoeconomico.gov.it/dgerm/ben.asp>

²⁰ ISPRA, 2015. *Italian emission inventory 1990-2013. Informative inventory report 2015*. Rapporti 223/2015

Figura 2.2: Andamento delle emissioni nazionali di alcuni inquinanti



Fonte: ISPRA

Dall'analisi del quadro emissivo nazionale ed europeo si evince un trend generalmente decrescente a partire dal 1990.

Esposizione della popolazione

L'inquinamento atmosferico rimane uno dei principali fattori di rischio ambientale per la salute umana. Recenti studi hanno evidenziato che si possono presentare effetti dannosi sulla salute umana anche per esposizione a livelli molto bassi, inferiori ai livelli di riferimento indicati nelle linee guida WHO.

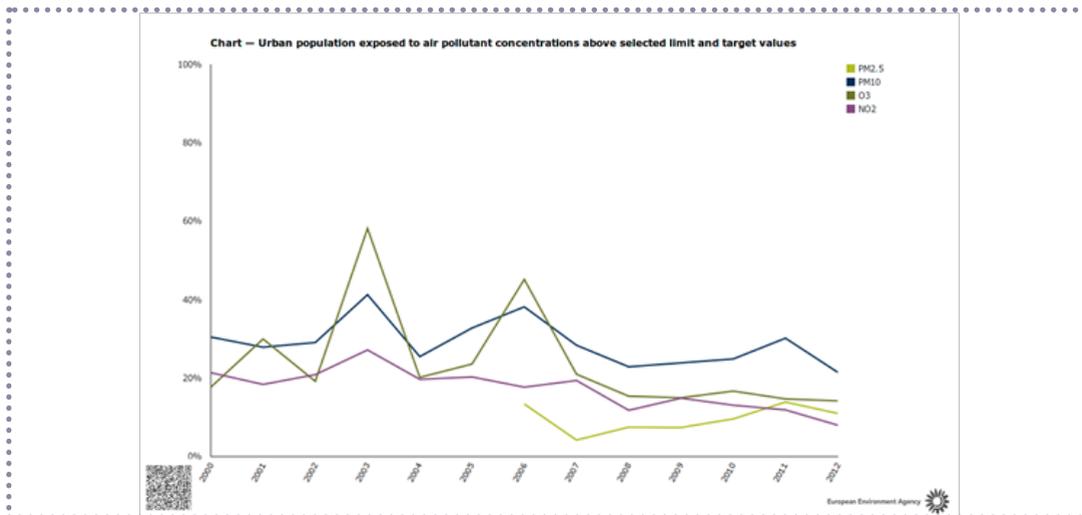
La criticità riguarda in particolar modo il particolato atmosferico (PM10 e PM2,5) che, come evidenziato da numerosi studi epidemiologici, è l'inquinante che ha i maggiori effetti sulla salute.

L'esposizione media della popolazione urbana delle grandi città europee ai principali inquinanti, calcolata sulla base dei livelli di inquinanti misurati nelle stazioni di monitoraggio urbane di fondo, è riportata in Figura 2.3. L'esposizione della popolazione al PM10 e all'NO₂ sta diminuendo, mentre l'esposizione all'ozono sembra piuttosto stabile²¹ (Figura 2.3).

L'inquinamento atmosferico è uno dei principali fattori di rischio ambientale per la salute umana.

²¹ http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

Figura 2.3: Percentuale di popolazione urbana dell'Unione Europea esposta a livelli di inquinanti atmosferici superiori agli standard previsti dalla Direttiva 2008/50/CE



Fonte: AEA (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/percentage-of-urban-population-resident-in-areas-where-pollutant-concentrations-are-higher-than-selected-limit-target-values-eea-member-countries-3>)

Dal 2000 al 2012 l'esposizione della popolazione urbana europea al PM10 e all'NO₂ diminuisce; quella all'ozono sembra piuttosto stabile.

Nel 2012, il 21% della popolazione EU urbana vive in aree dove il valore limite giornaliero per il PM10 è superato. La percentuale di popolazione urbana sale al 64% se si considera l'esposizione a livelli superiori al valore di riferimento WHO per l'esposizione umana a breve termine (50 µg/m³ da non superare più di 3 volte in un anno civile). Nel 2012, il 14% della popolazione EU urbana è stata esposta a livelli superiori al valore obiettivo dell'ozono²². L'esposizione sale al 98% se si considera il valore di riferimento WHO, pari a 100 µg/m³. Nel 2012 circa l'8% della popolazione urbana europea è stata esposta a livelli superiori al valore limite annuale dell'NO₂ (VLa e valore di riferimento WHO corrispondono entrambi a 40 µg/m³). L'esposizione al benzo(a)pirene, nel 2012, è stata piuttosto considerevole ed estesa, in particolare nell'Europa centrale e orientale: circa il 25% della popolazione urbana è stata esposta a livelli superiori al valore obiettivo; la popolazione esposta sale all'88% se si considera il valore di riferimento WHO (0,12 ng/m³). L'esposizione media della popolazione urbana in Italia è stimata da ISPRA sulla base delle concentrazioni degli inquinanti misurati nelle

2012, Europa: il 21% , il 14%, l'8% e il 25% della popolazione urbana è esposta a livelli superiori rispettivamente al VLg del PM10, al VO dell'ozono, al VLa dell'NO₂ e al VO del B(a)P.

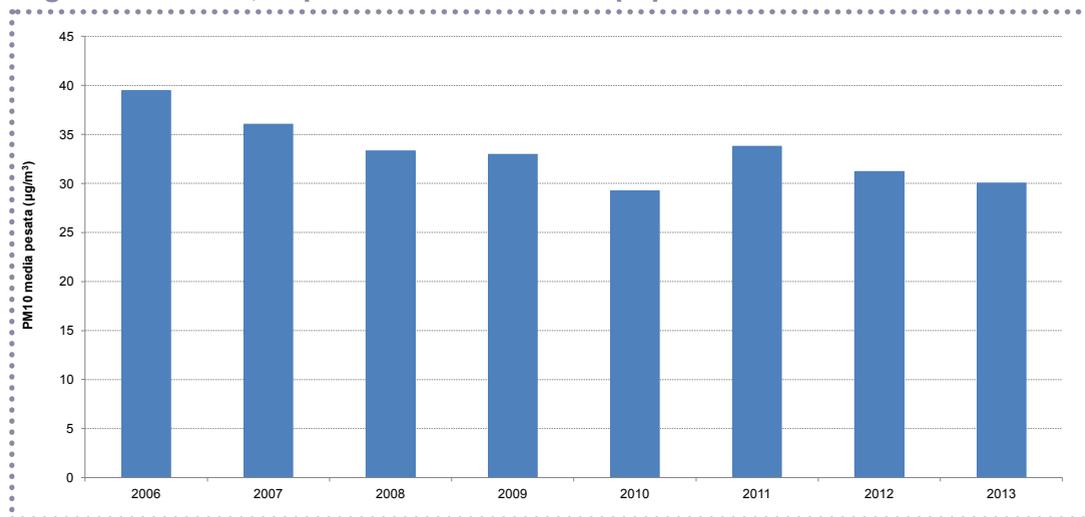
²² È importante sottolineare che l'esposizione della popolazione in zone rurali è più elevata rispetto alle aree urbane, in quanto in prossimità della sorgente traffico, l'ozono è consumato dall'NO emesso appunto dalla sorgente traffico che si ossida a NO₂

stazioni di monitoraggio urbane di fondo distribuite sul territorio nazionale. L'indagine riguarda il PM10, il PM2,5, l'ozono, l'NO₂ e quest'anno per la prima volta, in riferimento all'anno 2013, il benzo(a)pirene. La popolazione urbana indagata è di circa 24 milioni di abitanti (21 e 16 milioni circa rispettivamente per PM2,5 e benzo(a)pirene)²³.

Nel 2013, l'esposizione della popolazione urbana al PM10, pari a 30 µg/m³ come media pesata nazionale²⁴, è in lieve diminuzione rispetto al 2012 e 2011 (Figura 2.4).

Rispetto al valore di riferimento WHO per l'esposizione a lungo termine al PM10 (20 µg/m³ - media annua), solo circa il 4% della popolazione (10% nel 2012) è esposta a valori inferiori; il 93% è esposta a valori tra 20 e 40 µg/m³ e un 2% della popolazione (20% nel 2012) a valori superiori, fino a 50 µg/m³.

Figura 2.4: PM10, Esposizione media della popolazione urbana



Fonte: Elaborazione ISPRA su dati ARPA/APPA e ISTAT

2013, Italia, PM10: l'esposizione media della popolazione urbana è pari a 30 µg/m³.

²³ ISPRA, Annuario dei Dati Ambientali, Ed. 2014-2015 - Capitolo "Ambiente e Benessere"

²⁴ La media pesata (o ponderata) è calcolata associando a ogni valore di concentrazione un "peso" proporzionale alla quantità di popolazione esposta a quel valore. Ad es. la concentrazione media di una città ha come peso la popolazione afferente a quella città. Il valore della media pesata è dato infine dalla somma tra il prodotto di ciascun valore per il suo peso, fratto la somma dei pesi

Anche per il PM_{2,5}, nel 2013 l'esposizione della popolazione nazionale esaminata, pari a 21 µg/m³ come media pesata nazionale, mostra una leggera diminuzione rispetto agli anni precedenti (25 e 23 µg/m³ rispettivamente nel 2012 e 2011). Le percentuali di popolazione esposta a livelli di PM_{2,5} fino a 10 µg/m³ (10 µg/m³, valore di riferimento WHO, come media annua) e da 10 a 25 µg/m³ sono rispettivamente del 3% (esposizione circa nulla nel 2012) e 65%, come nel 2012. Il 31% circa della popolazione risulta esposta a valori medi superiori al valore obiettivo.

Per l'NO₂, l'esposizione della popolazione urbana, pari 39 µg/m³ nel 2013 come media pesata nazionale, mostra un andamento stazionario nel quadriennio 2010-2013.

Il 48% della popolazione esaminata risulta esposta a livelli di NO₂ superiori al valore limite annuale rispetto al 38% del 2012.

Relativamente all'ozono, la popolazione nel 2013 è stata esposta a livelli di ozono superiori all'obiettivo a lungo termine in media per 34 giorni rispetto ai 40, 52 e 51 giorni rispettivamente nel 2010, 2011 e 2012.

Per quanto riguarda il benzo(a)pirene nel 2013, la gran parte della popolazione (87%) è esposta a livelli inferiori al valore obiettivo; in particolare il 47% e il 40% della popolazione sono esposte a concentrazioni rispettivamente inferiori a 0,5 ng/m³ e comprese tra 0,5 a 1,0 ng/m³. Non è comunque da sottovalutare il restante 12% della popolazione esposto a livelli superiori al VO (il 4% è esposto a concentrazioni superiori a 1,5 ng/m³).

2013, Italia: il 31% e il 48% della popolazione urbana è esposta a livelli superiori rispettivamente al VO del PM_{2,5} e al VLa di NO₂.

O₃, 2013: per 34 giorni la popolazione esaminata è esposta a livelli superiori all'OLT.

B(a)P, 2013: in Italia il 12% della popolazione esaminata è esposta a valori superiori al VO.

Black carbon: caratterizzazione, impatti e inventario nazionale delle emissioni in atmosfera

Introduzione

Le interazioni tra cambiamento climatico e inquinamento atmosferico sono multiple e complesse, per esempio diversi *driver* climatici possono influenzare la formazione e la vita in atmosfera dell'aerosol e, viceversa, l'aerosol può influenzare l'equilibrio del sistema radiativo che governa il clima del pianeta. I primi possono essere suddivisi in cambiamenti fisici (temperatura, umidità, precipitazioni, umidità del suolo, radiazione solare, velocità del vento, estensione del ghiaccio marino, ecc.), cambiamenti chimici (disponibilità di ossidanti) e cambiamenti biologici (proprietà e copertura della vegetazione, abbondanza e specie di plancton). Al contrario, l'aerosol atmosferico può influenzare il clima in modi diversi e complessi attraverso l'interazione con la radiazione e le nuvole in quanto assorbe e riflette la luce solare modificando il bilancio radiativo della terra: lo *scattering* dovuto all'aerosol favorisce il raffreddamento del sistema climatico mentre l'assorbimento di radiazione da parte del materiale particolato ha l'effetto opposto e tende al riscaldamento del sistema. Il bilancio tra raffreddamento e riscaldamento dipende dalle proprietà dell'aerosol e dalle condizioni ambientali.

Nell'ottica dell'analisi integrata, poiché cambiamenti climatici e inquinamento atmosferico sono strettamente connessi e le misure che limitano le emissioni di CO₂ possono aumentare la concentrazione di inquinanti dell'aria ambiente o viceversa, è imprescindibile tenere in considerazione le interazioni e i *feedback*.

Le politiche a tutela dell'ambiente dovrebbero intervenire sulle componenti ambientali al fine di produrre effetti positivi su specifiche problematiche come nel caso del *Black carbon*.

Black carbon o carbonio elementare? Definizioni e differenze

La frazione carboniosa è una componente rilevante dell'**aerosol troposferico**, che può arrivare a costituire fino alla metà circa della concentrazione media annua in massa del PM_{2,5} e più di un terzo del PM₁₀ (Putaud et al., 2010). La frazione carboniosa è costituita da carbonio elementare e carbonio organico con una prevalenza costante, ma variabile nei rapporti di massa da sito a sito, del carbonio organico. Il carbonio elementare (EC) è chiamato spesso anche *black carbon* (BC), carbonio grafittico o fuliggine (*soot*) ed è emesso direttamente nell'atmosfera prevalentemente da processi di combustione. Il particolato organico viene emesso direttamente dalle sorgenti (aerosol organico primario) o può derivare dall'ossidazione e dalla condensazione atmosferica di precursori organici gassosi (aerosol organico secondario) (Seinfeld & Pandis, 2006). Nella chimica dell'atmosfera, il termine carbonio elementare si riferisce a materiale carbonioso che non volatilizza sotto a una certa temperatura. Questo esprime quindi una definizione operativa basata sulle proprietà di volatilità del materiale, mentre il termine forse più utilizzato per gli **aerosol carboniosi** che assorbono la luce è *black carbon*, che implica un forte assorbimento attraverso un ampio spettro di lunghezze d'onda.

Sebbene il *black carbon* sia uno dei componenti chiave del particolato atmosferico, non vi è accordo sulla terminologia da utilizzare, di conseguenza c'è ambiguità nella letteratura scientifica relativa al monitoraggio o alle stime modellistiche poiché si fa riferimento al *black carbon* con nomi diversi e basati su diverse proprietà delle particelle, senza una chiara definizione. Conseguentemente ci sono numerose pubblicazioni nella letteratura scientifica che si riferiscono alla stessa proprietà, ma con termini diversi e, viceversa, pubblicazioni che si riferiscono a proprietà diverse, ma con nomi simili.

Mentre i dati sull'aerosol carbonioso vengono ottenuti a livello globale con diverse tecniche di misura, gli inventari delle emissioni e gli studi modellistici richiedono set di dati che siano indipendenti dalla tecnica di monitoraggio. In particolare, gli inventari delle emissioni di *black carbon* si basano principalmente su fattori di emissione derivanti da procedimenti termo-ottici che rilevano l'evoluzione dei composti carboniosi su un filtro di campionamento riscaldato, mentre i dati provenienti da stazioni di monitoraggio atmosferico sono per lo più derivati da metodi di assorbimento ottico.

Le incertezze sono difficili da stabilire perché le cause delle grandi discrepanze tra i metodi usati non sono sempre chiare e, in larga misura, sono dipendenti dalla stagione, dalla posizione del sito di campionamento e dalle caratteristiche dell'aerosol.

Si proverà quindi, in questo paragrafo, a definire i termini più usati indicando, ove possibile, in modo univoco le proprietà chimico-fisiche cui fanno riferimento.

Dal punto di vista formale, e senza fare riferimento a metodi di misurazione o processi di formazione, il termine *black* (nero) descrive idealmente un oggetto che assorbe completamente la luce con riflettanza pari a zero, assorbimento e emissività pari a 1, mentre il termine *carbon* (carbonio) si riferisce al sesto elemento del sistema periodico. Carbonio elementare è usato per indicare carbonio che non è legato ad altri elementi. La combinazione di questi due punti di vista può fornire una definizione rigorosa:

- *Black Carbon* (BC) è formalmente definito come una sostanza ideale che assorbe la luce ed è composta da carbonio. Il meccanismo di formazione è escluso da questa definizione per la varietà di processi potenziali. Il BC è principalmente formato nella combustione incompleta del materiale carbonioso, ma può anche essere un prodotto della pirolisi di altro materiale carbonioso, cioè, la variazione della struttura chimica dei composti carboniosi per la perdita di idrogeno o atomi di ossigeno a temperature superiori a 250 °C, di disidratazione di zuccheri o di riscaldamento di legno in atmosfera priva di ossigeno.
- Carbonio Elementare (EC) è formalmente definito come una sostanza contenente solo carbonio non associato ad altri elementi, ma che può essere presente in una o più forme allotropiche. Esempi di carbonio elementare sono il diamante, i nanotubi di carbonio, la grafite o i fullereni.

Pertanto, i termini formali *black carbon* e carbonio elementare si riferiscono a una serie di materiali con differenti proprietà ottiche e fisiche piuttosto che a un materiale con proprietà ben definite.

Tuttavia queste definizioni rigide non sono particolarmente utili nella pratica, perché le sostanze carboniose non si presentano mai nell'aerosol atmosferico come materia pura ma come una miscela altamente variabile di composti carboniosi con diverse proprietà. Una definizione più utile del *black carbon* deve tenere conto delle varie proprietà che determinano gli effetti delle particelle, i loro processi di diffusione e rimozione e che le rendono così importanti per i cambiamenti climatici, la chimica dell'atmosfera, la qualità dell'aria ambiente. Queste proprietà sono:

- la microstruttura: grafitica con atomi di carbonio ibridati sp², ne consegue una bassa reattività chimica e un alto assorbimento di luce;
- la morfologia: catene di tipo frattale composte da aggregati di sferule di carbonio con diametro minimo inferiore a 10 nm fino a 50 nm che favoriscono l'adsorbimento di altre specie chimiche;
- la stabilità termica: è materiale refrattario con temperatura di volatilizzazione intorno ai 4.000 K e che passa allo stato gassoso per ossidazione dai 340°C, ne consegue un'alta stabilità e lungo tempo di permanenza in atmosfera;
- la solubilità: è insolubile in tutti i solventi (inclusa l'acqua) per cui viene rimosso lentamente dalle nuvole e dalla pioggia;
- l'assorbimento della luce: elevato che porta alla riduzione dell'**albedo** di nubi, neve e ghiaccio.

La combinazione di queste proprietà porta alla classificazione del *black carbon* come sostanza unica e al centro delle interazioni tra cambiamento climatico e inquinamento atmosferico e permetterebbe la realizzazione di inventari delle emissioni costruiti in maniera coerente. Infatti, la definizione data in “*Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment*” (Bond et al., 2013) valutando il ruolo del BC nel sistema climatico è derivata dalle proprietà sopra elencate, vale a dire che il BC è un tipo distinto di materiale carbonioso che si forma principalmente nelle fiamme, viene direttamente emesso in atmosfera e ha una combinazione unica di proprietà fisiche: assorbe fortemente la luce visibile, è refrattario con una temperatura di vaporizzazione vicino 4.000K, morfologicamente si presenta come un aggregato di piccole sfere ed è insolubile in acqua e nei solventi organici comuni. Nei diversi studi di misurazione e modellazione, l'uso del termine *black carbon* purtroppo non è stato limitato a materiale con queste proprietà, causando una mancanza di comparabilità tra i risultati (Bond et al., 2013).

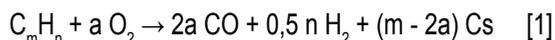
Nel 2011, in conseguenza della montante polemica all'interno delle comunità scientifica sulla potenziale ambiguità dei termini più comunemente usati, il *Global Atmospheric Watch-Scientific Advisory Group* (GAW/WMO) ha suggerito le seguenti definizioni (Viana et al.):

- *Black Carbon Equivalente* (EBC), usato al posto di *black carbon* per misure basate su metodi ottici. Il *black carbon* è convertito in EBC correggendo le misure ottiche con le concentrazioni determinate da analisi termo-ottico su filtri di campionamento del materiale particolato;
- Carbonio refrattario equivalente, usato al posto di *black carbon* per misure basate su metodi a incandescenza;
- Carbonio elementare (EC), utilizzato per misure ottenute con metodi termo-ottici.

Caratteristiche fisico – chimiche della frazione carboniosa nel particolato

Le particelle carboniose sono un sottoprodotto della combustione di combustibili solidi, liquidi o gassosi. Le particelle formate in questo modo sono composte sia da carbonio organico sia elementare e sono conosciute come fuliggine: agglomerati di piccole particelle carboniose di forma approssimativamente sferica. Mentre le dimensioni e la morfologia degli aggregati variano molto, le piccole particelle sferiche hanno dimensioni variabili da 20 a 30 nm e coagulano fra loro creando catene lineari o ramificate. Queste catene formano particelle di fuliggine visibili a occhio nudo che hanno dimensioni fino a pochi micrometri. La fuliggine che si forma nei processi di combustione non è però un'unica sostanza. Essa consiste essenzialmente di atomi di carbonio ma contiene fino al 10%, in moli, di idrogeno e tracce di altri elementi. Inoltre, le particelle di fuliggine assorbono vapori organici quando i prodotti di combustione si raffreddano, spesso accumulando quantità significative di composti organici. Pertanto la fuliggine può essere vista come una miscela di carbonio elementare, carbonio organico e piccole quantità di altri elementi quali ossigeno, azoto e idrogeno incorporati nella sua struttura grafitea. Il carbonio elementare è formato da una serie di cristalliti di 2-3 nm di diametro, ciascuno costituito da più strati di atomi di carbonio con la struttura esagonale della grafite (Figura 1). La densità di queste particelle è di circa 2 g/cm³.

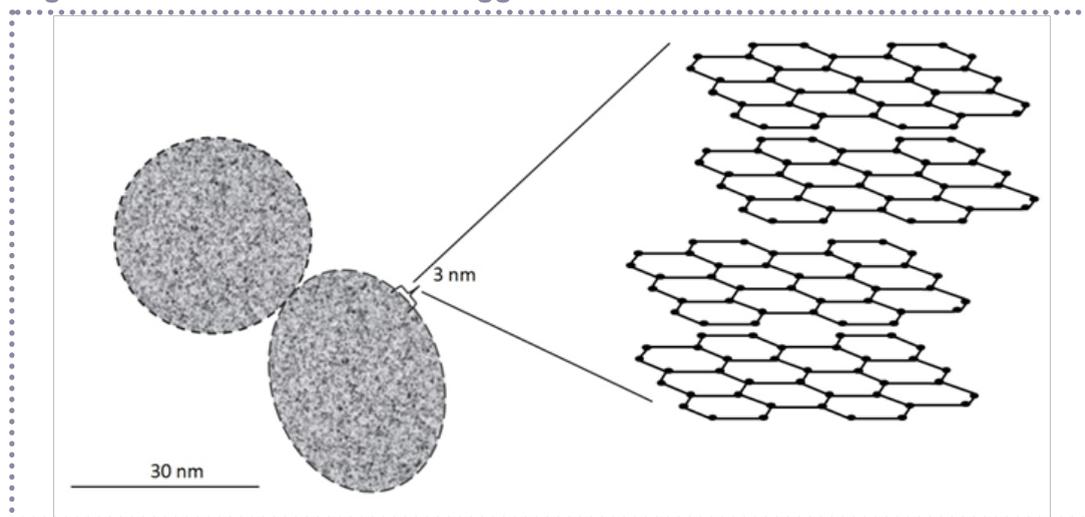
La formazione della fuliggine dipende dal rapporto carbonio/ossigeno nella miscela di idrocarburi in aria. Supponiamo che la miscela non abbia ossigeno sufficiente per formare CO₂ e che CO sia il prodotto della combustione del carburante C_mH_n, la stechiometria della combustione sarà:



dove C_s è la fuliggine che si forma e il rapporto tra carbonio e ossigeno (C/O) è m/2a. Schematicamente, quando il rapporto C/O è 1, cioè, m = 2a, c'è ossigeno sufficiente per legare tutto il carbonio disponibile

come CO e non si forma la fuliggine. Se c'è più ossigeno, il rapporto C/O è inferiore all'unità ($m < 2a$) e l'ossigeno supplementare sarà utilizzato per la conversione di CO a CO₂. Se c'è meno ossigeno, il rapporto C/O è maggiore di 1 ($m > 2a$), viene prodotta la fuliggine. I nuclei di fuliggine rappresentano solo una piccola frazione della massa complessiva della fuliggine prodotta. Tuttavia, la massa finale dipende dal numero di nuclei formati. Nonostante i numerosi studi svolti in questi anni, la fase di formazione dei nuclei è tuttora poco chiara. Essa non sembra coinvolgere la **nucleazione** omogenea, ma piuttosto una serie di reazioni di polimerizzazione in fase gassosa che producono grandi idrocarburi policiclici aromatici ed eventualmente le particelle di fuliggine.

Figura 1: Microstruttura della fuliggine



Nota:
Rappresentazione schematica

La combustione di legna e le automobili diesel sono fonti rilevanti di carbonio elementare. Il carbonio elementare emesso dagli scarichi dei veicoli è facilmente visibile e molti studi realizzati con il campionamento diretto indicano che gli aerosol emessi sono simili alle particelle di fuliggine sopra descritte. Il diametro medio degli aggregati è generalmente compreso tra 0,05 e 0,25 μm . Più del 90% della massa di carbonio elementare emessa si trova in particelle submicroniche.

Esistono tecniche traccianti per determinare le sorgenti del carbonio come l'uso del potassio (K), traccianti della combustione della legna, e l'uso degli isotopi radioattivi ¹⁴C e ¹²C. Tuttavia, nei diversi studi reperibili nella letteratura scientifica recente, le percentuali di carbonio elementare, emesso dalle automobili e da altre fonti, sulla massa totale del particolato mostrano differenze significative tra i diversi campioni analizzati e tra i siti di misura.

La distribuzione di massa del carbonio elementare emesso dalle automobili è unimodale, con un picco a circa 0,1 μm . Misure in galleria hanno mostrato che oltre l'85% della massa del carbonio elementare emesso da parte degli autoveicoli si trova in particelle con diametro aerodinamico inferiore a 0,2 μm . Tuttavia, la distribuzione ambientale del carbonio elementare in aree inquinate è tipicamente bimodale con picchi tra 0,05 e 0,12 μm per il Modo I e 0,5-1,0 μm per il Modo II.

Il Modo I nella distribuzione dimensionale del carbonio elementare deriva da fonti primarie come la combustione, mentre le particelle del Modo II vengono create principalmente per accumulo, e successivo

accrescimento, su particelle di origine primaria di aerosol secondari.

Nelle aree urbane inquinate è generalmente dominante il Modo I che può arrivare a contenere il 75% del totale del carbonio elementare presente nell'aerosol.

Impatti ambientali del BC

Per quanto riguarda gli impatti legati alle emissioni di BC, l'attenzione sarà rivolta principalmente agli effetti e alle interazioni tra sistema climatico e inquinamento atmosferico, però per completezza di trattazione è opportuno accennare agli effetti sulla salute.

In generale, EC o BC sono considerati come aventi effetti tossici trascurabili sui polmoni umani e animali in studi controllati e sulle cellule delle vie aeree come i macrofagi e le cellule epiteliali respiratorie. D'altra parte, esercitano un ruolo chiave nella tossicità indiretta come veicolo universale di composti organici semi-volatili tossici e altri composti rilasciati in processi di combustione o adsorbiti sulla loro superficie durante il trasporto (WHO, 2012). In definitiva, la pericolosità del BC è legata più alla capacità di trasporto di altre sostanze che alla propria intrinseca tossicità.

Il BC ha, inoltre, una serie di effetti negativi su numerose matrici ambientali tanto da portarlo al centro dell'attenzione della comunità scientifica internazionale come elemento di contatto tra diverse strategie di sviluppo sostenibile, due tra le più importanti riguardano i cambiamenti climatici e l'inquinamento atmosferico. In più, in un Paese come l'Italia, diventa estremamente importante l'effetto e quindi il danno provocato dalla frazione carboniosa del particolato sui monumenti e i beni culturali in genere.

Relazione tra cambiamenti climatici e inquinamento atmosferico e ruolo del BC

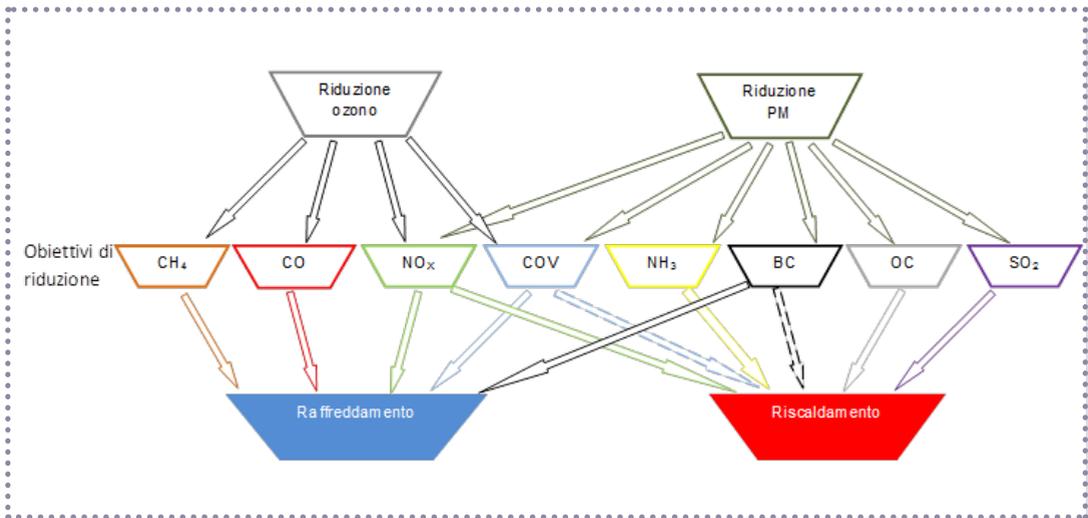
Le emissioni antropogeniche di interesse per il loro effetto **climalterante** sono principalmente quelle di CO₂ (biossido di carbonio), CH₄ (metano), N₂O (protossido di azoto) e gas fluorurati, principalmente HFC (idrofluorocarburi), PFC (perfluorocarburi) e SF₆ (esafluoruro di zolfo). Oltre a questi 6 inquinanti, considerati ai fini delle rendicontazioni degli impegni del Protocollo di Kyoto, l'ultimo *Assessment Report* (AR5) (Myhre et al., 2013) sottolinea l'effetto climalterante di altre sostanze, come l'ozono (O₃) e il materiale particolato (PM), sostanze tipicamente connesse a fenomeni di inquinamento, che impattano sullo sbilanciamento energetico del pianeta. Queste ultime possono avere sia un effetto raffreddante, per esempio il materiale particolato di dimensioni maggiori, sia riscaldante, legato al particolato fine di origine carboniosa, il *black carbon*. Ci sono inoltre altre sostanze, come ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), composti organici volatili non metanici (COVNM), ossidi di zolfo (SO_x) che non hanno un effetto diretto sul riscaldamento del pianeta ma influenzano indirettamente il clima in quanto precursori di O₃ e aerosols (PM) e poiché condizionano il tempo di vita del metano in atmosfera.

Per poter condurre una strategia efficace e integrata di lotta ai cambiamenti climatici e all'inquinamento atmosferico è fondamentale tenere in considerazione tali aspetti altrimenti si rischia di ridurre le emissioni di alcune sostanze a scapito di altre che invece andranno a crescere. È il caso della combustione di biomassa (legna) in ambito residenziale e dei servizi: negli ultimi anni i consumi di legna per riscaldamento sono notevolmente aumentati, anche in considerazione delle politiche di riduzione dei gas serra in quanto la combustione delle biomasse legnose non comporta emissioni aggiuntive di CO₂ in atmosfera poiché la legna è un combustibile biogenico, ossia generato per fotosintesi a partire dal carbonio già presente in atmosfera. D'altra parte, in ragione della crescita dei consumi, la combustione di legna si è rivelata negli ultimi anni una delle fonti principali di materiale particolato con un incremento stimato, per le emissioni di PM10 per l'intero settore residenziale a prescindere dai combustibili, del 250% tra il 1990 e il 2013 in Italia (ISPRA, 2015). In questo caso, occorre pianificare azioni sinergiche in modo da mettere a punto delle strategie di intervento **win - win** che consentano vantaggi sia nell'ottica dei cambiamenti climatici sia dell'inquinamento atmosferico e una delle soluzioni è sicuramente di tipo tecnologico, in quanto è dimostrato che

le emissioni dei moderni sistemi di combustione (per esempio le stufe automatiche a *pellets*) sono molto inferiori rispetto a quelle dei caminetti tradizionali.

Nella Figura 2 viene descritta in maniera qualitativa l'interazione tra le politiche di riduzione di ozono e materiale particolato e, tramite obiettivi di riduzione per differenti sostanze inquinanti (es. CH₄, CO, NO_x), gli effetti di riscaldamento o raffreddamento del sistema climatico, per esempio la riduzione dell'anidride solforosa (SO₂) riduce l'effetto raffreddante dei solfati mentre la riduzione del *black carbon*, poiché ha le proprietà di assorbire calore in atmosfera e ridurre l'albedo quando depositato sulla neve (vale a dire che si riduce la capacità di riflettere la radiazione solare), condurrebbe a un effetto prevalentemente raffreddante.

Figura 2: Schema degli impatti delle strategie di controllo di specifici inquinanti e impatti sul clima



Fonte: Adattato da Myhre et al., 2013

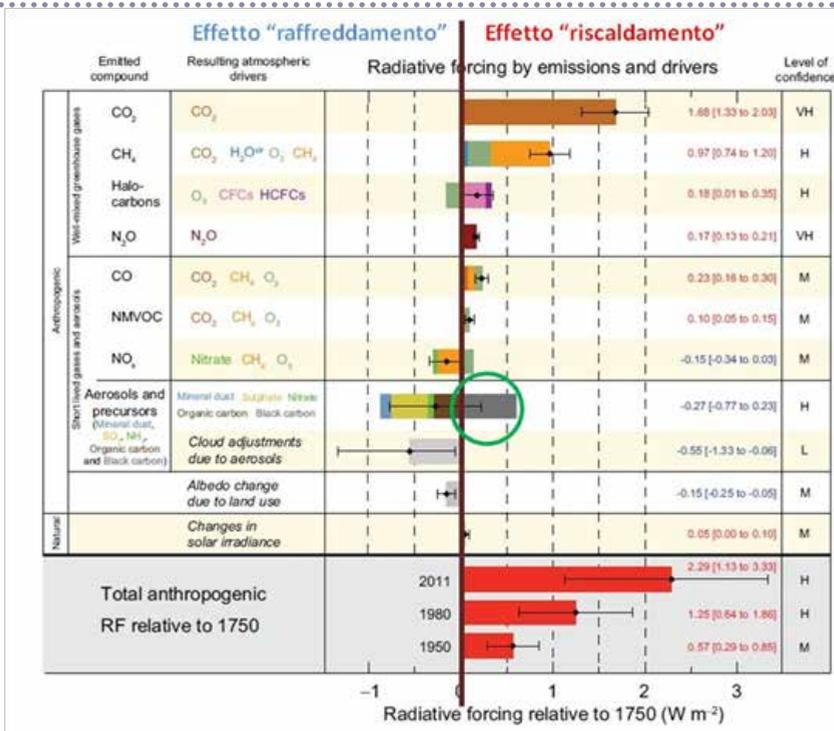
Legenda:

Linee tratteggiate indicano impatti incerti. (CH₄: metano, CO: monossido di carbonio, NO_x: ossidi di azoto, COV: composti organici volatili, NH₃: ammoniaca, BC: *black carbon*, OC: *organic carbon*, SO₂ anidride solforosa)

Un modo per rappresentare l'effetto di sostanze e processi naturali o antropogenici sul sistema climatico è attraverso il *Radiative Forcing* (RF), che quantifica il cambio nei flussi di energia causato dai diversi *driver* tra il 1750 e il 2011 (laddove non diversamente indicato). Valori positivi del RF conducono a un riscaldamento della superficie, valori negativi al raffreddamento. Il RF totale è positivo e ha portato a un assorbimento di energia da parte del sistema climatico. Il più grande contributo al RF complessivo, come si può vedere in Figura 3 è dovuto all'aumento della concentrazione di anidride carbonica (CO₂) in atmosfera. Il RF dovuto all'interazione aerosol – radiazione è dato da fenomeni di riflessione (dispersione) e assorbimento della radiazione sia a onde lunghe sia corte da parte degli aerosol. Numerose e differenti tipologie di aerosol provenienti da varie fonti sono presenti in atmosfera: la maggior parte degli aerosol principalmente riflette la radiazione solare ma alcune componenti la assorbono in varia misura con il BC che risulta essere la componente più assorbente. Infatti, ancora in Figura 3 è possibile osservare come il BC rappresenti la frazione del materiale particolato in grado di produrre un *forcing radiativo* positivo e quindi un effetto di *warming*. Di conseguenza, riducendo il BC, si può intervenire in maniera positiva sia sul cambiamento climatico, poiché si ridurrebbe una componente che tende a “scaldare” il sistema climatico,

sia sull'inquinamento atmosferico riducendo le concentrazioni di materiale particolato in atmosfera.

Figura 3: Stime dei valori di RF nel 2011 rispetto al 1750 e incertezze aggregate per i principali driver del cambiamento climatico



Fonte: Adattato da Myhre et al., 2013

Legenda:

I valori numerici delle incertezze sono riportati nella parte destra della figura insieme al livello di confidenza (VH – very high, H – high, M – medium, L – low, VL – very low). La variazione dell'albedo dovuto a BC su neve e ghiaccio è incluso nella barra del BC. L'RF antropogenico totale è fornito per tre differenti anni, sempre con riferimento al 1750 nella parte inferiore della figura

Gli effetti della frazione carboniosa del particolato atmosferico sui beni culturali

Agli impatti precedentemente descritti occorre aggiungere, vista l'importanza del settore nel sistema socio-economico italiano, quelli sui beni culturali.

Negli ultimi decenni, i livelli degli inquinanti aerodispersi hanno subito un evidente cambiamento e le particelle carboniose, prevalentemente provenienti da sorgenti di traffico, hanno contribuito significativamente alla formazione di strati di degrado (*damage layers*) sulle facciate degli edifici presenti nei siti urbani (Ghedini et al., 2011). Nel settore dei beni culturali la ricerca ha mostrato negli ultimi decenni una particolare attenzione al fenomeno dell'annerimento, principalmente attribuibile alla deposizione del particolato atmosferico e delle sue componenti carboniose sulle superfici dei monumenti. Poiché nella maggior parte degli studi presenti in letteratura, si fa riferimento più frequentemente al termine carbonio elementare, in questo paragrafo verranno descritte le principali tipologie di degrado connesse all'interazione di questa componente del particolato con i materiali che costituiscono le opere d'arte.

Figura 4: Roma- Particolare del Colosseo



La deposizione di particolato atmosferico e delle sue componenti sulle superfici degli edifici porta sia a un degrado di tipo estetico (*visual nuisance*) sia a un più grave deterioramento chimico-fisico, dovuto alle reazioni chimiche di trasformazione e dissoluzione dei materiali che interagiscono con le particelle depositate (Grossi et al., 2006).

Per definire il danno dal punto di vista estetico, gli inizi degli anni 2000 è stato realizzato uno studio in diverse città europee finalizzato a rilevare la percezione dello sporco di alcuni beni di interesse storico-artistico, che presentavano differenti gradi di annerimento (Brimblecombe & Grossi, 2005). Lo studio è stato effettuato sottoponendo il pubblico (turisti, passanti, ecc.) a un questionario *in situ*, i cui risultati sono stati utilizzati per stabilire "soglie estetiche di tolleranza" che hanno permesso di stimare, in prima approssimazione, le concentrazioni accettabili di carbonio elementare in atmosfera. Questa componente del particolato atmosferico è infatti ritenuta la maggiore responsabile dell'annerimento delle superfici a causa del suo elevato assorbimento ottico e per la sua natura adesiva e idrofobica (Lanting, 1986). Sebbene tali valori non siano stati proposti come *standard*, il livello accettabile di carbonio elementare per l'esposizione di un edificio a tale inquinante in un'area urbana, è risultato pari a 2-3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Grossi et al., 2006; Brimblecombe & Grossi, 2005).

Per quanto riguarda il danno di tipo chimico-fisico, generalmente in letteratura si fa riferimento al fenomeno delle croste nere, strati superficiali compatti che si formano principalmente in zone più riparate dalla pioggia battente. Il componente principale di queste incrostazioni è il gesso: la deposizione umida e secca di SO_2 sui materiali di natura calcarea e la sua successiva ossidazione porta alla trasformazione del carbonato di calcio (CaCO_3 , insolubile) in gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, solubile e quindi dilavabile).

Nelle croste nere sono inoltre presenti le particelle carboniose che sono responsabili del colore scuro delle croste e che, a causa della loro alta superficie specifica e del contenuto di metalli pesanti, agiscono come supporti catalitici ai processi di ossidazione dell' SO_2 (Ghedini et al., 2004). Numerosi sono gli studi realizzati, sia a livello nazionale sia internazionale, sulle croste nere, alcuni dei quali mirati alla quantificazione delle frazioni di carbonio organico (OC) ed elementare in esse presenti (Barca et al., 2014; Ozga et al., 2011; Ruffolo et al., 2015; Sykorova et al., 2011). Alcuni autori sostengono che lo studio delle croste fornisca informazioni che permettono di risalire ai cambiamenti ambientali avvenuti nel tempo in quanto la loro composizione chimica riflette le sorgenti di combustione delle sostanze presenti in atmosfera (Nava et al., 2010).

Per valutare il fenomeno dell'annerimento, numerose ricerche sono state realizzate per definire specifici

algoritmi in grado di descrivere la correlazione tra la “dose”, le concentrazioni di particolato in atmosfera, e la “risposta”, il danno subito dal materiale (annerimento). Gli studi presenti in letteratura, si sono basati principalmente sulla misura delle proprietà ottiche dei materiali, in particolare della riflettanza (luminosità) della superficie, in funzione del tempo e della concentrazione di particolato depositato per differenti materiali (lapidei, plastica, ecc). Nei primi algoritmi sviluppati, l’annerimento era proporzionale alla radice quadrata della concentrazione di PM. Successivamente è stata proposta la seguente relazione di tipo esponenziale (Watt et al., 2008):

$$R = R_0 \exp(-\lambda C P M t) \quad [2]$$

dove R, R₀ sono i valori finale e iniziale della riflettanza, λ la costante dose-risposta, C la concentrazione di PM e t il tempo. In alcuni lavori si afferma che la concentrazione da considerare nell’algoritmo sia quella del carbonio elementare (Watt et al., 2009).

Di recente si stanno sviluppando studi relativi agli effetti delle frazioni carboniose del particolato sui materiali in ambienti interni (*indoor*) poiché le particelle caratterizzate da bassi diametri aerodinamici possono facilmente penetrare all’interno degli edifici (per esempio musei) e danneggiare gli oggetti e le pareti sui cui si depositano (Krupinska et al., 2013; Grau-Bové & Strlic, 2013).

Stime delle emissioni: inventario nazionale delle emissioni in atmosfera

La Convenzione di Ginevra del 1979 sull’inquinamento atmosferico transfrontaliero, contribuendo allo sviluppo del diritto internazionale dell’ambiente, è uno dei fondamentali mezzi per la protezione della salute umana e dell’ambiente attraverso la cooperazione intergovernativa.

Il fatto che gli inquinanti atmosferici possano viaggiare parecchie migliaia di chilometri prima della deposizione e prima che il danno si verifichi ha sottolineato la necessità di forme di cooperazione internazionale per combattere l’inquinamento atmosferico transfrontaliero.

Quadro di riferimento dell’inventario

L’Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha la responsabilità della presentazione dell’inventario delle emissioni nell’ambito della Convenzione LRTAP (*Long Range Transboundary Air Pollution*), nonché di quella delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC).

In particolare, nel rispetto della Convenzione LRTAP, l’Italia deve presentare ogni anno i dati sulle emissioni nazionali di SO_x, NO_x, COVNM, CO e NH₃, vari metalli pesanti e inquinanti organici persistenti. La *submission* consiste dell’inventario nazionale delle emissioni, comunicato attraverso la compilazione del *Nomenclature for Reporting* (NRF), e dell’*Informative Inventory Report* (IIR) per garantire le proprietà di trasparenza, coerenza, comparabilità, completezza e accuratezza. L’IIR contiene informazioni sull’inventario italiano delle emissioni in atmosfera, tra cui una spiegazione delle metodologie, le fonti di dati, le attività di *Quality Assurance/Quality Control* (QA/QC) e i processi di verifica effettuati durante la compilazione dell’inventario, con un’analisi delle tendenze delle emissioni e una descrizione delle categorie chiave. Lo scopo del documento, disponibile all’indirizzo:

<http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni> è di facilitare la comprensione del calcolo dei dati sulle emissioni di inquinanti atmosferici, fornendo così uno strumento per confrontare il contributo relativo delle fonti di emissione diverse e sostenere l’individuazione di politiche di riduzione.

In tale contesto, sono state sviluppate per la prima volta in Italia le stime delle emissioni di *black carbon* a livello nazionale applicando la metodologia di seguito descritta.

Metodologia di stima

La metodologia di stima segue, per tutte le sorgenti emissive prese in considerazione, il *Guidebook EMEP/EEA* nell'edizione del 2013, calcolando il BC come frazione del PM_{2,5} generalmente secondo una formula del tipo:

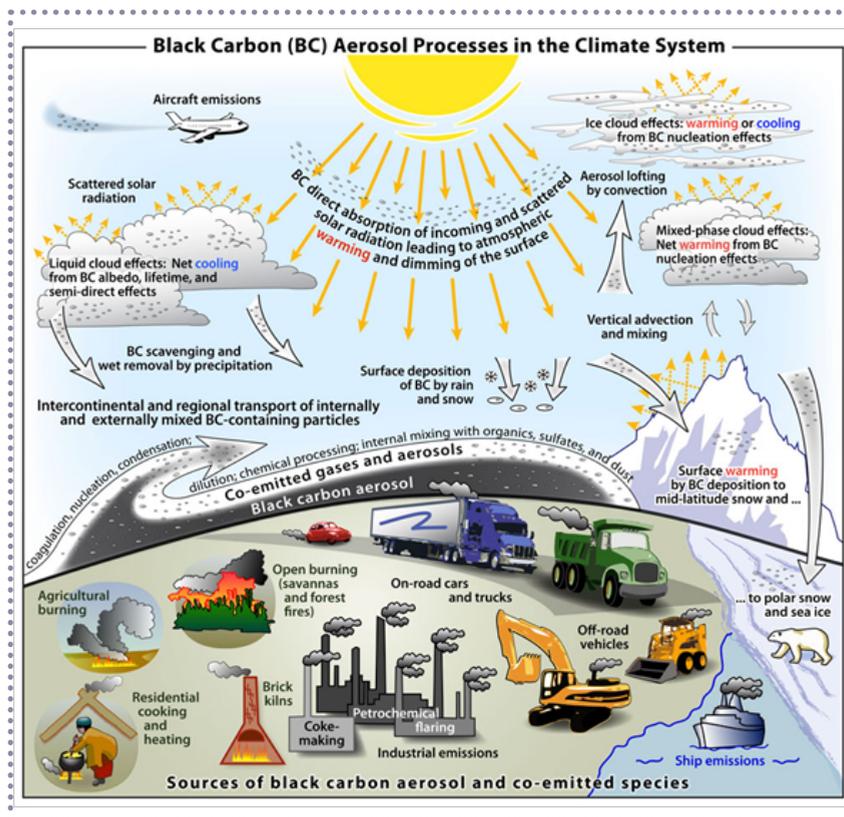
$$E_{BC} = AD \times EF_{PM_{2.5}} \times F_{BC} \quad [3]$$

dove E_{BC} rappresenta l'emissione di BC, AD i dati di attività che caratterizzano la sorgente emissiva, $EF_{PM_{2.5}}$ è il fattore di emissione del PM_{2,5} e F_{BC} indica il valore della frazione di BC nel PM_{2,5}.

Per alcune categorie emissive, tale formula rappresenta una semplificazione estrema dei modelli utilizzati nelle stime: è il caso delle emissioni da traffico la cui stima viene effettuata tramite il modello Copert IV ormai giunto alla versione 11.2. Il modello Copert restituisce le emissioni di EC che, come già accennato, nel caso dei trasporti su strada e soprattutto nei motori diesel, può essere considerata coincidente con il BC (May et al., 2010).

Le sorgenti di emissione, come si può notare in Figura 5, sono molto varie e coinvolgono processi molto diversi.

Figura 5: Schema delle sorgenti di emissione di BC primario e dei processi che ne controllano la distribuzione in atmosfera e ne determinano il ruolo nel sistema climatico



Fonte: Bond et al., 2013

In questa prima edizione dell'inventario nazionale delle emissioni di BC, le fonti per le quali è stato possibile stimare la frazione carboniosa sono:

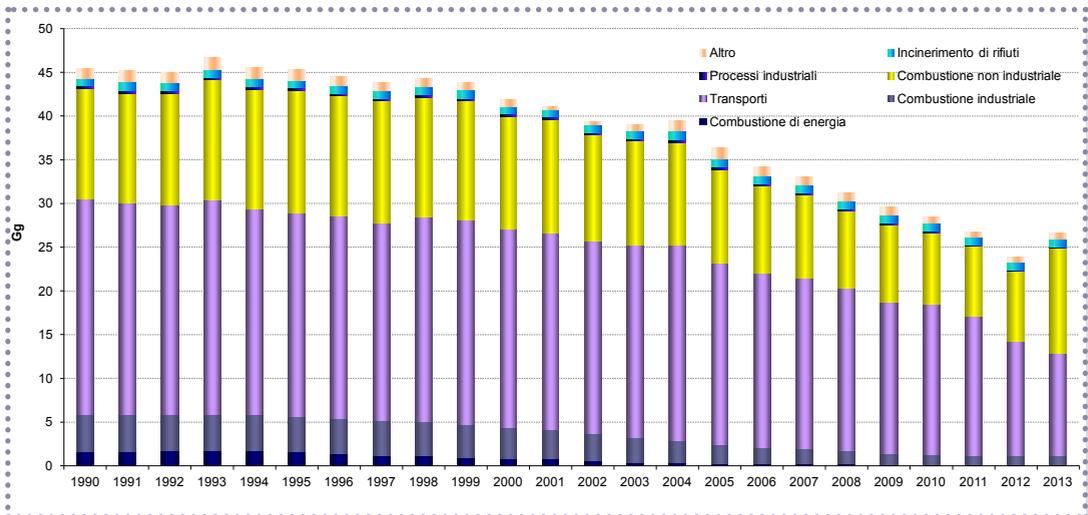
- la combustione per la produzione di energia comprendendo oltre le centrali anche raffinerie e cokerie;
- i trasporti stradali considerando le emissioni da autovetture, veicoli commerciali leggeri e pesanti nonché cicli e motocicli;
- le altre modalità di trasporto (aereo, marittimo e ferroviario);
- il riscaldamento domestico, sia residenziale sia commerciale;
- le emissioni fuggitive da estrazione, deposito o trasporto di combustibili;
- alcuni processi industriali tra cui la produzione di cemento, di acciaio e alcune produzioni proprie dell'industria chimica;
- la combustione delle stoppie e altri residui agricoli;
- l'incenerimento di rifiuti.

Essendo il primo tentativo di stima delle emissioni di BC in alcuni casi le informazioni circa i processi o i dati di attività non sono ancora sufficientemente accurati da permettere una stima e quindi, alcune sorgenti, come il *flaring* del gas naturale durante operazioni di estrazione o gestione, sono ancora in fase di studio. Dal punto di vista metodologico, inoltre, occorre tenere in considerazione quanto già accennato in merito alla misurazione delle frazioni carboniose e cioè che spesso le misure su cui sono basati i fattori di emissione si riferiscono all'EC o non è specificato e questo contribuisce ad aumentare l'incertezza delle stime.

Risultati

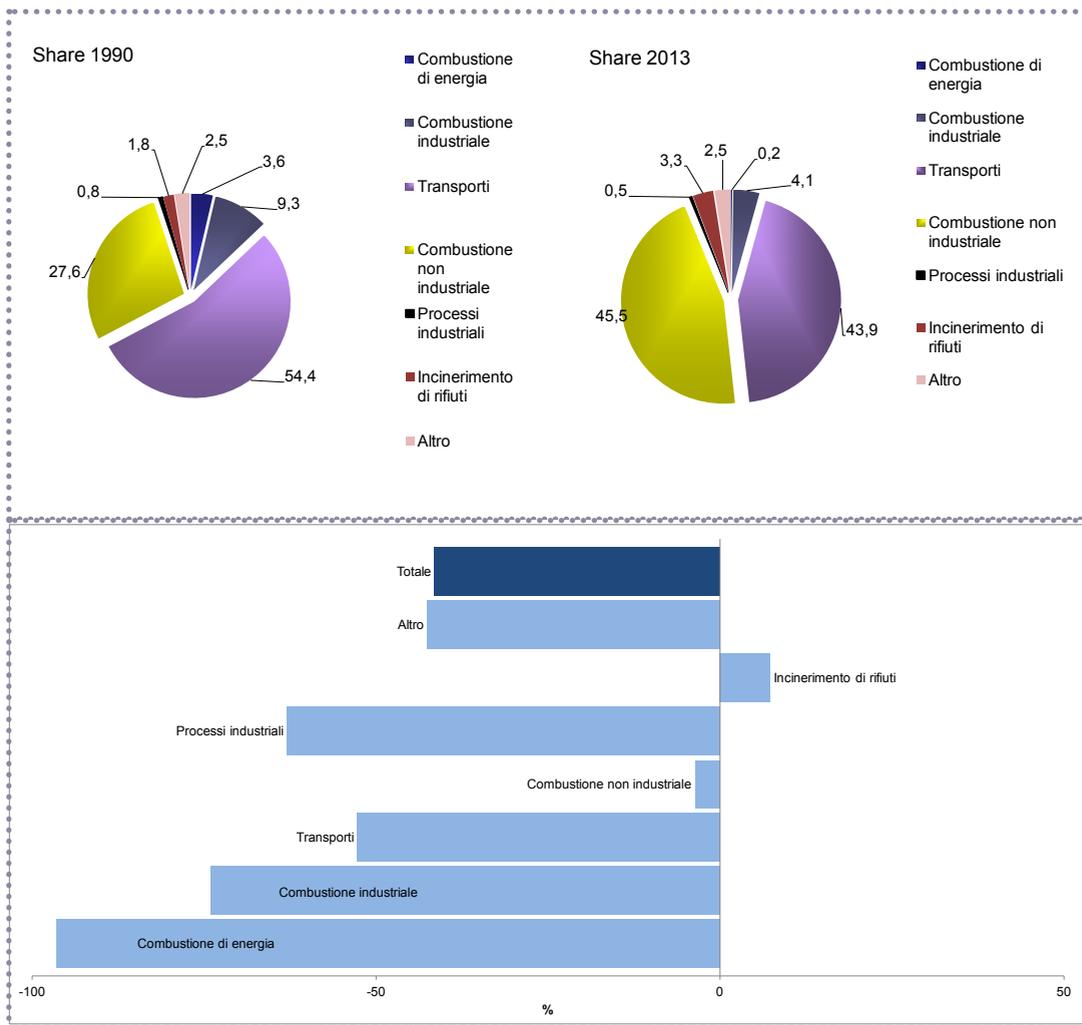
Le emissioni nazionali di BC mostrano un andamento decrescente nel periodo 1990 – 2013, da 45 Gg a 27 Gg. La Figura 6 e la Tabella 1 illustrano il *trend* delle emissioni dal 1990 al 2013, mentre la Figura 7 illustra anche lo *share* delle emissioni di BC per categoria sia nel 1990 sia nel 2013, nonché la variazione totale e settoriale dal 1990 al 2013.

Figura 6: Serie storica delle emissioni di BC dal 1990 al 2013



Fonte: ISPRA

Figura 6: Serie storica delle emissioni di BC dal 1990 al 2013



Fonte: ISPRA

Il trend risultante è chiaramente decrescente grazie al miglioramento delle tecnologie di combustione in ambito industriale e nella costruzione dei veicoli, mentre resta più stabile nel caso della combustione non industriale, costituita prevalentemente dal riscaldamento domestico e comprendente tecnologie di combustione poco efficaci come i caminetti e le stufe tradizionali.

I risultati delle stime sono esposti in termini numerici in Tabella 1.

Tabella 1: Andamento delle emissioni di *black carbon* dal 1990 al 2013

	1990	1995	2000	2005	2010	2013
	Gg					
Produzione di elettricità e calore	1,7	1,6	0,9	0,3	0,1	0,1
Combustione nell'industria	4,2	4,1	3,5	2,2	1,2	1,1
Trasporti	24,7	23,3	22,7	20,7	17,1	11,7
Combustione non industriale	12,5	14,0	12,9	10,7	8,2	12,1
Processi industriali	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,1
<i>Open burning</i>	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	0,9
Altro	1,2	1,2	0,7	1,2	0,7	0,7
TOTALE	45,5	45,3	41,8	36,3	28,5	26,6

Fonte: ISPRA

Le emissioni totali mostrano una riduzione complessiva pari a circa il 42%. In particolare all'interno del macrosettore trasporti, le emissioni dal trasporto su strada, che costituiscono oltre il 40% delle emissioni totali nel 2013, decrescono del 54%. L'altro macrosettore di rilievo per le emissioni di BC è quello della combustione non industriale che comprende sia il riscaldamento domestico sia le altre sorgenti mobili proprie di attività nel campo dell'agricoltura o dell'industria (per esempio trattori e carrelli elevatori), però mentre le emissioni da riscaldamento hanno avuto un andamento crescente (+216%) quelle dalle altre sorgenti mobili si sono ridotte del 69% rispetto al 1990. Le emissioni dalla combustione industriale contano per il 4% del totale con un decremento del 74%, mentre i processi industriali non danno un contributo rilevante. Le emissioni considerate all'interno del settore "Altro" in tabella (rifiuti + emissioni fuggitive + agricoltura), sono il 2,5% del totale nel 2013 e decrescono rispetto al 1990 del 43%. Il decremento più grande è osservato per il settore della produzione di elettricità e calore (-97%), ma ha un contributo sul totale non significativo in quanto inferiore all'1%.

Sorgenti chiave

La realizzazione di un inventario delle emissioni richiede la creazione di un piano di miglioramento e, quindi, la definizione di categorie prioritarie su cui intervenire e per le quali definire metodologie più approfondite di stima: le sorgenti chiave. Una sorgente chiave è una sorgente rilevante per le emissioni di uno o più inquinanti in termini di valore assoluto, di *trend* o di grado di incertezza nella stima. In termini di valore assoluto, le sorgenti chiave possono essere definite considerando una soglia predefinita ai contributi cumulativi alle emissioni totali ovvero quelle i cui contributi ordinati in modo decrescente contribuiscono a più dell'80% della somma totale delle sorgenti $L_{x,t,i}$:

$$L_{x,t,i} = \frac{E_{x,t,i}}{\sum E_{t,i}} \quad [4]$$

dove:

$L_{x,t,i}$: contributo della sorgente x nell'anno t alle emissioni dell'inquinante i;

$E_{x,t,i}$: emissioni stimate dell'inquinante i dalla sorgente x per l'anno t;

$\sum_{E_{t,i}}$: somma delle emissioni dell'inquinante i per l'anno t.

Alcune sorgenti possono essere poco rilevanti rispetto all'analisi dei contributi ma possono presentare

un elevato incremento nel tempo. Secondo il manuale EMEP/EEA (EMEP/EEA, 2013), l'analisi del *trend* permette di valutare categorie che possono non essere abbastanza grandi da venire individuate tramite il valore assoluto ma il cui andamento è significativamente differente da quello complessivo dell'inventario. Il contributo della sorgente al *trend* è ottenuto dal confronto dell'andamento della sorgente con quello del totale delle emissioni:

$$T_{x,t,i} = E_{x,o,i} \times \left(\frac{E_{x,t,i} - E_{x,o,i}}{E_{x,o,i}} - \frac{\sum E_{t,i} - \sum E_{o,i}}{\sum E_{o,i}} \right) \quad [5]$$

dove:

$T_{x,t,i}$: contributo al trend della sorgente x dell'inquinante i nell'anno t stimato rispetto ad un anno base 0;
 $E_{x,t,i}$ ed $E_{x,o,i}$: emissioni dell'inquinante i stimate della sorgente x per l'anno t e per l'anno base 0;
 $\sum E_{t,i}$ ed $\sum E_{o,i}$: somma delle emissioni dell'inquinante i per l'anno t e per l'anno base 0.

In Tabella 2 sono riportate le sorgenti chiave o *Key Categories* (KC) per il 1990 e per il 2013 e quelle relative al *trend*.

Tabella 2: Sorgenti chiave per il *black carbon*

Sorgenti chiave - tipologia	Black carbon – Sorgenti chiave						% cumulata
1990 level	Automobili (22,1%)	Off-road agricoltura (19,8%)	Veicoli commerciali pesanti (15,2%)	Veicoli commerciali leggeri (12,1%)	Off-road industria (7,6%)	Riscaldamento residenziale (5,3%)	82,1
2013 level	Riscaldamento residenziale (35,8%)	Automobili (17,9%)	Veicoli commerciali leggeri (11,3%)	Veicoli commerciali pesanti (9,9%)	Off-road agricoltura (7,9%)		82,8
trend	Riscaldamento residenziale (45,5%)	Off-road agricoltura (17,7%)	Veicoli commerciali pesanti (7,8%)	Off-road industria (6,4%)	Automobili (6,2%)		83,7

Dalla tabella si evince come il riscaldamento residenziale fosse nel 1990 la sorgente chiave minore, mentre risulta la più importante nel 2013; conseguentemente è la categoria che influenza maggiormente l'andamento delle emissioni negli anni e dunque principale KC per il *trend*. Anche se è opportuno ricordare che i trasporti su strada nel loro complesso (automobili + veicoli commerciali + cicli e motocicli) restano la componente principale, specialmente grazie al diesel, sia nel 1990 sia nel 2013.

Conclusioni

Il *black carbon* è un componente del materiale particolato la cui riduzione può comportare vantaggi sia dal punto di vista del sistema climatico sia da quello dell'inquinamento atmosferico con tutto ciò che da esso deriva, come l'impatto sulla conservazione dei beni culturali. Per poter intervenire in maniera efficace innanzitutto occorre conoscere le sorgenti, le quantità in gioco e le possibilità di abbattimento. Per far ciò, è indispensabile che la comunità scientifica internazionale e nazionale concentri i propri sforzi nella standardizzazione delle definizioni riguardanti la frazione carboniosa del materiale particolato e nella definizione degli *standard* di misura.

Occorre finalizzare gli studi in campo sperimentale sulle misurazioni di BC come definito nel primo paragrafo in modo da produrre fattori di emissione coerenti tra di loro e con l'obiettivo prefissato. Il passo seguente sarà quello di avviare delle apposite campagne di indagine sulle sorgenti chiave in modo da definire la peculiarità della situazione italiana e definire dei fattori di emissione *country specific*.

Bibliografia

- Barca D, Comite V, Belfiore C M, Bonazza A, La Russa MF, Ruffolo SA, Crisci GM, Pezzino A, Sabbioni C: *Impact of air pollution in deterioration of carbonate building materials in Italian urban environments*. Applied Geochemistry 48, 2014, p. 122-131.
- Bond T. C., Doherty S. J., Fahey D. W., Forster P. M., Berntsen T., DeAngelo B. J., Flanner M. G., Ghan S., Kärcher B., Koch D., Kinne S., Kondo Y., Quinn P. K., Sarofim M. C., Schultz M. G., Schulz M., Venkataraman C., Zhang H., Zhang S., Bellouin N., Guttikunda S. K., Hopke P. K., Jacobson M. Z., Kaiser J. W., Klimont Z., Lohmann U., Schwarz J. P., Shindell D., Storelvmo T., Warren S. G., and Zender C. S., 2013 *Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment*, J. Geophys. Res. Atmos., 118, 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171.
- Brimblecombe P, Grossi CM: *Aesthetic thresholds and blackening of stone buildings*. Science of the Total Environment 349, 2005, p. 175-189.
- EMEP/EEA, 2013. *Air Pollutant Emission Inventory Guidebook*. EEA. Technical report No 12/2013.
- Ghedini N, Sabbioni C, Bonazza A, Gobbi G, Zappia G.: *Quantitative data on carbon methodology for carbon speciation in black crusts on monuments*. Air pollution and Cultural Heritage, Saiz Jimenez (ed.), 2004 Taylor and Francis Group, London, ISBN 90 58096823, p. 31-37.
- Ghedini N, Ozga, Bonazza A, Dillillo M, Cachier H, Sabbioni C: "Atmospheric aerosol monitoring as a strategy for the preventive conservation of urban monumental heritage: The Florence Baptistery". Atmospheric Environment 45, 2011, p. 5979-5987.
- Grau-Bové J., Strlic M.: "Fine particulate matter in indoor cultural heritage: a literature review". Heritage Science, 2013, p. 1-18.
- Grossi CM, Brimblecombe P, Bonazza A, Sabbioni C, Zamagni J : *Sulfate and carbon compounds in black crust from the Cathedral of Milan and Tower of London*. Heritage Weathering and Conservation –Fort, Alvarez de Buergo, Gomez- Heras & Vazquez-Calvo (eds), Taylor and Francis Group, London, 2006, p. 441-446.
- Krupinska B, Van Grieken R, De Wael K, 2013: "Air quality monitoring in a museum for preventive conservation: results of a three-year study in the Plantin-Moretus Museum in Antwerp, Belgium". Microchemical Journal 110, p. 350-360.
- Lanting RW: "Black smoke and soiling". In: Lee SD, Schneider T, Grant LD, Verkverk PJ, Editors. Aerosols: research, risk assessment and control strategies. Williamsburg: Lewis Publishers; 1986, p. 923–32.
- May, J., Bosteels, D., Favre, C. 2010: *Emissions Control Systems and Climate Change Emissions*, AECC, 6 pp.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I 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.
- Nava S, Becherini F, Bernardi A, Bonazza A, Chiari M, Garcia-Orellana I, Lucarelli F, Ludwig N, Migliori A, Sabbioni C, Udisti R, Valli G, Vecchi R: *An integrated approach to assess air pollution threats to cultural heritage in a semi-confined environment: The case study of Michelozzo's Courtyard in Florence (Italy)*. Science of the Total Environment 408, 2010, p. 1403-1413.
- Ozga I, Bonazza A, Bernardi E, Tittarelli F, Favoni O, Ghedini N, Morselli L, Sabbioni C: "Diagnosis of surface damage induced by air pollution on 20th-century concrete buildings". Atmospheric Environment 45, 2011, p. 4986-4995.
- Putaud, J.P., Van Dingenen, R., Alastuey, A., Bauer, H., Birmili, W., Cyrys, J., Flentje, H., Fuzzi, S., Gehrig, R., Hansson, H.C., Harrison, R.M., Herrmann, H., Hitztenberger, R., Hueglin, C., Jones, A.M., Kasper-Giebl, A., Kiss, G., Kousa, A., Kuhlbusch, T.A.J., Loeschau, G., Maenhaut, W., Molnar, A., Moreno, T., Pekkanen,

J., Perrino, C., Pitz, M., Puxbaum, H., Querol, X., Rodriguez, S., Salma, I., Schwarz, J., Smolik, J., Schneider, J., Spindler, G., ten Brink, H., Tursic, J., Viana, M., Wiedensohler, A., Raes, F., 2010. *A European aerosol phenomenology-3: physical and chemical characteristics of particulate matter from 60 rural, urban, and kerbside sites across Europe*. Atmos. Environ. 44, 1308e1320.

ISPRA, 2015. *Italian emission inventory 1990-2013*. Informative inventory report 2015. <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/serie-storiche-emissioni>.

Ruffolo SA, Comite V, La Russa MF, Belfiore C M, Barca D, Bonazza A, Crisci GM, Pezzino A, Sabbioni C: "An analysis of the black crusts from the Seville Cathedral: A challenge to deepen the understanding of the relationships among microstructure, microchemical features and pollution sources". Science of the Total Environment 502, 2015, p. 157-166.

Seinfeld J.H., Pandis S.N., *Atmospheric Chemistry and Physics - from Air Pollution to climate change*, John Wiley and Sons, 2006

Sykorova I, Havelcova M, Zeman A, trejtnarova H: "Carbon air pollution reflected in depositson chosen building materials of Prague Castle". Science of the Total Environment 409, 2011, p. 4606-4611.

Viana M., Querol X., Reche C., Favez O., Malherbe L., Ustache A., Bartonova A., Liu H.Y., Guerreiro C., *Particle number (PNC) and black carbon (BC) in European urban air quality networks*, ETC/ACM

Watt J, Jarrett D, Hamilton R: "Dose-response functions for the soiling of heritage materials due to air pollution exposure". Science of the Total Environment 400, 2008, p. 415-424.

Watt J, Hamilton R, Lefevre R – A, Ionescu A: "Soiling" in *The effects of air pollution on cultural heritage*, 2009, p. 105-126.

WHO, 2012. *Health effects of black carbon*. ISBN: 978 92 890 0265 3.

Glossario

Aerosol carbonioso:

Frazione dell'aerosol contenente carbonio, sia elementare (EC) sia organico (OC).

Aerosol troposferico:

Sistema di particelle liquide e solide nella fascia più bassa dell'atmosfera (troposfera).

Albedo:

Rapporto tra il flusso luminoso globalmente diffuso in tutte le direzioni da una superficie e quello ricevuto da essa. Varia con il colore della luce e con la natura della superficie.

Climalterante:

Che contribuisce a produrre alterazioni al sistema climatico terrestre.

Flaring:

È una pratica relativa agli impianti produttivi, prevalentemente di estrazione di combustibili fossili ma anche impianti chimici o per la produzione di biogas, con la quale si brucia il gas in eccesso in quanto risulterebbe troppo costoso costruire infrastrutture adeguate per trasportarlo nei luoghi di consumo.

Nucleazione:

Formazione, a partire da una fase solida, liquida o gassosa, di aggregati di atomi o molecole (detti nuclei) di un'altra fase, in grado di accrescersi fino a produrre particelle di dimensione microscopica o superiore.

Open burning:

Combustione all'aperto di qualsiasi materiali senza ricorrere ad alcun tipo di sistema di controllo delle emissioni.

Strategia win - win:

È un'espressione inglese che indica la presenza di soli vincitori in una data situazione. Per estensione si considera win-win una qualsiasi cosa/azione che non scontenti o danneggi alcuno dei soggetti coinvolti.