



**ANPA**

Agenzia Nazionale per la  
Protezione dell'Ambiente

# Scienza e ambiente

---

## Conoscenze scientifiche e priorità ambientali

Volume II

Comitato Scientifico Anpa

Documenti 2/2002

ANPA - Comitato Scientifico

### **Informazioni legali**

L'Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente o le persone che agiscono per conto dell'Agenzia stessa non sono responsabili per l'uso che può essere fatto delle informazioni contenute in questo rapporto.

#### **Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente**

*Comitato Scientifico Anpa*

Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma

[www.anpa.it](http://www.anpa.it)

© ANPA, Documenti 2/2002

ISBN 88-448-0088-8

*Riproduzione autorizzata citando la fonte*

#### **Coordinamento ed elaborazione grafica**

ANPA, Dipartimento Strategie Integrate, Promozione e Comunicazione

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto di copertina: "NRAO Images from the radio Sky", NASA, G. Haslam

#### **Coordinamento tipografico**

ANPA, Dipartimento Strategie Integrate, Promozione e Comunicazione

#### **Impaginazione e stampa:**

I.G.E.R. srl - V.le C.T. Odascalchi, 67/A - 00147 Roma

Stampato su carta TCF

Finito di stampare nel mese di Settembre 2002

**ANPA**  
**COMITATO SCIENTIFICO DI SUPPORTO AL COMMISSARIO**  
*Ordinanza n. 7 del 14 settembre 2001*

Commissario

Prof. Renato Angelo RICCI

Coordinatore:

Prof. Francesco BATTAGLIA

Segreteria

Sig.ra Angela ROSATI

Componenti

Prof. Argeo BENCO  
Prof. Tullio BRESSANI  
Prof. Ezio BUSSOLETTI  
Prof.a Cinzia CAPORALE  
Prof. Giovanni CARBONI  
Prof. Elio DESIMONI  
Prof. Rodolfo FEDERICO  
Prof. Giovanni FOCHI  
Prof. Roberto HABEL  
Prof. Annibale MOTTANA  
Prof. Franco PANIZON  
Prof. Carlo PELANDA  
Prof. Francesco SALA  
Prof. Paolo SEQUI  
Prof. Umberto TIRELLI  
Prof. Giorgio TRENTA  
Prof. Paolo VECCHIA  
Prof. Antonio VITALE

**UNITÀ DI SUPPORTO DOCUMENTALE DEL COMITATO SCIENTIFICO**

Ing. Maurizio COLAGROSSI  
Ing. Alfredo LEONARDI  
Ing. Vanio ORTENZI  
Dr.a Francesca QUERCIA  
Dr. Giancarlo TORRI

Si ringraziano gli ingegneri:

**Mario Cirillo**

Dipartimento Ambiente - Settore Emissioni

**Domenico Gaudio**

Responsabile del Settore Clima e Ambiente Globale dell'ANPA per la preziosa collaborazione fornita nella stesura di alcuni dei documenti qui contenuti.

# Indice

|                      |          |
|----------------------|----------|
| <b>PRESENTAZIONE</b> | <b>1</b> |
|----------------------|----------|

|                     |          |
|---------------------|----------|
| <b>INTRODUZIONE</b> | <b>3</b> |
|---------------------|----------|

## **L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO NELLE AREE URBANE**

|  |          |
|--|----------|
| <b>1. Emissioni e qualità dell'aria</b>  | <b>7</b> |
| <b>2. Misure tecnologiche per il contenimento delle emissioni in atmosfera nelle aree urbane</b> | <b>9</b> |
| Allegato 1 - Benzene   | 14       |
| Allegato 2 - Biossido di zolfo   | 15       |
| Allegato 3 - Ossidi di azoto   | 17       |
| Allegato 4 - Ossido di carbonio  | 19       |
| Allegato 5 - Ozono   | 21       |
| Allegato 6 - Piombo  | 23       |
| Allegato 7 - PM10  | 24       |
| Figura e Tabelle   | 26       |
| Bibliografia   | 35       |

## **L'INQUINAMENTO NEGLI AMBIENTI CONFINATI**

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Considerazioni generali</b>                    | <b>37</b> |
| Allegato 1 - Agenti biologici                        | 40        |
| Allegato 2 - Amianto                                 | 43        |
| Allegato 3 - Composti organici volatili              | 45        |
| Allegato 4 - Fumo passivo                            | 49        |
| Allegato 5 - Idrocarburi policiclici aromatici       | 59        |
| Allegato 6 - Monossido di carbonio                   | 61        |
| Allegato 7 - Ossidi di azoto                         | 63        |
| Allegato 8 - Ossidi di zolfo                         | 65        |
| Allegato 9 - Ozono                                   | 67        |
| Allegato 10 - Particolato atmosferico (PM2.5 e PM10) | 68        |
| Allegato 11 - Pesticidi                              | 71        |
| Allegato 12 - Piombo                                 | 72        |
| Allegato 13 - Radon                                  | 74        |
| Bibliografia   | 84        |

**ENERGIA E AMBIENTE**

|           |  |     |
|-----------|--|-----|
| <b>1.</b> | <b>Introduzione</b>                                  | 87  |
| <b>2.</b> | <b>Combustibili fossili</b>                          | 92  |
|           | 2.1 - Le riserve                                     | 92  |
|           | 2.2 - L'impatto ambientale                           | 93  |
| <b>3.</b> | <b>Energie rinnovabili</b>                           | 95  |
|           | 3.1 - Energia solare                                 | 96  |
|           | 3.2 - Energia eolica                                 | 97  |
|           | 3.3 - Energia idroelettrica                          | 98  |
|           | 3.4 - Biomassa                                       | 98  |
| <b>4.</b> | <b>Energia geotermica</b>                            | 101 |
| <b>5.</b> | <b>Idrogeno</b>                                      | 102 |
| <b>6.</b> | <b>Energia nucleare</b>                              | 104 |
|           | 6.1 - La situazione internazionale                   | 104 |
|           | 6.2 - La riflessione in atto                         | 106 |
|           | 6.3 - Prospettive di sviluppo                        | 108 |
|           | 6.4 - La sicurezza                                   | 109 |
|           | 6.5 - Il ciclo del combustibile                      | 109 |
|           | 6.6 - Le scorie radioattive                          | 111 |
|           | 6.7 - Il rischio nell'esercizio normale              | 112 |
|           | 6.8 - La probabilità di incidenti                    | 113 |
|           | 6.9 - L'innovazione tecnologica e la sicurezza       | 115 |
|           | 6.10 - Il rischio comparato ad altre fonti d'energia | 116 |
|           | 6.11 - Energia nucleare e i gas serra                | 119 |
| <b>7.</b> | <b>Conclusioni</b>                                   | 119 |
|           | Bibliografia   | 122 |

**SUL CONTRIBUTO ANTROPOGENICO AI CAMBIAMENTI CLIMATICI**

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>1.</b> | <b>Premessa</b>   | 125 |
| <b>2.</b> | <b>Fonti delle conoscenze</b>                           | 125 |
| <b>3.</b> | <b>Stato delle conoscenze</b>                           | 127 |
|           | 3.1 - Contributo antropogenico al riscaldamento globale | 127 |
|           | 3.2 - "Previsioni" sul riscaldamento globale            | 130 |
|           | 3.3 - Altre "previsioni"                                | 134 |
| <b>4.</b> | <b>L'approccio probabilistico e di scenario</b>         | 135 |
| <b>5.</b> | <b>Conclusioni</b>                                      | 137 |
|           | Bibliografia  | 139 |

## Presentazione

Esce il secondo volume predisposto dal Comitato Scientifico dell'ANPA che raccoglie un'ulteriore serie di studi ed analisi condotte con rigore scientifico su argomenti di rilevanza ambientale quali:

1. Inquinamento atmosferico nelle aree urbane
2. Inquinamento negli ambienti confinati
3. Energia e ambiente
4. Contributo antropogenico ai cambiamenti climatici

Questi studi si aggiungono ai 5 che hanno formato oggetto del primo volume già presentato (Rischi ambientali da piante GM, Radiazioni ionizzanti, Campi elettromagnetici e salute, Inquinamento delle matrici ambientali, Rischi da fumo ambientale) e che sembra aver riscosso un notevole interesse presso gli ambienti istituzionali e politici.

Con questa opera si conclude il lavoro del Comitato Scientifico dell'ANPA, istituito dal Commissario il 14/9/2001 all'inizio della gestione commissariale con il duplice compito di contribuire ad una più qualificata presentazione dei problemi ambientali basata su dati scientificamente affidabili da una parte e, dall'altra, ad una più consona valorizzazione ed evidenziazione di conoscenze e dati ambientali risultanti dalle specifiche attività condotte all'interno dell'ANPA.

Attività queste che non sempre e non in modo apparente erano emerse a dimostrazione della capacità e delle competenze tecniche del personale ANPA, di fronte all'imperversare di notizie ed informazioni provenienti da origini varie, spesso di non rilevante qualificazione, privilegiate dal circuito massmediatico e da condiscendenze politico-ideologiche.

A dimostrazione di quanto qui evidenziato basterà citare la pubblicazione, voluta dalla gestione commissariale, del primo Annuario dei Dati Ambientali ANPA presentato in conferenza stampa dal Ministro Altero Matteoli, che ne ha sancito adeguatamente il compito istituzionale, nel marzo di quest'anno.

Questa nuova serie di studi viene offerta alle Istituzioni, al mondo politico e all'opinione pubblica, con la consapevolezza di adempiere ad un dovere che riguarda l'affermazione dell'oggettività scientifica, pur nell'ambito delle incertezze e delle possibilità aperte alla discussione, purché non venga travisato il valore delle conoscenze acquisite che, sole, possono costituire il substrato necessario ad ogni valutazione e decisione politica e ad ogni collocazione sociale.

Non ci resta che esprimere il più vivo apprezzamento per l'opera e il servizio, completamente disinteressato, reso dai colleghi membri del Comitato Scientifico il cui valore e la cui integrità e correttezza si sono dimostrate indi-

spensabili; nonché dai dipendenti ANPA dell'Unità di Supporto che hanno validamente contribuito, insieme con il personale di segreteria, al successo di questo lavoro.

Un doveroso apprezzamento inoltre al personale ANPA dei vari Dipartimenti e settori che hanno fornito risultati e competenze di ottimo livello e di grande validità e un ringraziamento sentito alla Direzione ANPA che ha fornito il supporto tecnico e organizzativo necessario.

A Franco Battaglia, Coordinatore del Comitato Scientifico, va un particolare riconoscimento per la cura portata all'organizzazione di tale lavoro, che si evidenzia nell'esauriente introduzione al volume qui presentato.

Si ringrazia, infine, la Sig.ra Angela Rosati per la preziosa collaborazione senza la quale la stesura definitiva dei documenti, nella forma qui presentata, non sarebbe stata possibile.

*Renato Angelo Ricci*  
*Commissario Straordinario ANPA*

*Giorgio Cesari*  
*Direttore ANPA*



## Introduzione

Le questioni di interesse ambientale sono innanzitutto questioni scientifiche. E i responsabili politici che desiderano consulenza dovrebbero affidarsi innanzitutto ai pareri delle associazioni scientifiche. Queste, nell'esprimere quei pareri, mettono in gioco la propria stessa credibilità e pertanto si può essere abbastanza confidenti sulla attendibilità di quel parere rispetto alla mole di conoscenze attuali. Naturalmente non bisogna confondere il parere di un organo collegiale con quello di un singolo scienziato, foss'anche questi di sicuro e accreditato valore. Inoltre, nella difficile fase decisionale ai fini di affrontare un problema di interesse per la salvaguardia dell'ambiente e della salute, e che vede i responsabili politici coinvolti in prima persona, bisogna che si tengano ben presenti, per ogni singolo problema, quali siano i **fattori dominanti** e concentrarsi su essi se non si vuole correre il rischio di impiegare risorse, a volte anche ingenti, senza ottenere alcun giovamento. Bisogna cioè avere un approccio *quantitativo* ad ogni singolo problema.

In questo secondo volume di rapporti, il Comitato Scientifico (CS) continua il lavoro iniziato nel volume precedente affrontando, con l'approccio quantitativo cui si accennava sopra, altri temi di interesse ambientale. Ad esempio, nel precedente volume si è osservato che ogni rischio ipotizzabile dall'agricoltura con OGM è ipotizzabile, ed è maggiore, anche per l'agricoltura convenzionale e biologica. E si è osservato che per ogni allocazione di risorse destinata a "salvare" un ipotetico bambino che ogni anno contrarrebbe la leucemia a causa dei campi magnetici a frequenza industriale (qualora questi fossero veramente un rischio), bisognerebbe allocare una quota 400 volte maggiore per affrontare la leucemia degli altri 400 bimbi che ogni anno si ammalano per cause *certamente* diverse dall'esposizione a quei campi. E si è anche osservato quanto peculiare sia quella norma che vorrebbe il contributo antropogenico di radioattività inferiore alla *metà* del contributo naturale, pur sapendo che dosi anche 50 volte superiori a quella naturale media sono innocue: le risorse impiegate per mantenere dosaggi tanto bassi quanto di nessuna protezione sanitaria, sono risorse stornate da problemi sanitari accertati e non adeguatamente affrontati.

Ed ecco i temi trattati in questo secondo volume.

1. **Inquinamento atmosferico urbano.** Le sostanze emesse nell'aria dalle attività dell'uomo (principalmente la combustione dei combustibili fossili) hanno spesso un effetto dannoso per l'ambiente e per la salute. Fino a qualche decennio fa, l'inquinamento atmosferico urbano era dovuto al riscaldamento invernale innanzitutto e, poi, al traffico automobilistico. L'uso sempre più diffuso del metano per il riscaldamento domestico e l'aumento del traffico automobilistico ha fatto sì che questo è diventato la prin-

cipale causa di inquinamento atmosferico urbano. Va detto che, anche se nel complesso l'aria è oggi più pulita che ieri (e ciò anche grazie agli avanzamenti tecnologici che fanno produrre vetture meno inquinanti), è necessario che i responsabili politici si adoperino per mantenere sotto controllo questo tipo di inquinamento. Essi dovrebbero essere consapevoli che provvedimenti di carattere emergenziale del tipo "domeniche a piedi" o "targhe alterne" hanno, conti alla mano, effetto pressoché nullo, ed è ad un'analisi scientificamente condotta che dovrebbero affidarsi per individuare quei fattori dominanti sui quali operare per migliorare *quantitativamente* la qualità dell'aria.

2. **Inquinamento negli ambienti confinati.** In questo documento si analizzano sistematicamente i principali responsabili dell'inquinamento *indoor*. Si ripropone qui quello del fumo passivo a testimonianza dell'importanza che questo CS attribuisce a questo inquinante, soprattutto tenendo conto dell'alto rapporto benefici/costi che si avrebbe ove si adottassero misure restrittive al fumo nei locali aperti al pubblico. Il fumo di tabacco, a causa delle centinaia di sostanze inalate, molte con effetti dannosi accertati e molte con rischio accertato di tumore al polmone (oltre il 90% dei malati affetti da tumore al polmone sono fumatori), è stato inserito dalla IARC nella classe dei *cancerogeni*. Chi non fuma potrebbe essere involontariamente esposto al fumo altrui (fumo passivo) e correre analoghi e accertati rischi. Una società che intendesse responsabilmente proteggere la salute di chi quei rischi non vuole correre dovrebbe adoperarsi per attuare e far applicare opportune norme di protezione.
3. **Energia e ambiente.** L'accesso a quote consistenti di energia è di fondamentale importanza per il benessere di tutti noi. L'uso dell'energia, però, comporta rischi (come ogni attività umana) e può comportare inquinamento dell'ambiente. Alcune modalità di produzione d'energia sono più inquinanti, altre meno. Ma prima di proporre queste ultime è necessario valutare, ancora una volta *quantitativamente*, il loro contributo. Ad esempio, è vero che l'idrogeno quando brucia produce solo acqua, ma non bisogna trascurare il fatto che esso non esiste sulla Terra: esso va prodotto con una spesa energetica di produzione superiore all'energia ottenuta dalla sua combustione. Non sono pertanto illegittimi i dubbi che la transizione ad un'economia ad idrogeno si possa mai realizzare e, comunque, dovesse mai realizzarsi, ciò non è previsto avvenire prima di diversi decenni da oggi. E non bisogna trascurare il fatto che l'energia necessaria ad alimentare le attività in una grande città, se ottenuta tutta dal sole, richiederebbe una zona d'ombra equivalente ad una piccola deforestazione, o che per ottenere dal vento una quantità di energia pari ad un

terzo del nostro fabbisogno bisognerebbe installare 100.000 turbine eoliche. D'altra parte, è un fatto che la Danimarca, paese che più di ogni altro investe in ricerca sulle fonti rinnovabili, deve ridurre ben del 21% le proprie emissioni per soddisfare i requisiti del protocollo di Kyoto, mentre la Francia, che sulle rinnovabili investe, percentualmente, 40 volte meno della Danimarca, ma che fruisce di quasi 60 centrali nucleari attive, soddisfa già i requisiti di quel protocollo (l'Italia deve diminuire le proprie emissioni del 6.5% rispetto a quelle del 1990). Insomma, la questione dell'uso dell'energia nel rispetto dell'ambiente è essa stessa complessa e non può essere lasciata in balia né di fattori emotivi né di speculazioni irresponsabili: la domanda energetica del Paese è in aumento ed è necessario soddisfarla minimizzando i danni ambientali. Questo documento vuole essere una guida per poter distinguere ciò che si può fare da ciò che si può solo desiderare.

4. **Contributo antropogenico ai cambiamenti climatici.** La complessa questione del presunto contributo antropogenico ai cambiamenti climatici è stata affrontata, dai politici del mondo, con scarsa attenzione a quell'approccio *quantitativo* che qui si auspica. Si sta diffondendo la sensazione che l'applicazione del protocollo di Kyoto (la riduzione del 5.5% delle emissioni di anidride carbonica da parte dei paesi industrializzati) sia "un primo passo" per affrontare la questione. Non appare chiaro quali sarebbero gli altri "passi", né perché mai un complesso sistema come quello climatico possa essere governato controllando un solo parametro, la concentrazione di anidride carbonica, (con analogo ragionamento, si potrebbe dire che anche montare su uno sgabello sarebbe un primo passo per raggiungere la luna). Vediamo perché: nell'atmosfera vi sono 3.000.000 Mt di CO<sub>2</sub>, l'uomo ne immette ogni anno 6.000 Mt, di cui la metà proveniente dai paesi industrializzati. Il protocollo di Kyoto, quindi, prevede che ogni anno se ne immettano 5850 Mt anziché 6000. Non sembrano necessari ulteriori commenti sulle speranze di efficacia di quel protocollo. Sulle basi scientifiche che hanno condotto a quella scelta, si rimanda al documento.

*Franco Battaglia*  
 Coordinatore del Comitato Scientifico ANPA



# L'inquinamento atmosferico nelle aree urbane

## 1. Emissioni e qualità dell'aria

Nelle aree urbane, traffico, riscaldamento domestico e attività produttive sono le principali fonti di emissione di inquinanti in atmosfera. A partire dalla fine degli anni '70 le emissioni di biossido di zolfo sono state abbattute grazie all'introduzione negli usi civili e industriali di combustibili a basso tenore di zolfo e alla penetrazione del gas naturale, che di zolfo è praticamente privo. Questo, insieme ad altre misure di intervento sui processi (miglioramento dell'efficienza, processi meno inquinanti, etc.) e/o sulle emissioni (abbattimento degli inquinanti ai camini) ha portato, a partire dalla seconda metà degli anni '80, a un generalizzato decremento delle emissioni da fonti fisse anche per altri inquinanti, tra cui polveri (le cui emissioni sono significativamente legate al contenuto di zolfo nei combustibili), ossidi di azoto, monossido di carbonio, composti organici.

La situazione tra le diverse regioni per quanto riguarda le pressioni sull'ambiente atmosferico è comunque fortemente disomogenea, come viene illustrato dalla figura 1 dove vengono riportati in grafico, per ogni regione, il valore aggiunto pro capite e le emissioni di biossido di zolfo ( $\text{SO}_2$ ), ossidi di azoto ( $\text{NO}_x$ ) e anidride carbonica ( $\text{CO}_2$ ) per unità di valore aggiunto, in rapporto alla media nazionale. Dalla figura si vede che la ricchezza *pro capite* prodotta diminuisce andando da nord verso sud, mentre parallelamente le pressioni sull'ambiente atmosferico (emissioni per unità di valore aggiunto) aumentano, il che illustra come maggiore produzione di ricchezza non significa necessariamente maggiori pressioni sull'ambiente: nel caso degli inquinanti considerati in figura, proprio nelle regioni meno ricche si riscontrano le maggiori emissioni.

Relativamente alle emissioni dal settore trasporti stradali, l'aumento del numero dei veicoli e dei chilometri percorsi ha in parte controbilanciato l'effetto positivo dovuto alla penetrazione di veicoli meno inquinanti; questo ha fatto permanere, o comunque non ha affrontato nella misura auspicata, i problemi legati alle emissioni di inquinanti caratteristici del traffico.

Attualmente, in corrispondenza delle aree urbane, i trasporti stradali costituiscono su base annua la principale fonte di emissione per inquinanti come ossidi di azoto, composti organici volatili (tra cui benzene), monossido di carbonio, polveri (PM, in particolare polveri fini<sup>1</sup>, quella frazione di polveri, cioè,

<sup>1</sup> Per "polveri fini" di solito si intendono le particelle di dimensioni inferiori ai 2.5 micrometri (o più precisamente, con diametro aerodinamico inferiore a 2.5 micrometri), indicate come PM2.5. Nella normativa italiana attuale i limiti di concentrazione in aria delle particelle sono riferiti al PM10, ovvero particelle di dimensioni inferiori a 10 micrometri.

che è maggiormente responsabile dei danni alla salute). Questo, accompagnato dal fatto che i veicoli emettono praticamente a livello del suolo (per cui le alte concentrazioni degli inquinanti emessi si fanno sentire soprattutto nelle immediate vicinanze dei punti di emissione), li rende le fonti di impatto più importanti a scala locale.

Recentemente con Decreto Ministeriale del 2 aprile 2002 n. 60 sono state recepite le Direttive 1999/30/CE e 2000/69/CE che stabiliscono i nuovi valori limite in aria delle concentrazioni di biossido di zolfo, biossido e ossidi di azoto, PM10, piombo, benzene e monossido di carbonio (tabelle 1 e 2). Inoltre, è stata emanata la Direttiva 2002/3/CE che stabilisce i nuovi valori limite di concentrazione in aria per l'ozono (tabella 3). Per ognuno di questi inquinanti si allega una scheda sintetica (Allegati 1-7) che ne descrive la provenienza, gli effetti, i limiti posti alle concentrazioni, la situazione in Italia per quanto riguarda il rispetto dei nuovi valori limite e i possibili provvedimenti con riferimento alle aree urbane. La scelta degli inquinanti è stata fatta tenendo conto solo di quelli per i quali esistono valori limite sulla base dalle recenti direttive comunitarie. Esistono naturalmente altri agenti inquinanti che non sono stati qui inclusi in quanto ancora non sono state emanate le direttive che ne fissano i valori limite. Ricordiamo, ad esempio, gli idrocarburi policiclici aromatici e i metalli catalizzatori (platino, palladio) usati nelle marmitte catalitiche, la cui diffusione nell'ambiente potrebbe creare nuove preoccupazioni in un futuro prossimo.

Come si vede dalle tabelle 1 e 2, la nuova normativa prevede in molti casi dei margini di tolleranza che si sommano ai valori limite e decrescono nel tempo fino ad azzerarsi alla data in vigore del valore limite. Le aree urbane dove si riscontrano superamenti dei valori limite aumentati dei margini di tolleranza, o valori compresi tra il valore limite e il valore limite aumentato del margine di tolleranza, rientrano tra le zone del territorio regionale per le quali l'autorità competente è tenuta a realizzare piani e programmi per il raggiungimento dei valori limite entro i termini stabiliti (decreto legislativo 4.8.99 n. 351 "attuazione della Direttiva 96/62/CE in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria"). Inoltre le informazioni relative alle zone per le quali vi sono superamenti del valore limite oltre il margine di tolleranza devono essere inviate alla Commissione Europea, sempre ai sensi del menzionato decreto legislativo.

In linea generale si può dire che nelle nostre aree urbane, sulla base dell'informazione disponibile, i dati attuali di concentrazione per biossido di zolfo e piombo sono in linea con i nuovi standard europei: qualche incertezza permane per lo standard sul breve periodo del biossido di zolfo (350 microg/m<sup>3</sup>, come media oraria da non superare più di 24 volte l'anno), per mancanza

di dati orari di concentrazione di questo inquinante. Le concentrazioni attuali di biossido di azoto, benzene e monossido di carbonio sono talvolta al di sopra degli standard europei. Infine, le concentrazioni di PM10 sono molto spesso al di sopra dei nuovi standard, e lo stesso problema ha l'ozono.

Nel caso del PM10 il nuovo valore limite per la protezione della salute umana, che deve essere rispettato entro il 2005, fa riferimento alla concentrazione media giornaliera, e impone che tale concentrazione non debba superare il valore di 50 microg/m<sup>3</sup> più di 35 volte l'anno. Il fatto che in alcune città italiane nel solo mese di gennaio si superino i 50 microg/m<sup>3</sup> fino a 27 volte (tabella 4), fa capire la situazione in termini di rispetto del nuovo valore limite.

Per quanto riguarda l'ozono, la tabella 5 mostra i superamenti della "soglia di informazione" per l'ozono di cui alla direttiva 2002/3/CE: anche in questo caso si evidenzia in Italia una situazione generalmente fuori norma.

PM10 e ozono sono quindi gli inquinanti su cui maggiormente nell'immediato futuro si renderanno necessari interventi specifici per l'adeguamento ai nuovi valori limite della qualità dell'aria.

## **2. Misure tecnologiche per il contenimento delle emissioni in atmosfera nelle aree urbane**

Assodato che il traffico stradale è il principale fattore di pressione sulla qualità dell'aria nelle città, è su questo che bisogna concentrare gli sforzi per ridurre l'impatto. Il traffico stradale nelle aree urbane si compone di diverse tipologie di veicoli: per il trasporto delle persone vi sono autobus, automobili, ciclomotori (< 50 cc) e motocicli (> 50 cc); per le merci, veicoli commerciali leggeri (<3,5 t) e pesanti (>3,5 t).

Le misure a carattere tecnico che si possono adottare per ridurre le emissioni da traffico su strada sono classificabili in due grandi tipologie:

1. Sostituzione di veicoli vecchi e molto inquinanti con veicoli nuovi che emettono molto meno. Il rinnovo del parco veicolare può prevedere:
  - a. la sostituzione con nuovi veicoli di tipo "convenzionale" a benzina, gasolio, GPL, gas naturale;
  - b. la sostituzione con veicoli innovativi: elettrici, ibridi, ad aria compressa, a idrogeno.
2. Utilizzo di combustibili più puliti su veicoli esistenti, con eventuale concomitante installazione di dispositivi per l'abbattimento delle emissioni. A tale proposito si prevede l'uso dei cosiddetti combustibili cosiddetti "a basso impatto ambientale" quali biodiesel, emulsioni e gasolio a bassis-

simo tenore di zolfo, eventualmente accoppiato all'installazione di dispositivi per l'abbattimento delle emissioni.

In particolare, le speranze suscitate dai carburanti d'origine vegetale sono state oggetto di critiche varie. I grassi vegetali utilizzabili per produrre carburanti diesel appartengono alla classe chimica dei trigliceridi (èsteri della glicerina) e, come tali, non possono essere impiegati direttamente nei motori diesel, se non altro perché non sono volatili. Devono dunque subire una trasformazione chimica industriale: la cosiddetta transesterificazione, che li trasforma in èsteri del metanolo o dell'etanolo. A questo scopo le materie prime sono metanolo d'origine petrolchimica, etanolo anch'esso d'origine petrolchimica (ma può anche derivare da biomassa), trigliceridi contenuti negli oli di colza (uso prevalente europeo) e di soia (uso prevalente americano). Si ottengono èsteri metilici o etilici di acidi organici a catena lunga.

Per quanto riguarda le voci critiche, si veda per esempio l'articolo pubblicato dal periodico dell'ordine interprovinciale dei chimici lombardi. Nell'introduzione si legge: "La possibilità di ottenere combustibili diesel da sostanze grasse è stata ripetutamente tentata, con risultati costantemente negativi nel loro complesso tecnico-economico. Le reclamizzate emissioni dei motori alimentati con biodiesel sono sì meno inquinanti di quelle del gasolio in quanto prive di  $\text{SO}_2$ , ma sono circa altrettanto inquinanti per CO e  $\text{NO}_x$  e più inquinanti per formaldeide e acroleina". L'articolo conclude così: "La destinazione di coltivazioni di piante oleaginose a scopo energetico (il cosiddetto *fuel harvesting*) urta contro l'esigenza di estensioni enormi di terreno fertile, che verrebbe sottratto alla sua logica e sostenibile destinazione all'alimentazione umana e all'allevamento del bestiame". In poche parole, è difficile presentare il biodiesel come grande amico dell'ambiente, sia in generale sia in riferimento ai centri urbani.

La questione è approfondita in un lavoro italiano basato su ampi studi sperimentali. Per raggiungere l'obiettivo di sostituire con biodiesel il 5% del gasolio impiegato in Italia, bisognerebbe coltivare a colza una superficie pari - tanto per fare un paragone - al 73% di quella dedicata all'olivicoltura. Alla fine del processo ci sarebbero da smaltire ogni anno 4300 tonnellate d'idrocarburi usati per l'estrazione dell'olio vegetale.

L'osservazione sull'uso dei suoli agricoli trova un'interessante consonanza nell'intervento di David Pimentel della *Cornell University* (USA) che, a proposito della produzione d'etanolo da miscelarsi negli Stati Uniti alle benzine verdi in base al *Clean Air Act*, si è dichiarato contrario a coltivare apposta il granturco: a parte l'erosione del suolo e l'impoverimento delle falde acquifere, produrre etanolo per quella via consuma, fra coltivazione, distillazione del



liquido fermentato e altri trattamenti, il settanta per cento in più dell'energia che poi viene sviluppata dal prodotto nei motori.

Nel gennaio 2002, nel corso d'un convegno a Roma, l'economista Giuseppe Munda comunicò che il nostro paese produce il 70% del biodiesel europeo. In poche parole, gli altri paesi nel biodiesel ci credono molto meno (ma è la loro agricoltura a beneficiare dei nostri sconti fiscali per tale tipo di carburante). Il chimico Sergio Ulgiati espose inoltre i risultati d'alcuni calcoli molto interessanti: se il biodiesel dovesse essere miscelato al 5% in tutto il gasolio consumato in Italia, nella migliore delle ipotesi la produzione agricola nostrana, per far fronte alla domanda, sarebbe costretta ad aumentare del 200%, occupando il 50% di terreno in più. Crescerebbero del 20% anche l'acqua consumata e i pesticidi immessi nell'ambiente. L'obiettivo è dunque molto pericoloso, e comunque cozza con l'indisponibilità di nuovi suoli agricoli. Mario Giampietro, dell'Istituto Nazionale di Ricerca dell'Alimentazione e Nutrizione, portò l'esempio del Brasile, dove, per produrre il carburante bioetanolo sufficiente agli spostamenti di quarantamila persone, s'è dovuto frangere un inquinamento pari a quello delle attività di due milioni d'abitanti.

Di seguito si espongono alcune brevi considerazioni, senza nessuna pretesa di esaustività.

Nell'Unione Europea una serie di Direttive è stata indirizzata a regolamentare le emissioni dei veicoli a motore su strada. In particolare molte Direttive hanno origine dal programma Auto-Oil, che si è focalizzato sui seguenti temi avendo in mente la riduzione delle emissioni di anidride carbonica, monossido di carbonio, composti organici, ossidi di azoto, particolato:

- qualità dei combustibili
- dispositivi per l'abbattimento delle emissioni allo scarico (convertitori catalitici)
- ispezione abituale dei veicoli
- ricerca su nuove forme di propulsori e di carburanti.

Innanzitutto, è bene chiarire che l'anidride carbonica *non* è un inquinante. Essa si presume essere la causa dell'effetto serra e dei conseguenti cambiamenti climatici. Nel IV° capitolo si tratterà di questo argomento, sul quale recentemente la Comunità Scientifica ha sottolineato le incertezze sull'entità del fenomeno e le difficoltà di discriminare la componente antropogenica da quella naturale, ma va tuttavia detto che il problema connesso con l'anidride carbonica, ammesso che esista, non è configurabile entro quello, locale, dell'inquinamento atmosferico urbano ma, semmai, in un contesto globale.

Bisogna inoltre essere consapevoli delle reali potenzialità di ogni misura

adottata. Ad esempio, le marmitte catalitiche funzionano solo se la temperatura ha raggiunto alcune centinaia di gradi, cioè dopo che la vettura ha percorso oltre una decina di chilometri. Per cui nei piccoli centri urbani ove si fa uso della vettura per corti tragitti, la marmitta catalitica ha scarso effetto e, di conseguenza, lo scarso effetto ha anche sulla riduzione dell'ozono. Per cui, adottare il blocco dell'uso delle auto non catalizzate nei piccoli centri, è una misura con rilevanza scarsa se non addirittura nulla ai fini della riduzione dell'inquinamento. Inoltre, come già accennato, i metalli catalizzatori "spalmati" all'interno delle marmitte catalitiche, soprattutto il platino, non sono esenti da preoccupazioni: essi potrebbero formare complessi metallorganici, classificati come cancerogeni. La dispersione nell'ambiente di questi metalli è certa; riguardo all'entità di tale dispersione ed agli effetti prodotti si sa oggi ancora poco e sarebbe opportuno mantenere il problema sotto controllo.

Dal 1° gennaio 2005 benzina e diesel non devono contenere più di 50 ppm di zolfo, un livello sul quale si è raggiunto l'accordo alla fine del programma Auto-Oil I che ha visto coinvolti attivamente sia l'industria automobilistica che l'industria petrolifera. Il programma successivo Auto-Oil II ha seguito lo stesso approccio del primo, ma in maniera più integrata per quanto riguarda le fonti di emissioni e le possibili misure di risanamento dell'ambiente atmosferico. L'uso di modelli che descrivono anche le trasformazioni in atmosfera e la formazione di inquinanti secondari ha permesso di comprendere meglio le interazioni tra i diversi inquinanti. Inoltre in Auto-Oil II la partecipazione è stata allargata a Stati Membri e a Organizzazioni non Governative.

Dall'inizio del 2001 i limiti in vigore per nuove auto, veicoli commerciali e bus (euro III) hanno inasprito le norme in vigore dal 1997 (euro II); limitazioni più restrittive (euro IV) entreranno in vigore dal 2006. Per quanto riguarda ciclomotori e motocicli, nel 1999 c'è stato un inasprimento dei limiti alle emissioni (euro I) e una ulteriore limitazione si ha per i ciclomotori di nuova immatricolazione a partire dal 2002 (euro II).

Per quanto riguarda il ricorso a veicoli innovativi, in Italia si stanno cominciando a considerare i mezzi di trasporto collettivo di tipo elettrico ed ibrido di cui il parco circolante di bus a gennaio 2001 ammonta a 341 unità. Le automobili elettriche sono già sul mercato, però hanno dei prezzi decisamente ancora alti. Inoltre, esiste un limite naturale alla capacità degli accumulatori e, pertanto, non bisognerebbe fare troppo affidamento sullo sviluppo delle auto elettriche, essendo il loro raggio d'azione troppo limitato. Infine, anche se esse riducono l'inquinamento locale – fatto già di per sé interessante – quello globale dipende ovviamente dalle modalità di produzione dell'elettricità che serve per alimentarle.

Una soluzione interessante sembra essere quella delle auto ibride, ma allo

stato attuale i loro costi sono attualmente proibitivi e, si può dire, il loro mercato è ai primi passi all'estero. I veicoli ad aria compressa sono ad uno stadio di prototipo. I veicoli ad idrogeno sono ad uno stadio di ricerca/prototipo.

## Benzene (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>)

*Provenienza.* Il benzene è un inquinante che appartiene alla classe dei composti organici volatili. Il benzene è considerato un inquinante primario in quanto soprattutto nelle aree urbane le concentrazioni in aria derivano essenzialmente dal benzene emesso direttamente in atmosfera da fonti antropiche, soprattutto dal traffico stradale che costituisce di gran lunga la principale fonte di emissione: in Italia circa il 72% del benzene viene emesso dal traffico stradale, la maggior parte da auto a benzina, e questa percentuale sale all'88% nelle aree urbane.

*Effetti e limiti alle concentrazioni.* Il benzene è un agente cancerogeno. La cancerogenicità del benzene è stata dimostrata sia in animali da laboratorio che negli esseri umani.

La Direttiva 2000/69/CE recepita nel nostro Paese con DM 2 aprile 2002 n. 60 stabilisce il seguente valore limite di benzene per la protezione della salute umana: 5 microg/m<sup>3</sup> come media anno civile. Data alla quale il valore limite deve essere raggiunto: 1 gennaio 2010.

La Direttiva 2000/69/CE stabilisce anche un *margine di tolleranza* rispetto ai valori limite, che decresce gradualmente nel tempo fino ad annullarsi alla data di entrata in vigore di detti valori.

*La situazione in Italia.* Nelle aree urbane alcuni valori riscontrati ad oggi sono superiori al valore limite. C'è da dire comunque che per questo inquinante le emissioni sono in decremento sia a causa della diminuzione della percentuale di benzene e di aromatici nelle benzine che grazie alla penetrazione dei veicoli catalizzati, e questo si riflette in un parallelo decremento delle concentrazioni in aria.

*Possibili provvedimenti.* Nel caso del benzene, analogamente al CO, è ragionevole assumere una proporzionalità diretta tra emissioni e concentrazioni, per cui se si dimezzano le emissioni stesso effetto hanno le concentrazioni negli ambiti spaziali oggetto dei provvedimenti sulle emissioni. In particolare, per questo inquinante provvedimenti estemporanei di blocco o limitazione del traffico si rivelano generalmente efficaci.

## Biossido di zolfo (SO<sub>2</sub>)

*Provenienza.* L'SO<sub>2</sub> di origine antropica in atmosfera deriva essenzialmente dalla combustione di combustibili contenenti zolfo. Una volta emesso in atmosfera, l'SO<sub>2</sub> si ossida ad acido solforico e solfati, formando un aerosol spesso associato con altri inquinanti in particelle solide o liquide, ed è all'origine del fenomeno di inquinamento transfrontaliero noto con il nome di precipitazioni acide.

Le emissioni di biossido di zolfo sono sensibilmente diminuite fin dagli anni '80, grazie alla legislazione che impone sempre più bassi tenori di zolfo nei combustibili e alla penetrazione del gas naturale, che di zolfo è praticamente privo. Ciò ha ridotto sensibilmente le emissioni di SO<sub>2</sub> dalle piccole e medie fonti di emissione (inclusi i trasporti), per cui la principale fonte di emissione sono attualmente i grandi impianti di combustione (centrali termoelettriche non alimentate con metano e altri impianti).

*Effetti e limiti alle concentrazioni.* Effetti per esposizioni su periodi brevi (fino a un'ora) consistono in una riduzione dei volumi d'aria respirati, un aumento della resistenza delle vie aeree, e sintomi come ansimare e respiro corto. Gli asmatici risultano essere i soggetti più sensibili alle esposizioni su brevi periodi (l'OMS suggerisce di non superare 500 microg/m<sup>3</sup> per medie su 10 minuti). Esposizioni su tempi più lunghi, in particolare in associazione con il particolato sospeso, comportano aumenti di rischio di mortalità (totale, cardiovascolare e respiratoria) e di ricoveri ospedalieri per cause respiratorie e per malattie ostruttive del polmone di origine cronica (valori guida OMS: 125 microg/m<sup>3</sup> sul giorno, 50 microg/m<sup>3</sup> sull'anno). Tuttavia si hanno indicazioni sul fatto che la mortalità è più strettamente associata al particolato piuttosto che all'SO<sub>2</sub>.

Per quanto riguarda gli effetti sulla vegetazione si segnalano vari tipi di effetti fisiologici e biochimici tra cui il degrado della clorofilla e la ridotta fotosintesi. Inoltre va tenuto in conto il ruolo inibitore dell'SO<sub>2</sub> sulle crescite e le rese.

La Direttiva 1999/30/CE recepita nel nostro Paese con DM 2 aprile 2002 n. 60 stabilisce i seguenti limiti alle concentrazioni di SO<sub>2</sub> in aria:

Valori limite per la protezione della salute umana:

350 microg/m<sup>3</sup> media oraria da non superare più di 24 volte l'anno; entrata in vigore: 1 gennaio 2005. Con riferimento a questo limite sono stabiliti anche dei

*margini di tolleranza:*

125 microg/m<sup>3</sup> media nelle 24 ore da non superare più di 3 volte l'anno; entrata in vigore: 1 gennaio 2005.

*Valore limite per la protezione degli ecosistemi:*

20 microg/m<sup>3</sup> media anno civile e inverno (1 ottobre – 31 marzo); entrata in vigore: 22 aprile 2001.

*Soglia di allarme:*

500 microg/m<sup>3</sup> misurati su 3 ore consecutive in località rappresentative della qualità dell'aria su almeno 100 km<sup>2</sup> oppure una zona o un intero agglomerato, nel caso siano meno estesi.

*La situazione in Italia.* Dai dati disponibili risulta che in particolare lo standard relativo alle concentrazioni mediate sulle 24 ore verrebbe quasi sempre rispettato, come pure il valore limite per la protezione degli ecosistemi. Non sono disponibili dati orari di concentrazioni di SO<sub>2</sub>, essendo i vecchi limiti basati su medie giornaliere.

*Possibili provvedimenti.* Nel caso dell'SO<sub>2</sub> a scala urbana è ragionevole assumere una proporzionalità diretta tra emissioni e concentrazioni, per cui se si dimezzano le emissioni stesso effetto hanno le concentrazioni negli ambiti spaziali oggetto dei provvedimenti sulle emissioni. In particolare per questo inquinante provvedimenti estemporanei di limitazione delle emissioni si possono ottenere, per esempio, tramite limitazioni sull'utilizzo dei combustibili contenenti zolfo.

**Ossidi di azoto ( $\text{NO}_2$  e  $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$ )**

*Provenienza.* L' $\text{NO}_x$  di origine antropica emesso in atmosfera proviene dal settore trasporti e dalle fonti fisse di combustione. In particolare, il settore trasporti stradali incide a livello nazionale per circa il 50% sul totale delle emissioni di ossidi di azoto, mentre a livello urbano il suo peso sale a oltre il 60%. Le emissioni complessive di ossidi di azoto in Italia sono in diminuzione a partire dal 1993, e su questo incide la flessione delle emissioni da trasporti stradali dovuta in particolare al rinnovo del parco veicolare.

*Effetti e limiti alle concentrazioni.* Effetti acuti in soggetti sani si hanno solo a concentrazioni di  $\text{NO}_2$  molto alte ( $>1990$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  - OMS). L'intervallo 365-565  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  costituisce una soglia inferiore da dove si cominciano a osservare piccole alterazioni delle funzioni polmonari e della risposta delle vie aeree in asmatici e pazienti con malattie ostruttive del polmone di origine cronica (OMS). Sul lungo periodo l'OMS raccomanda un valore di  $\text{NO}_2$  pari a 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per proteggere da esposizione cronica.

Gli  $\text{NO}_x$ , in particolare l' $\text{NO}_2$ , induce nella vegetazione la comparsa di clorosi fogliare e diminuzione dell'attività fotosintetica con conseguente decremento della biomassa prodotta.

La Direttiva 1999/30/CE recepita nel nostro Paese con DM 2 aprile 2002 n. 60 stabilisce i seguenti limiti alle concentrazioni di  $\text{NO}_2$  in aria.

Valori limite per la protezione della salute umana per l' $\text{NO}_2$ :

200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  media oraria da non superare più di 8 volte l'anno; entrata in vigore: 1 gennaio 2010.

40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  media anno civile; entrata in vigore: 1 gennaio 2010.

Con riferimento a questi limiti sono stabiliti anche dei

*margini di tolleranza:*

125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  media nelle 24 ore da non superare più di 3 volte l'anno; tali valori decrescono gradualmente nel tempo fino ad annullarsi alla data di entrata in vigore di detto valore. Entrata in vigore: 1 gennaio 2005.

Valore limite per la protezione degli ecosistemi per gli  $\text{NO}_2$ :

20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  media anno civile e inverno (1 ottobre - 31 marzo); entrata in vigore: 19 luglio 2001.

Soglia di allarme per l' $\text{NO}_2$ :

400  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  misurati su 3 ore consecutive in località rappresentative della qualità dell'aria su almeno 100  $\text{km}^2$  oppure una zona o un intero agglomerato, nel caso siano meno estesi.

*La situazione in Italia.* Dai dati disponibili risulta che i nuovi limiti a protezione della salute non sempre verrebbero rispettati se le concentrazioni si mantengono sui livelli attuali; in particolare il valore medio annuo di  $\text{NO}_2$  si riscontra essere frequentemente al di sopra del nuovo valore limite.

*Possibili provvedimenti.* L' $\text{NO}_2$  è un inquinante essenzialmente secondario, in quanto per oltre il 90% gli  $\text{NO}_x$  vengono emessi nei processi di combustione sotto forma di  $\text{NO}$ . Le concentrazioni di  $\text{NO}_2$  in atmosfera sono quindi dipendenti dall'ossidazione dell' $\text{NO}$  in  $\text{NO}_2$ , e questo dipende dalla capacità ossidativa dell'atmosfera, e in particolare dalla presenza di ozono e radicali ossidanti. Tale processo è fortemente accoppiato con la formazione di ozono e altri inquinanti fotochimici e con la formazione di particolato secondario. La valutazione dell'efficacia di possibili provvedimenti deve quindi essere valutata nell'ambito di una strategia integrata che consideri, per quanto possibile, congiuntamente  $\text{NO}_2$ , ozono e  $\text{PM}_{10}$ .



## Ossido di carbonio (CO)

*Provenienza.* In termini di concentrazione in aria, il CO ha valori molto più alti di altri inquinanti comunemente considerati, al punto che le sue concentrazioni sono espresse in  $\text{mg}/\text{m}^3$ , mentre le concentrazioni di altri inquinanti sono espresse in  $\text{microg}/\text{m}^3$  o anche in unità più piccole. Il CO è considerato un inquinante primario in quanto, soprattutto nelle aree urbane, le concentrazioni in aria derivano essenzialmente dal CO emesso direttamente in atmosfera da fonti antropiche, soprattutto dal traffico stradale che costituisce di gran lunga la principale fonte di emissione: in Italia circa il 70% del CO viene emesso dal traffico stradale, la maggior parte da auto a benzina, e questa percentuale sale a oltre il 90% nelle aree urbane.

*Valori soglia e limiti alle concentrazioni.* Il CO ha la proprietà di fissarsi all'emoglobina del sangue, impedendo il normale trasporto dell'ossigeno nelle varie parti del corpo. Il CO ha nei confronti dell'emoglobina un'affinità 220 volte maggiore rispetto all'ossigeno e il composto che si genera (carbossi-emoglobina) è estremamente stabile. Gli organi più colpiti sono il sistema nervoso centrale e il sistema cardiovascolare, soprattutto nelle persone affette da cardiopatie. Concentrazioni elevatissime di CO possono anche condurre alla morte per asfissia. Alle concentrazioni abitualmente rilevabili nell'atmosfera urbana gli effetti sulla salute sono reversibili e sicuramente meno acuti.

L'OMS propone i seguenti valori guida, orientati a mantenere il livello di carbossi-emoglobina nel sangue inferiore a 2,5%, anche quando un soggetto normale esercita una attività normale o moderata:

- 100  $\text{mg}/\text{m}^3$  per 15 minuti;
- 60  $\text{mg}/\text{m}^3$  per 30 minuti;
- 30  $\text{mg}/\text{m}^3$  per 1 ora;
- 10  $\text{mg}/\text{m}^3$  per 8 ore.

La Direttiva 2000/69/CE recepita nel nostro Paese con DM 2 aprile 2002 n. 60 stabilisce il seguente valore limite di CO per la protezione della salute umana: 10  $\text{mg}/\text{m}^3$  come media massima giornaliera su 8 ore. Data alla quale il valore limite deve essere raggiunto: 1 gennaio 2005.

La Direttiva 2000/69/CE stabilisce anche un *margine di tolleranza* rispetto ai valori limite, che decresce gradualmente nel tempo fino ad annullarsi alla data di entrata in vigore di detti valori.

*La situazione in Italia.* Nelle aree urbane se le concentrazioni si mantengono

sui livelli attuali vi sarebbero superamenti del valore limite sulle 8 ore. C'è da dire comunque che per questo inquinante le emissioni sono in decremento a causa grazie alla penetrazione dei veicoli catalizzati, e questo si riflette in un parallelo decremento delle concentrazioni in aria.

*Possibili provvedimenti.* Nel caso del CO, analogamente al benzene, è ragionevole assumere una proporzionalità diretta tra emissioni e concentrazioni, per cui se si dimezzano le emissioni stesso effetto hanno le concentrazioni negli ambiti spaziali oggetto dei provvedimenti sulle emissioni. In particolare per questo inquinante provvedimenti estemporanei di blocco o limitazione del traffico si rivelano generalmente efficaci.

## Ozono (O<sub>3</sub>)

*Provenienza.* L'ozono presente nella bassa atmosfera è di natura interamente secondaria, ossia è frutto di trasformazioni chimiche di inquinanti precursori come gli ossidi di azoto e i composti organici volatili. A livello nazionale sono i trasporti le principali fonti di emissione di precursori di ozono. Pure importanti per gli ossidi di azoto sono le emissioni energetiche e industriali, e per i composti organici le emissioni da uso di solventi.

*Effetti e limiti alle concentrazioni.* Gli effetti sanitari dell'ozono si dispiegano in un continuo in cui esposizioni più lunghe e un più alto livello di attività fisica durante l'esposizione causano effetti maggiori. Gli effetti acuti di breve periodo includono alterazioni della funzione polmonare, aumento della reattività e dell'infiammazione delle vie aeree, e altri sintomi. L'esposizione all'ozono viene anche associata con un aumento di ricoveri ospedalieri a causa di problemi alle vie respiratorie e di aggravamento dell'asma. Il valore di concentrazione pari a 120 microg/m<sup>3</sup> mediato su 8 ore in un giorno viene ritenuto dall'OMS un livello in corrispondenza del quale effetti acuti sulla salute pubblica è probabile siano piccoli.

Gli effetti dell'ozono sugli ecosistemi si esplicano sulla flora tramite danni foliari visibili, riduzione della crescita e della resa, aumento della sensibilità a fattori di stress biotici e abiotici.

La Direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria definisce per i livelli in aria di questo inquinante valori bersaglio, obiettivi a lungo termine e soglie di informazione e di allarme (nel seguito, per AOT40 - accumulated exposure over a threshold of 40 ppb - si intende la somma della parte di concentrazioni orarie eccedenti gli 80 microg/m<sup>3</sup> (= 40 ppb) in un dato periodo di tempo, utilizzando solo i valori rilevati ogni giorno tra le 8:00 e le 20:00, ora dell'Europa centrale):

### Valori bersaglio per il 2010:

*Protezione della salute umana:* 120 microg/m<sup>3</sup> come media massima giornaliera su 8 ore da non superare per più di 25 giorni per anno civile come media su 3 anni.

*Protezione della vegetazione:* AOT40 calcolato sulla base dei valori di 1 ora da maggio a luglio pari a 18000 microg/m<sup>3</sup>h come media su 5 anni.

### Obiettivi a lungo termine (si prende come riferimento l'anno 2020):

*Protezione della salute umana:* 120 microg/m<sup>3</sup> come media massima giornaliera su 8 ore nell'arco di un anno civile.

*Protezione della vegetazione:* AOT40 calcolato sulla base dei valori di 1 ora da maggio a luglio pari a 6000 microg/m<sup>3</sup>h.

Soglie di informazione e di allarme:

*Soglia di informazione:* 180 microg/m<sup>3</sup> come media di 1 ora.

*Soglia di allarme:* 240 microg/m<sup>3</sup> come media di 1 ora.

*La situazione in Italia.* Sulla base delle informazioni disponibili è possibile affermare che con riferimento alle concentrazioni misurate attualmente i nuovi standard europei non verrebbero rispettati in numerose zone del territorio nazionale.

*Possibili provvedimenti.* L'ozono, con il PM10, è fra gli inquinanti più critici, in quanto il legame con le emissioni è complesso essendo un inquinante secondario che si forma nella bassa atmosfera in presenza di luce solare a partire dagli ossidi di azoto e dai composti organici volatili. Gli ambiti spaziali interessati dai fenomeni di inquinamento da ozono sono in genere molto ampi, tanto è vero che l'inquinamento da ozono è considerato anche un problema transfrontaliero. Le misure di contenimento delle emissioni dei precursori devono di conseguenza interessare ambiti territoriali di analoga significatività per essere di qualche efficacia. La complessità del legame tra emissioni di precursori e concentrazioni di ozono rende complessa la identificazione di una strategia efficace di controllo delle concentrazioni di ozono. Per questo motivo è necessario poter quantificare sia la riduzione delle emissioni a seguito dell'applicazione di misure di contenimento delle emissioni, sia come queste riduzioni influenzano le concentrazioni. A tale proposito, è indispensabile disporre di informazioni quantitative sulle emissioni attuali (censimenti delle emissioni) e sulle riduzioni previste a seguito dei provvedimenti adottati (scenari di emissione), nonché avere indicazioni circa l'efficacia sulla riduzione delle concentrazioni. Per quest'ultimo scopo l'uso di modelli matematici che descrivono la dispersione e la trasformazione degli inquinanti in atmosfera, e che quindi consentano di avere indicazioni su come variano le concentrazioni degli inquinanti in corrispondenza di un contenimento delle emissioni, è molto utile: tali strumenti hanno oramai raggiunto un grado di maturazione che li rende utili strumenti di supporto alle decisioni, ma presuppongono conoscenze specialistiche di buon livello e adeguata disponibilità di informazioni sulle emissioni e sulle caratteristiche meteorologiche dell'atmosfera; inoltre, questi modelli devono essere opportunamente validati con riferimento alle specifiche realtà territoriali prima di poter essere utilizzati efficacemente.

## Piombo (Pb)

*Provenienza.* La maggioranza delle emissioni di piombo derivava, fino alla totale eliminazione della benzina con piombo, dai trasporti. Attualmente tali emissioni, che nel 2000 ammontavano a circa il 90% delle emissioni complessive di piombo, sono praticamente azzerate, e i maggiori contributi alle emissioni di piombo a livello nazionale derivano da attività industriali quali produzione di acciaio, zinco e vetro.

*Effetti e limiti alle concentrazioni.* L'OMS raccomanda che sforzi siano intrapresi affinché venga assicurato che almeno il 98% di una popolazione esposta, inclusi i bambini in età prescolare, debbano avere un livello di piombo nel sangue inferiore a 100 microg/l, e questo si traduce, tenuto conto di tutte le altre modalità di esposizione al piombo diverse dall'inalazione, in un valore di piombo in aria che non dovrebbe superare 0.5 microg/m<sup>3</sup>, un livello che proteggerebbe anche gli adulti.

La Direttiva 1999/30/CE recepita nel nostro Paese con DM 2 aprile 2002 n. 60 stabilisce, per la protezione della salute umana il valore limite di 0.5 microg/m<sup>3</sup> come media sull'anno civile. Data alla quale il valore limite deve essere raggiunto: 1 gennaio 2005.

La Direttiva 1999/30/CE stabilisce anche un *marginale di tolleranza* rispetto al valore limite, che decresce gradualmente nel tempo fino ad annullarsi alla data di entrata in vigore di detti valori.

*La situazione in Italia.* Nelle aree urbane alcuni valori riscontrati ad oggi sono inferiori al valore limite, e tali valori dovrebbero progressivamente diminuire grazie all'avvenuta eliminazione della benzina con piombo nel nostro Paese.

### **PM10 (particolato atmosferico con diametro aerodinamico inferiore a 10 micrometri)**

*Provenienza.* Il particolato sospeso in atmosfera può essere di natura primaria o secondaria. La componente primaria viene emessa direttamente in atmosfera a causa di processi antropici o naturali, mentre la componente secondaria si forma in atmosfera a seguito di reazioni chimiche che coinvolgono altre molecole come biossido di zolfo, ossidi di azoto e composti organici volatili. Industria e traffico sono le principali fonti antropiche di emissione di PM10: per l'Italia contribuiscono rispettivamente per circa il 36% e il 30% alle emissioni di origine antropica. Nelle aree urbane il traffico è usualmente la principale fonte di emissione di PM10, ma contributi significativi possono provenire anche dal riscaldamento domestico.

*Effetti e limiti alle concentrazioni.* Sulla base di studi effettuati su popolazioni esposte ad elevate concentrazioni di particolato (spesso in presenza di anidride solforosa) e sulla base di studi di laboratorio, la maggiore preoccupazione per la salute umana riguarda gli effetti sulla respirazione, incluso l'aggravamento di patologie respiratorie e cardiovascolari, le alterazioni del sistema immunitario, il danno al tessuto polmonare, l'aumento dell'incidenza di patologie tumorali e la morte prematura. I sottogruppi di popolazione più a rischio rispetto all'esposizione al PM10 sono gli individui affetti da patologie polmonari croniche di tipo ostruttivo, gli individui con influenza, gli asmatici, e le fasce estreme di età (bambini ed anziani).

Per il PM gli studi attuali non sono capaci di determinare una soglia al di sotto della quale non vi sono effetti (OMS).

La Direttiva 1999/30/CE recepita nel nostro Paese con DM 2 aprile 2002 n. 60 stabilisce i seguenti valori limite di PM10 per la protezione della salute umana:

fase 1 (data alla quale il valore limite deve essere raggiunto: 1 gennaio 2005)

- 50 microg/m<sup>3</sup> come media giornaliera da non superare più di 35 volte l'anno
- 40 microg/m<sup>3</sup> come media annua

fase 2 (data alla quale il valore limite deve essere raggiunto: 1 gennaio 2010)

- 50 microg/m<sup>3</sup> come media giornaliera da non superare più di 7 volte l'anno
- 20 microg/m<sup>3</sup> come media annua

La Direttiva 1999/30/CE stabilisce anche dei *margini di tolleranza* rispetto ai valori limite, che decrescono gradualmente nel tempo fino ad annullarsi alla data di entrata in vigore di detti valori.

*La situazione in Italia.* Sulla base delle informazioni disponibili è possibile affermare che se le concentrazioni si mantengono sui livelli attuali, i nuovi standard europei non verrebbero rispettati in quasi tutte le realtà urbane dell'area padana, oltre che in altre città.

*Possibili provvedimenti.* Il PM10, con l'ozono, è fra gli inquinanti più critici, in quanto il legame con le emissioni è complesso sussistendo sia una componente primaria – che implica interventi sulle emissioni di PM10 – che secondaria – che implica interventi sugli inquinanti precursori di PM secondario (ossidi di zolfo, di azoto, composti organici, etc.). Una conseguenza di ciò è che dimezzando le emissioni di PM10 non si dimezzano le concentrazioni. Gli ambiti spaziali interessati dai fenomeni di inquinamento da PM10 sono in genere molto ampi, e possono interessare l'intera regione o anche più regioni: le misure di contenimento delle emissioni devono di conseguenza interessare ambiti territoriali di analoga significatività per essere di qualche efficacia. In particolare per questo inquinante provvedimenti estemporanei di blocco o limitazione del traffico si rivelano generalmente non efficaci.

Più in generale è necessario poter quantificare sia la riduzione delle emissioni a seguito dell'applicazione di provvedimenti, sia come queste riduzioni influenzano le concentrazioni: a tale proposito è indispensabile disporre di informazioni quantitative sulle emissioni attuali (censimenti delle emissioni) e sulle riduzioni previste a seguito dei provvedimenti adottati (scenari di emissione), nonché avere indicazioni circa l'efficacia sulla riduzione delle concentrazioni. Per quest'ultimo scopo l'uso di modelli matematici che descrivono la dispersione e la trasformazione degli inquinanti in atmosfera, e che quindi consentono di avere indicazioni su come variano le concentrazioni degli inquinanti in corrispondenza di un contenimento delle emissioni, è molto utile: tali strumenti hanno oramai raggiunto un grado di maturazione che li rende utili strumenti di supporto alle decisioni, ma presuppongono conoscenze specialistiche di buon livello e adeguata disponibilità di informazioni sulle emissioni e sulle caratteristiche meteorologiche dell'atmosfera; inoltre, questi modelli devono essere opportunamente validati con riferimento alle specifiche realtà territoriali prima di poter essere utilizzati efficacemente.

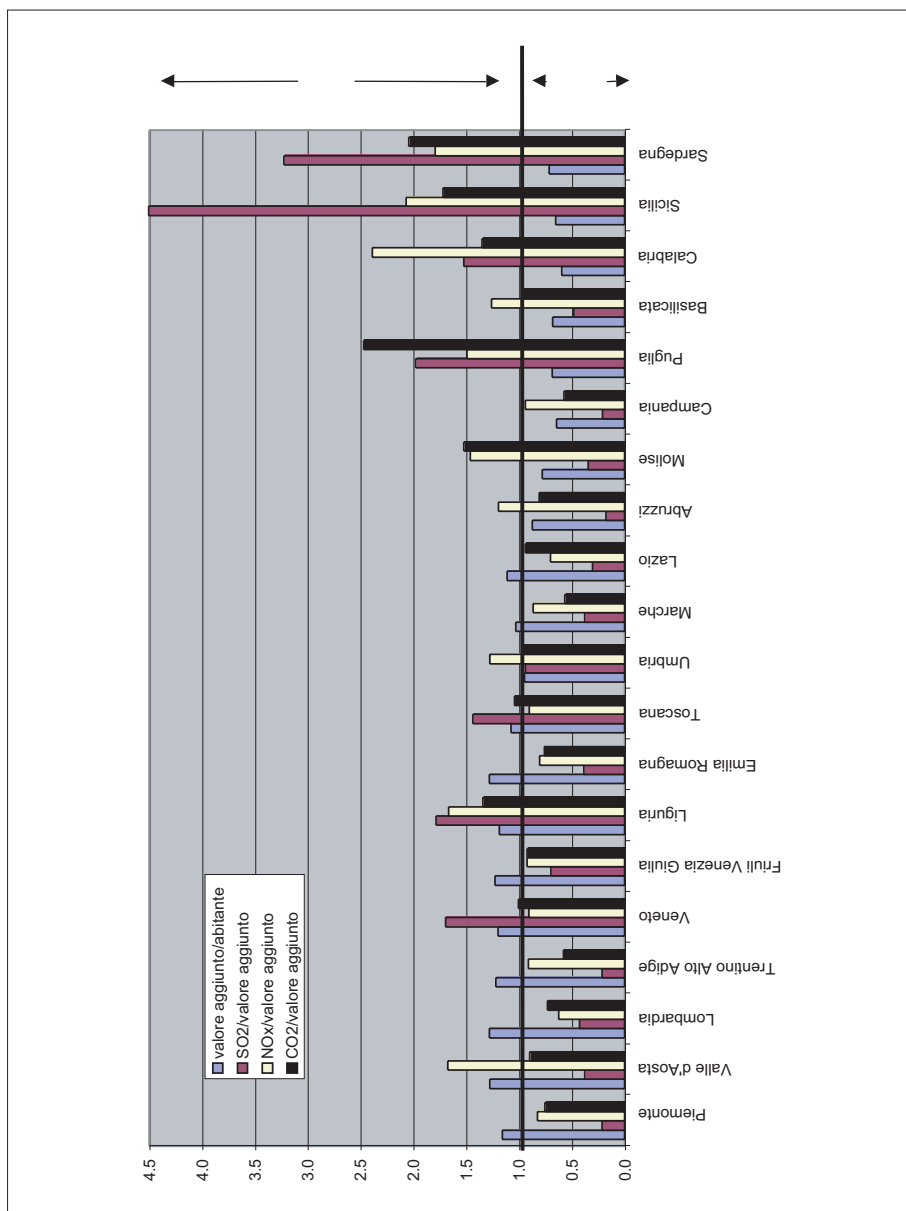


Figura 1: Emissioni Regionali 1999 e produzione di ricchezza (valore aggiunto) Valori normalizzati (Italia = 1) (Fonte: ANPA,2001).



**Tabella 1: Limiti alle concentrazioni di inquinanti dell'aria indicati dalla Direttiva 1999/30/CE recepita con Decreto Ministeriale 2 aprile 2002 n. 60**

| <i>inquinante</i>        | <i>tipo di limite</i>                              | <i>limite (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</i> | <i>tempo di mediazione dei dati</i>              | <i> margine di tolleranza</i>  | <i>entrata in vigore</i> |
|--------------------------|--|---|--|--|--------------------------|
| <b>biossido di zolfo</b> | valore limite per la protezione della salute umana | 350 (da non superare più di 24 volte l'anno)        | media oraria                                     | 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (43%) all'entrata in vigore della direttiva 99/30/CE (19.07.99), con una riduzione il 1° gennaio 2001 ed ogni dodici mesi successivi secondo una percentuale annua costante, per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2005 | 1° gennaio 2005          |
|                          | valore limite per la protezione della salute umana | 125 (da non superare più di 3 volte l'anno)         | media nelle 24 ore                               | nessuno  | 1° gennaio 2005          |
|                          | valore limite per la protezione degli ecosistemi   | 20  | media anno civile e inverno (1 ottobre-31 marzo) | nessuno  | 22 aprile 2001           |
| <b>biossido di azoto</b> | valore limite per la protezione della salute umana | 200 (da non superare più di 8 volte l'anno)         | media oraria                                     | 50% all'entrata in vigore della direttiva 99/30/CE con una riduzione il 1° gennaio 2001 ed ogni dodici mesi successivi secondo una percentuale annua costante per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2010   | 1° gennaio 2010          |

segue

| inquinante           | tipo di limite                                     | limite ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )         | tempo di mediazione dei dati | margine di tolleranza   | entrata in vigore |
|----------------------|--|---|------------------------------|---|-------------------|
|                      | valore limite per la protezione della salute umana | 40  | media anno civile            | 50% all'entrata in vigore della direttiva 99/30/CE, con una riduzione il 1° gennaio 2001 ed ogni dodici mesi successivi secondo una percentuale annua costante per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010   |
|                      | valore limite per la protezione della vegetazione  | 30  | media anno civile            | nessuno   | 19 luglio 2001    |
| <b>PM10 (fase 1)</b> | valore limite per la protezione della salute umana | 50 (da non superare più di 35 volte l'anno) | media nelle 24 ore           | 50% all'entrata in vigore della direttiva 99/30/CE, con una riduzione il 1° gennaio 2001 ed ogni dodici mesi successivi secondo una percentuale annua costante per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2005 | 1° gennaio 2005   |
|                      | valore limite per la protezione della salute umana | 40  | media anno civile            | 20% all'entrata in vigore della direttiva 99/30/CE, con una riduzione il 1° gennaio 2001 ed ogni dodici mesi successivi secondo una percentuale annua costante per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2005 | 1° gennaio 2005   |

| inquinante   | tipo di limite                                     | limite ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )        | tempo di mediazione dei dati | margini di tolleranza   | entrata in vigore |
|--|--|--|------------------------------|---|-------------------|
| <b>PM10 (fase 2)</b><br>(valori indicativi da rivedere con successivo decreto sulla base della futura normativa comunitaria) | valore limite per la protezione della salute umana | 50 (da non superare più di 7 volte l'anno) | media nelle 24 ore           | Da stabilire in base ai dati, in modo che sia equivalente al valore limite della fase 1   | 1° gennaio 2010   |
|  | valore limite per la protezione della salute umana | 20   | media anno civile            | 10 $\text{mg}/\text{m}^3$ al 1° gennaio 2005 con riduzione ogni 12 mesi successivi, secondo una percentuale annua costante, per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2010  | 1° gennaio 2010   |
| <b>piombo</b>  | valore limite per la protezione della salute umana | 0,5  | media anno civile            | 100% del valore limite, pari a 0,5 $\text{mg}/\text{m}^3$ , all'entrata in vigore della direttiva 99/30/CE. Tale valore è ridotto il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi, secondo una percentuale annua costante, per raggiungere lo 0% il 1° gennaio 2005 | 1° gennaio 2005   |
|  |  |  |                              | 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ misurati su 3 ore consecutive in un sito rappresentativo della qualità dell'aria di un'area di almeno 100 $\text{km}^2$ oppure in una intera zona o un intero agglomerato, nel caso siano meno estesi.                                   |                   |

segue

segue

| <i>inquinante</i>                                  | <i>tipo di limite</i> | <i>limite (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</i> | <i>tempo di mediazione dei dati</i> | <i>margini di tolleranza</i>  | <i>entrata in vigore</i> |
|--|-----------------------|---|-------------------------------------|---|--------------------------|
| <b>Soglia di allarme per il biossido di azoto:</b> |                       |   |                                     | 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ misurati su 3 ore consecutive in un sito rappresentativo della qualità dell'aria di un'area di almeno 100 $\text{km}^2$ oppure in una intera zona o un intero agglomerato, nel caso siano meno estesi. |                          |

**Tabella 2: Limiti alle concentrazioni di inquinanti dell'aria indicati dalla Direttiva 2000/69/CE recepita con Decreto Ministeriale 2 aprile 2002 n. 60**

| <i>inquinante</i>            | <i>tipo di limite</i>                              | <i>limite (<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>)</i> | <i>indice</i>                      | <i>margini di tolleranza</i>  | <i>entrata in vigore</i>   |
|------------------------------|--|---|------------------------------------|---|--|
| <b>monossido di carbonio</b> | valore limite per la protezione della salute umana | 10.000  | Media massima giornaliera su 8 ore | 6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ all'entrata in vigore della direttiva 2000/69/CE (13 dicembre 2000), riducendo dal 1° gennaio 2003 e ogni 12 mesi successivi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0% al 1° gennaio del 2005                 | 1° gennaio 2005  |
| <b>benzene</b>               | valore limite per la protezione della salute umana | 5   | media anno civile                  | 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (100%) all'entrata in vigore della direttiva 2000/69/CE (13 dicembre 2000). Tale valore è ridotto il 1° gennaio 2006, e successivamente ogni 12 mesi, secondo una percentuale annua costante, per raggiungere lo 0% al 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 (ad eccezione delle zone e degli agglomerati nei quali è stata approvata una proroga limitata nel tempo) |

Tabella 3: Limiti alle concentrazioni di ozono indicati dalla Direttiva 2002/3/CE

| inquinante | tipo di limite   | limite ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )  | indice  |                                |
|------------|--|--|---|--------------------------------|
| ozono      | valore bersaglio per la protezione della salute umana            | 120 (da non superare in più di 25 giorni per anno civile come media su tre anni) | Media massima giornaliera su 8 ore                                | da raggiungere entro il 2010   |
|            | valore bersaglio per la protezione della vegetazione             | 18000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ (mediato su cinque anni)             | AOT40 calcolato sul valore orario da maggio a luglio              | da raggiungere entro il 2010   |
|            | obiettivo a lungo termine per la salvaguardia della salute umana | 120  | Media massima giornaliera su 8 ore nell'arco di un anno civile    | orientativamente entro il 2020 |
|            | obiettivo a lungo termine per la protezione della vegetazione    | 6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$                                       | AOT40 calcolato sulla base dei valori di 1 ora da maggio a luglio | orientativamente entro il 2020 |

**Soglia di informazione:** 180  $\text{mg}/\text{m}^3$  come media oraria **Soglia di allarme:** 240  $\text{mg}/\text{m}^3$  come media oraria

Per AOT40 (accumulated exposure over a threshold of 40 ppb), espresso in  $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ , si intende la somma della differenza tra le concentrazioni orarie superiori a 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (= 40 parti per miliardo) e 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in un dato periodo di tempo, utilizzando solo i valori rilevati ogni giorno tra le 8:00 e le 20:00, ora dell'Europa centrale.

**Tabella 4: concentrazioni medie giornaliere di PM10 in aria in talune città italiane numero di superamenti di 50 µg/m<sup>3</sup> e 75 µg/m<sup>3</sup> nel mese di gennaio per gli anni 2000, 2001, 2002**

|  |              | numero dati validi | numero superamenti di 50 µg/m <sup>3</sup> | numero superamenti di 75 µg/m <sup>3</sup> |
|--|--------------|--------------------|--|--|
| <b>Torino</b> (Consolata)<br>gravimetrico basso<br>volume pesata<br>manuale    | Gennaio 2000 | 28                 | 27   | 26   |
|  | Gennaio 2001 | 29                 | 26   | 18   |
|  | Gennaio 2002 | 24                 | 24   | 22   |
| <b>Genova</b> (Gessi)<br>gravimetrico alto<br>volume pesata<br>manuale         | Gennaio 2000 | 18                 | 13   | 5  |
|  | Gennaio 2001 | 16                 | 5  | 2  |
|  | Gennaio 2002 | 15                 | 10   | 0  |
| <b>Milano</b> (Juvara)<br>automatico<br>pesata piezo                           | Gennaio 2000 | 24                 | 16   | 11   |
|  | Gennaio 2001 | 31                 | 17   | 2  |
|  | Gennaio 2002 | 31                 | 25   | 21   |
| <b>Parma</b> (Spalato)<br>automatico<br>pesata beta                            | Gennaio 2000 | 22                 | 19   | 13   |
|  | Gennaio 2001 | 30                 | 18   | 6  |
|  | Gennaio 2002 | 25                 | 24   | 20   |
| <b>Bologna</b><br>(Porta S. Felice)<br>automatico<br>pesata beta               | Gennaio 2000 | 24                 | 24   | 22   |
|  | Gennaio 2001 | 26                 | 20   | 8  |
|  | Gennaio 2002 | 30                 | 27   | 16   |
| <b>Firenze</b> (Bassi)<br>automatico<br>pesata beta                            | Gennaio 2000 | 30                 | 19   | 9  |
|  | Gennaio 2001 | 27                 | 6  | 0  |
|  | Gennaio 2002 | 25                 | 17   | 8  |
| <b>Palermo</b> (Giulio<br>Cesare) automatico<br>pesata beta<br>supporto nastro | Gennaio 2000 | 30                 | 15   | 1  |
|  | Gennaio 2001 | 29                 | 10   | 0  |
|  | Gennaio 2002 | 24                 | 4  | 0  |

*Elaborazione ANPA - ARPA ER su informazione fornita dal Tavolo tecnico gestori reti di rilevamento, 2002*

Tabella 5: Concentrazioni di ozono - anno 2000 - città &gt; 150000 ab.

| Città   | numero di ore in cui si è superata la soglia di informazione<br>(Direttiva 2002/3/CE: 180 µg/m <sup>3</sup> - media oraria) |
|---------|---|
| Roma    | 122   |
| Bologna | 131   |
| Genova  | 461   |
| Parma   | 14  |
| Padova  | 168   |
| Bari    | 4   |
| Napoli  | 14  |
| Torino  | 176   |

Fonte: rapporti annuali sulla qualità dell'aria ai sensi del DM 163/99



**BIBLIOGRAFIA**

- Borchardt J. K., *The Alchemist*, 13.8.2001  
(<http://www.chemweb.com/alchem/articles/996760316096.html>)
- Brini S., Desiato F., Fortuna F., Gaudio D., Liburdi R., Scalambretti R., 1999, Emissioni in atmosfera e qualità dell'aria in Italia – Primo rapporto ANPA sugli indicatori di pressione e di stato dell'ambiente atmosferico, Serie Stato dell'Ambiente 6/1999.
- Cirillo M.C., Brini S., Bonanni P., De Lauretis R., Liburdi R., Romano D., Saija S., 2002, Income and environmental pressure: exploring differences among Italian Regions, Rapporto ANPA in stampa.
- C.N.R.-Commissione per la diffusione della cultura scientifica, Accademia Nazionale delle Scienze (detta dei XL), Fondazione "Adriano Olivetti", Unione dei Giornalisti Italiani Scientifici, "Biocombustibili tra realtà e illusioni", Roma, 14 gennaio 2002.
- Commissione Europea, 1997, Ambient Air Pollution by Particulate Matter: Position Paper.
- Commissione Europea, 1997, SO<sub>2</sub> Position Paper.
- Commissione Europea, 1997, Position Paper on Lead.
- Commissione Europea, 1997, Position Paper on Air Quality: nitrogen dioxide.
- Commissione Europea, 1998, Position Paper on Benzene.
- Commissione Europea, 1999, Ambient Air Pollution; carbon monoxide position paper.
- Commissione Europea, 1999, Ozone position paper.
- Concawe, 2001, Measurement of the number and mass weighted size distributions of exhaust particles emitted from European heavy duty engines, report n. 01/51.
- DETR/SMMT/CONCAWE, 2001, Particulate Matter Research Programme, Summary Report.
- Desimoni E., Brunetti B. e Bacchella R., Cathodic stripping voltammetric determination of platinum in some foods and beverages at ng/g level under statistical control, *Electroanalysis*, **14**, 459 (2002).
- Fedeli E., Girelli A., *La Chimica e l'Industria*, 2001 (6), pagg. 45-50.
- La voce del chimico*, 2001 (4), pagg. 10-12.
- Meng Z., Dabdub D., Seinfeld J.H., Chemical Coupling Between Atmospheric Ozone and Particulate Matter, 1997, *Science*, Vol. 277, 4 July 1997, pp. 116-119.
- Saija S., Contaldi M., De Lauretis R., Ilacqua M., Liburdi R., 2000, Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale – I fattori di emissione medi per il parco circolante in Italia, ANPA, Serie Stato dell'Ambiente 12/2000.

Saija S., De Lauretis R., Liburdi R., Sviluppo ed uso di metodologie per la stima delle emissioni atmosferiche da trasporto stradale in Italia su scala provinciale, Rapporto ANPA 4/2001.

Saija S., Romano D., 2001, Top-down methodology and multivariate statistical analysis to estimate road transport emissions at different territorial levels, Rapporto ANPA 5/2001.

WHO, 1999, Air Quality Guidelines.

# L'inquinamento negli ambienti confinanti

## 1. Considerazioni generali

Nel corso degli ultimi anni un crescente consolidamento delle conoscenze scientifiche sulla qualità dell'aria negli ambienti confinati (abitazioni, uffici, scuole ecc.), ha evidenziato che la cosiddetta *Indoor Air Quality* (IAQ) rappresenta una delle principali problematiche ambientali in particolare nei paesi industrializzati. Alcune considerazioni ci aiutano a comprendere questa crescente presa di coscienza:

- La maggior parte del nostro tempo viene trascorso in luoghi chiusi, quali la propria casa, il luogo di lavoro, le scuole, negozi, palestre, cinema, ecc. In media circa l'80-90% del tempo è trascorso al chiuso e la percentuale sale per alcune categorie di persone tra le quali i bambini, gli anziani, i malati. Se si ragiona in termini di esposizione ad un agente inquinante ossia del prodotto della concentrazione per il tempo cui si è sottoposti a quell'inquinante

$$\text{Esposizione} = \text{Concentrazione} \times \text{tempo}$$

ci si rende conto che questa avviene per la maggior parte proprio negli ambienti confinati. Perfino l'esposizione ad inquinanti tipicamente prodotti all'esterno (ad es., emissioni gassose) può avvenire nei luoghi chiusi, sempre per effetto del maggior tempo ivi trascorso.

- Il progresso tecnologico-industriale ha fatto sì che il numero e la quantità delle sostanze immesse negli ambienti confinati crescesse, modificando, in particolare negli ultimi decenni, la qualità dell'aria interna e aprendo una problematica "esposizione-effetto" ancora da chiarire completamente. Basti pensare alla vicenda dell'amianto, la cui tossicità è emersa solo a posteriori, o all'impiego di formaldeide nell'industria del mobile per le abitazioni o al crescente uso di attrezzature per l'ufficio (fotocopiatrici, computer, fax, stampanti).
- L'introduzione di criteri costruttivi innovativi nell'edilizia sia per i nuovi edifici sia nelle ristrutturazioni di quelli esistenti ha profondamente modificato, e continua a farlo, la qualità dell'ambiente indoor. Un punto di svolta particolarmente rilevante è stato dato dall'introduzione di criteri per la conservazione dell'energia, con la produzione di isolamenti e di infissi a tenuta per ridurre la perdita di calore anche attraverso una riduzione del ricambio d'aria consentendo quindi in alcuni casi l'accumulo e il minor smaltimento degli inquinanti.

Nell'ambiente indoor sono presenti innumerevoli sostanze con concentrazioni che in alcuni casi sono 10 o 100 volte superiori rispetto all'aria esterna. Oltre a tutte le sostanze che sono presenti all'esterno, le cui cause sono state abbastanza ben identificate (scarichi industriali, scarichi dei mezzi di trasporto, scarichi degli impianti di riscaldamento) che comunque entrano negli edifici per effetto del ricambio di aria, nell'ambiente indoor sono presenti una serie di inquinanti prodotti proprio all'interno degli edifici, che, per effetto della ridotta ventilazione e della sempre maggiore coibentazione tendono ad accumularsi. Inoltre, il numero di questi prodotti è in continuo aumento e, tra loro, sono possibili innumerevoli combinazioni con possibili effetti che non sono ancora tutti sicuramente noti.

A fronte della concomitanza di questi fattori, con sempre maggiore convinzione il mondo medico attribuisce all'inquinamento dell'ambiente e alle condizioni di esposizione, una crescente responsabilità riguardo le eventuali conseguenze sanitarie sulla popolazione. Dunque, se fino ad ora, per inquinamento s'intendeva l'inquinamento atmosferico (esterno), si sta facendo strada la convinzione che sono altrettanto importanti le condizioni delle esposizioni e dove queste hanno maggiormente luogo, appunto, ad esempio, negli ambienti confinati. Basti citare il notevole incremento delle allergie e la diffusione di malattie infettive negli ambienti di lavoro o nelle scuole, attribuito ad una cattiva qualità dell'aria.

L'Agenzia per la protezione dell'ambiente degli Stati Uniti (US EPA) da tempo effettua la comparazione dei rischi ambientali quale strumento per la definizione di strategie d'intervento (US EPA 1987, US EPA 1990, USA EPA 1999, Konisky 1999). Tali studi sono effettuati attraverso una classificazione delle problematiche ambientali e valutando, per ognuna di esse, il livello di rischio in relazione a quattro differenti aspetti: rischi sanitari legati all'insorgenza di tumori, rischi sanitari di tipo diverso dai tumori, effetti di tipo ecologico e effetti sullo stato sociale (welfare). Il risultato di queste analisi combinate pone regolarmente l'inquinamento indoor tra le problematiche cui viene assegnato il più alto livello di rischio. Una categoria a parte viene considerata per l'inquinamento da radon (tipico indoor) al quale viene assegnato, di nuovo, il massimo livello di rischio (US EPA 1990b).

Recentemente, anche in Italia, si nota una crescita d'attenzione sull'IAQ. Di recente è stato pubblicato l'accordo tra il Ministro della Salute e le regioni e le province autonome sul documento concernente "Linee guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati" (G.U. 2001). Nel documento sono esaminate le fonti di inquinamento e viene evidenziata la necessità di un'azione di tutela e di prevenzione.

Nel presente documento sono riportate, ove possibile, le linee guida di qua-

lità dell'aria dell'organizzazione Mondiale della Sanità (WHO). Tali linee guida sono sostanzialmente riprese dalla legislazione italiana, relativamente all'ambiente outdoor. Si riportano i principali riferimenti italiani e comunitari utili ai fini di una migliore comprensione:

- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri del 28 Marzo 1983 "Limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinanti dell'aria e dell'ambiente esterno"
- Decreto del Presidente della Repubblica n. 203 del 24 maggio 1988 Attuazione delle direttive CEE numeri 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi dell'art. 15 della legge 16 aprile 1987, n. 183 (S.O. n. 53 G.U. 16 giugno 1988, n. 140).
- Decreto del Ministero dell'Ambiente n. 107 del 15 aprile 1994 "Norme tecniche in materia di livelli e di stati di attenzione e di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane"
- DM 25 Novembre 1994 "Aggiornamento delle norme tecniche in materia di limiti di concentrazione e di livelli di allarme per gli inquinanti atmosferici nelle aree urbane e disposizioni per la misura di alcuni inquinanti"
- Decreto del Ministero dell'Ambiente del 16 maggio 1996, "Attivazione di un sistema di sorveglianza di inquinamento da ozono"
- Legge 4 novembre 1997, n. 413 Misure urgenti per la prevenzione dell'inquinamento atmosferico da benzene.."
- Direttiva 99/30/CE "Valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo"
- Direttiva 00/69/CE "Valori limite di qualità dell'aria ambiente per benzene ed il monossido di carbonio"
- Decreto Ministeriale 2 aprile 2002 n. 60 del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio. Recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio.

Per ognuno dei principali inquinanti si allega una scheda sintetica che ne descrive la provenienza, gli effetti, i limiti posti alle concentrazioni, la situazione in Italia ed i possibili provvedimenti per limitarne l'impatto ambientale.

Allegato 1

### **Agenti biologici (acari, allergeni, emissioni biologiche di animali domestici, funghi e muffe)**

Per agenti biologici, riferite alla loro presenza in ambienti indoor, si intende una serie di sostanze di origine biologica quali: acari (e loro escrementi), forfore di animali domestici, funghi, muffe, lieviti, batteri, virus, pollini. Sono riportate di seguito alcune considerazioni sui più importanti agenti biologici

#### *Acari*

Gli acari sono animali che vivono nella polvere e si nutrono principalmente di scaglie della pelle (principalmente umana). Per la loro sopravvivenza e proliferazione necessitano di un ambiente caldo ( $T > 20$  °C) e umido ( $H\% > 80\%$ ). Si insediano per questo in tutte le superfici con polveri e nei tessuti a contatto con la pelle, tipicamente i materassi, ma anche nei tappeti, nelle moquette e soprattutto nei giocattoli di stoffa dei bambini. La concentrazione dipende dalle condizioni microclimatiche e pertanto dipende dalla posizione geografica, dalla stagione, ma anche dal tipo di edificio e perfino dalle abitudini di vita. Il numero di acari varia da 10 a 1000 per ogni grammo di polvere. La concentrazione in peso varia da 10 a 300.000 ng/g di polvere. Il principale effetto sull'uomo è dovuto alle proprietà allergeniche di tali animali; in particolare, essi sono un severo fattore di rischio per l'asma, e concentrazioni particolarmente elevate possono provocarne acuti attacchi. In uno studio inglese è stato evidenziato che l'80% dei bambini asmatici risultano allergici agli acari della polvere (Price et al., 1990). Particolare importanza rivestono gli escrementi di alcune specie di acari che si possono frantumare e possono risollevarsi e, quindi, essere inalati.

#### *Allergeni da animali domestici e non*

La convivenza con animali nelle case porta alla presenza di molti allergeni associati alle forfore, all'urina e alla saliva. La principale sorgente proviene da animali con pelliccia, (cani, gatti, roditori, etc.), ma anche uccelli, scarafaggi e insetti contribuiscono alla presenza di questo tipo di allergeni. In questo caso non sono molto importanti le condizioni climatiche, quanto la pulizia degli ambienti e la rimozione di questi residui. Dopo essiccamento e frammentazione possono essere risospesi in aria, rimanere in sospensione anche per lunghi periodi e inalati. Anche in questo caso il principale effetto sanitario consiste in manifestazioni allergiche in soggetti predisposti. Deve essere sottolineato che questa sensibilità riguarda una grande porzione della popo-

lazione: ad esempio il 10-15% dei bambini sarebbero allergici alla forfora dei gatti e il 4-15% a quella dei cani.

### *Batteri*

L'importanza della presenza dei batteri negli ambienti interni riguarda essenzialmente le condizioni che favoriscono la loro diffusione. Sorgenti in aria di batteri sono l'uomo e gli animali, ma anche la polvere risolleata. Negli ambienti indoor la concentrazione in aria è generalmente superiore rispetto all'esterno.

In alcuni casi esistono negli ambienti indoor condizioni per la proliferazione dei batteri. Gli impianti di riscaldamento, di umidificazione e di condizionamento possono offrire le condizioni per la diffusione dei batteri. Ad esempio, la cosiddetta "febbre da umidificatore" viene riscontrata in luoghi ove sono presenti appunto gli umidificatori che offrono le condizioni per la formazione e diffusione di tossine da parte di microorganismi.

Le contromisure per ridurre l'esposizione agli agenti biologici sono:

- installazione di appropriati aspiratori nelle cucine e nei bagni per impedire la crescita dell'umidità, utile per diminuire anche la concentrazione di composti organici.
- La ventilazione delle soffitte o degli scantinati in modo da ridurre l'umidità relativa al di sotto del 50% (per prevenire fenomeni di condensa).
- In caso di uso di umidificatori operare nel modo indicato dal produttore e soprattutto effettuare una frequente pulizia e la sostituzione giornaliera dell'acqua utilizzata.
- Pulire accuratamente, e soprattutto asciugare, tappeti, moquette, e materiali che possono trattenere umidità.
- Un'accurata pulizia della casa: lavaggi con acqua calda o vapore delle superfici. In caso di individui allergici allontanarsi durante l'uso di aspirapolveri che in parte risospendono in aria queste sostanze.
- Un sistema di ventilazione che aspira aria verso l'esterno riduce la presenza degli agenti biologici.
- Frequente pulizia degli animali domestici.

### *Funghi e muffe*

Esistono circa 100.000 specie diverse di funghi (incluse le muffe e i lieviti). Generalmente provengono dall'esterno, per cui si nota una sostanziale dipendenza stagionale (maggiore presenza durante l'estate e l'autunno), tuttavia l'ambiente indoor, anche se scrupolosamente pulito, offre innumerevoli occasioni e substrati di crescita. La maggior parte si sviluppano in condizioni di

temperature comprese tra 10 e 35 °C, ma il contenuto di acqua è il fattore critico per la crescita. La combinazione tra fenomeni di condensa (spesso in luoghi inaccessibili), la presenza di sostanze organiche morte (necessario nutrimento), e l'instaurarsi delle opportune condizioni microclimatiche, favorisce la crescita di colonie. Presenza di umidità o fenomeni di condensa possono verificarsi per cattive tecniche costruttive anche all'interno dei muri o su alcune superfici interne. Spesso gli impianti di filtrazione dell'aria, che trattengono i funghi, sono luoghi ideali per la loro proliferazione che avviene, a seconda delle specie, sia nei filtri che nelle riserve di acqua impiegate dall'impianto.

Nell'aria la concentrazione di funghi è espressa in CFU/m<sup>3</sup> (Colony Forming Units). Negli ambienti indoor si sono registrate concentrazioni generalmente comprese tra 10 e 20.000 CFU/m<sup>3</sup> con picchi fino a 400.000 CFU/m<sup>3</sup>. Il rapporto tra concentrazione indoor e outdoor è molto variabile e dipende dalla specie.

Gli effetti sanitari riguardano le allergie di tipo respiratorio e alcune dermatiti allergiche topiche. Le spore e i filamenti prodotti dai funghi possono causare riniti e asma. Alcuni studi su pazienti con allergie respiratorie hanno evidenziato una prevalenza variabile, dal 2 al 30%, di allergie a funghi. Recenti studi epidemiologici hanno associato sintomi respiratori in bambini e adulti alla presenza di umidità e muffe negli ambienti domestici. Funghi e muffe producono anche alcune tossine che si trovano nelle spore e nei filamenti. Nonostante i dati siano ancora incompleti queste tossine rappresentano un potenziale fattore di pericolo.



## Amianto

Per amianto si intende un termine generico che racchiude un gruppo di silicati (minerali contenenti silicio) che si presentano in forma fibrosa, che sono incombustibili e che si possono separare in filamenti. I principali minerali si possono dividere in due gruppi:

- le fibre anfiboliche: sono di forma lineare e penetrano più a fondo fino agli alveoli polmonari; tra queste la crocidolite è la più corta e pertanto è ritenuta la più pericolosa ("amianto blu")
- le fibre serpentine: crisotilo ("amianto bianco") che rappresenta circa il 95% di tutto l'amianto estratto nel mondo. Le fibre sono di forma serpentina sono più facilmente intercettate dai bronchi e bronchioli.

L'amianto è stato diffusamente impiegato nell'industria edile nei materiali da costruzione come isolante termico e come resistente al fuoco. Sono più di 3000 i prodotti contenenti fibre di amianto.

Vi sono tre tipi di esposizioni: professionale, che riguarda il personale delle fabbriche dei materiali contenenti amianto; ambientale, che riguarda la popolazione in genere a seguito dell'impiego di amianto nei freni dei veicoli, nei filtri per la produzione di bevande, etc.; domestica, imputabile all'impiego di prodotti contenenti amianto nelle abitazioni, e addirittura al trasporto attraverso gli indumenti dei lavoratori.

I principali effetti sanitari sono riconducibili al mesotelioma (tumore del torace), al carcinoma polmonare, e all'"asbestosi", ossia una degenerazione irreversibile del polmone che può essere fatale.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha valutato la cancerogenicità dell'esposizione a fibre di amianto e lo ha classificato nel gruppo 1 (sostanze cancerogene). Nella valutazione è indicato un sinergismo (di tipo moltiplicativo) da parte dell'esposizione ad amianto verso il tumore polmonare, mentre il mesotelioma sembra essere indipendente dal consumo di tabacco. [G1]

Il tempo di latenza degli effetti sanitari è molto lungo (decine di anni). Per questo motivo, pur essendo drasticamente crollata la produzione di prodotti con amianto a seguito dell'entrata in vigore delle leggi 257/92 e 246/98, si registra un continuo aumento di casi per esposizioni avvenute negli anni passati. Nel periodo 1969-1994 la mortalità per tumore maligno della pleura è aumentato mediamente del 115% ogni 5 anni, e si è passati da 500 a 900 decessi per ogni anno (Martuzzi et al., 1999 [G2]).

Da una analisi dell'ISPESL, su 438 casi di mesotelioma pleurici occorsi in alcune regioni d'Italia, risulta che il 67% dei casi avrebbe subito esposizioni di tipo professionale, il 9% di tipo ambientale e il 4% di tipo domestico.

L'esposizione in ambienti indoor pertanto proviene dal deterioramento spontaneo o provocato dei materiali contenenti fibre di amianto. Attualmente le concentrazioni indoor possono essere considerevolmente più alte rispetto a quelle outdoor.

La concentrazione delle fibre di amianto in aria si misura in fibre per metro cubo:  $F/m^3$  (fibre con lunghezza  $L > 5 \mu m$  e diametri  $D > 3 \mu m$  e rapporto  $L/D > 3/1$ ).

La concentrazione outdoor in ambienti rurali è generalmente inferiore a  $100 F/m^3$ , mentre in ambienti urbani varia da  $100$  a  $1000 F/m^3$ . In prossimità di impianti di cemento-amianto e in prossimità di strade ad elevato traffico può arrivare fino ad alcune migliaia di fibre per metro cubo.

Negli ambienti indoor senza specifiche sorgenti la concentrazione è generalmente al di sotto di  $1000 F/m^3$ ; in presenza di materiali friabili contenenti amianto la concentrazione arriva fino a  $10.000 F/m^3$ ; in ambienti di lavoro può raggiungere concentrazioni di  $105$  fino a  $108 F/m^3$ .

### Composti organici volatili (VOC)

Con la denominazione di composti organici volatili viene indicata una serie di sostanze che hanno un punto di ebollizione che va da un limite inferiore di 50-100 °C a un limite superiore di 240-260 °C. Sono più di 300 i composti che rientrano in questa categoria (Berglund et al., 1986); tra cui i più noti sono gli idrocarburi alifatici (dal n-esano al n-esadecano e i metilesani), i terpeni, gli idrocarburi alifatici (benzene e derivati, toluene, o-xilene, stirene), gli idrocarburi clorinati (cloroformio, diclorometano, clorobenzeni), gli alcoli (etanolo, propanolo, butanolo, e derivati), gli esteri e i chetoni, e le aldeidi (formaldeide). Sorgenti di VOC negli ambienti confinati sono:

- Prodotti per la pulizia e cere: cere per pavimenti e mobili liquidi e in aerosol, prodotti per la pulizia dei bagni, dei vetri, dei forni, paste abrasive, detergenti per stoviglie, deodoranti solidi e spray
- Pitture e prodotti associati: pitture (all'olio, uretaniche, acriliche), vernici a spirito per gommalacca, mordenti e coloranti per legno, diluenti, detergenti per pennelli, sverniciatori
- Pesticidi, insetticidi e disinfettanti
- Colle e adesivi
- Prodotti per la persona e cosmetici
- Prodotti per l'auto
- Prodotti per hobby: fotografia
- Mobili e tessuti
- Materiali da costruzione
- Apparecchi di riscaldamento/condizionamento (serbatoi), cucine, camini
- Fumo di tabacco
- Sostanze di origine umana, animale e vegetale
- Acqua potabile: volatilizzazione durante docce o bagni
- Sorgenti outdoor: emissioni industriali, emissioni da veicoli

Misure effettuate in diverse indagini e raccolte e analizzate dall'OMS (WHO, 1989) hanno portato ad alcune considerazioni: i dati delle concentrazioni riscontrati nelle indagini sono tra loro confrontabili e sono ritenuti sufficientemente rappresentativi della situazione Europea; le concentrazioni indoor sono generalmente superiori alle concentrazioni outdoor (fino anche a 30 volte); la mediana di molti composti è di diversi ordini di grandezza inferiore

re ai limiti esistenti per le esposizioni occupazionali. In alcuni casi particolari le concentrazioni possono raggiungere valori molto alti. La continua introduzione di nuovi prodotti modifica continuamente il quadro delle sostanze presenti e le relative concentrazioni.

Gli effetti sanitari dovuti ad esposizione ai VOC sono di tipo acuto e cronico. Le valutazioni derivano da studi su animali e da studi su esposizioni occupazionali. Data la vastità delle sostanze si descrivono di seguito alcuni effetti generali. Molti VOC sono potenti narcotici e agiscono sul sistema nervoso centrale come depressivi. Molti sono irritanti per occhi, pelle, e sistema respiratorio. Ad alte concentrazioni possono causare danni al fegato e ai reni. Ad esempio gli xileni, il toluene e i suoi composti, il e il diclorobenzene producono, in misura diversa, tutti gli effetti descritti (Maroni et al., 1995). Alcuni composti come il diclorometano, presente nei prodotti per sverniciare, o lo stirene, presente nei combustibili e nel tabacco, sono ritenuti possibilmente o probabilmente cancerogeni. Altri sono possibili co-cancerogeni (ottano, decano). Ci sono alcune evidenze sulla relazione tra alcuni sintomi tipici della sindrome da edificio malato (Sick Syndrome Building-SBS) e la presenza di VOC sia di tipo sperimentale (Molhave et al., 1987) che di tipo epidemiologico (Norback et al., 1990a Norback et al., 1990b).

Un cenno a parte meritano il benzene e la formaldeide.

L'Agenzia Internazionale per la ricerca sul Cancro (IARC) ha effettuato una valutazione sulla cancerogenicità del benzene, in particolare analizzando studi epidemiologici, inserendolo nel gruppo 1, tra le sostanze per le quali vi è una sufficiente evidenza di cancerogenicità (leucemie) per gli esseri umani (IARC, 1987).

Sorgenti di benzene indoor, oltre ovviamente all'aria esterna, sono vernici, fumo di tabacco, solventi, combustibili liquidi e solidi. Le concentrazioni che si riscontrano dipendono fortemente dalla presenza di sorgenti. Le concentrazioni esterne generalmente (non nelle immediate vicinanze di sorgenti quali distributori, parcheggi, zone a traffico intenso) variano tra 5 e 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . In assenza di sorgenti interne, le concentrazioni indoor sono una frazione di quelle outdoor, ma in presenza di sorgenti interne, possono arrivare a valori anche considerevolmente superiori.

Da una valutazione della Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale (CCTN), in Italia l'esposizione residenziale al benzene sarebbe responsabile di un numero di casi di leucemia compreso tra 17 e 246 per ogni anno. Tale stima è basata su valori di concentrazioni medie estese a tutta la vita tra 14 e 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (CCTN, 1995).

L'OMS, per il benzene, a causa della considerazione che non vi è una soglia causa-effetto fornisce dei valori in termini di linee guida che sono riferiti a

unità di rischio aggiuntivo per  $\text{mg}/\text{m}^3$  di sostanza. In particolare, per il benzene è indicato un intervallo:  $4,4-7,5 \cdot 10^{-6}$  (WHO, 1999). Il D.M. 02/04/02 n. 60 ha stabilito un valore limite di  $5 \text{ microg}/\text{m}^3$  come valore medio annuale: entrata in vigore entro il 1 gennaio 2010

### *Formaldeide*

La formaldeide è il più semplice composto organico appartenente alla famiglia delle aldeidi. A temperatura ambiente è inodore, ma ha un forte e pungente odore. E' un composto ampiamente utilizzato nella produzione di numerosi prodotti per l'edilizia e anche nella fabbricazione di mobili. E' anche un prodotto secondario della combustione e di alcuni fenomeni naturali, per cui è presente sia negli ambienti indoor che outdoor. La principale sorgente di formaldeide indoor è data dalla presenza di legname del tipo pressato per il quale sono impiegate resine urea-formaldeide e fenolo-formaldeide che rilasciano nel tempo questa sostanza. Anche l'abbigliamento e i tessuti per arredamento sono sorgenti di formaldeide. Dagli anni '70 molti proprietari di case, per scopi legati al risparmio energetico, hanno isolato le intercapedini delle loro abitazioni insufflando schiume a base di urea-formaldeide. Alcuni studi hanno dimostrato che l'emissione di formaldeide da questo tipo di trattamento decresce col passare del tempo, per cui, a distanza di alcuni anni, questi interventi non contribuiscono significativamente alla concentrazione indoor.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha valutato la formaldeide in relazione alla sua cancerogenicità già dal 1982. Concludendo che c'è una limitata evidenza di cancerogenicità sugli esseri umani e una sufficiente evidenza su animali, e per questo lo ha inserito nel gruppo 2A come probabile cancerogeno (IARC, 1982).

Gli effetti principali, diversi da quelli "probabilmente cancerogeni" dovute a basse esposizioni croniche, sono, oltre ad un pungente odore ( $60-1200 \text{ microg}/\text{m}^3$ ), sensazione di bruciore agli occhi ( $10-1900 \text{ microg}/\text{m}^3$ ) bruciore alla gola e possibili attacchi in soggetti asmatici [G2] ( $100-3100 \text{ microg}/\text{m}^3$ ), forte lacrimazione ( $12000-25000 \text{ microg}/\text{m}^3$ ), fino al pericolo di vita ( $37000-60000 \text{ microg}/\text{m}^3$ ) e al decesso ( $60000-125000 \text{ microg}/\text{m}^3$ ). Le concentrazioni medie annuali outdoor di formaldeide sono generalmente intorno a  $1 \text{ microg}/\text{m}^3$ . Nelle aree urbane tale valore sale a  $5-10 \text{ microg}/\text{m}^3$  con valori di picco, per brevi periodi di un ordine di grandezza superiori. In ambienti domestici sono state misurate concentrazioni che vanno da decine a centinaia di  $\text{microg}/\text{m}^3$  con valori di punta di oltre  $1000 \text{ microg}/\text{m}^3$ .

La formaldeide si combina e reagisce con altri prodotti organici presenti nell'ambiente indoor i cui effetti non sono del tutto noti.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha fissato un valore guida di 100 microg/m<sup>3</sup> (media su 30 minuti) basata su gli effetti diversi da quello cancerogeno (WHO, 1987).

Possibili azioni per ridurre l'esposizione alla formaldeide sono il preventivo controllo dei materiali e degli arredamenti durante l'acquisto. L'emissione della formaldeide dipende anche dalla temperatura e dall'umidità: il mantenimento di condizioni di moderate temperatura e umidità ne riducono l'emissione.

## Allegato 4

**Fumo Passivo (Environmental tobacco smoke - ETS)**

Con un comunicato del 19.6.2002 l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul cancro dichiara che: "Il fumo passivo causa tumori ai polmoni: i non fumatori sono esposti alle stesse sostanze cancerogene cui sono esposti i fumatori. È stato dimostrato che sono causa di cancro ai polmoni di persone che non hanno mai fumato persino i livelli tipici di esposizione passiva. Il fumo passivo è cancerogeno per gli uomini".

Il fumo di tabacco consta di una mistura di più di 4000 componenti, in parte presenti come tali nel tabacco e entrati a far parte del fumo, in parte frutto delle modificazioni (pirolisi e piro-sintesi) dovute alla temperatura prodotta dalla combustione del tabacco. Una parte di questi componenti si trova nel fumo di tabacco come particolato, una parte come gas.

Tra i prodotti della componente particolata del fumo c'è in primo luogo la nicotina, il cui effetto farmacologico (in larga misura mediato da rilascio di catecolamine, e accompagnato da liberazione in circolo di beta-endorfine, cortisolo, acidi grassi, vasopressina), con una percezione soggettiva di benessere e vivacità intellettuale è ricercato dal fumatore ed è al tempo stesso causa di dipendenza; ci sono poi catrame, idrocarburi aromatici, benzopirene, naftilamine, cresolo, e altre sostanze cancerogene e co-cancerogene. Nella componente gassosa sta al primo posto il monossido di azoto, che interferisce col trasporto di ossigeno e determina in sostanza una condizione di moderata ipo-ossiemia; vi si trova, inoltre una serie di irritanti per l'epitelio ciliato delle vie respiratorie (ciliotossine), come l'acido cianidrico, l'acetaldeide, la formaldeide, ed altri carcinogeni. In sostanza, dunque, il fumo comporta quattro diversi tipi di tossicità:

- quella farmacologica, da nicotina, rilevante specialmente a carico del sistema nervoso centrale e del circolo;
- quella carcinogenica, legata agli idrocarburi aromatici, al catrame e ad altri prodotti;
- quella sul trasporto di ossigeno, legata prevalentemente al monossido di azoto;
- quella irritante sull'epitelio respiratorio, legata alle ciliotossine.

È difficile distinguere tra questi diversi effetti, e certamente, per alcuni dei danni dimostratamente dovuti al fumo, come quello sul sistema circolatorio, sulla patologia respiratoria e sul sistema nervoso, e specialmente per l'effetto

cancerogeno, si deve ritenere che sia in gioco una sinergia di più sostanze. In pratica, quindi, si finisce per studiare l'effetto generale del fumo, basandosi prevalentemente su dati epidemiologici, cioè sugli effetti statisticamente misurabili su una popolazione esposta al fumo. Si parla di fumo diretto (MS o Mainstream Smoking) e di fumo ambientale o passivo (ETS, o Environmental Tobacco Smoking).

L'entità della esposizione al fumo può venir calcolata in maniera diretta dosando un metabolita della nicotina (la cotinina) nelle urine e nel sangue, oppure in maniera indiretta basandosi sull'interrogatorio: questo ultimo tipo di rilievi dà risultati abbastanza stringenti e obbiettivi per la misurazione del fumo diretto (quante sigarette al giorno, o quanti pacchetti alla settimana), un po' meno precisi per la valutazione del fumo passivo in ambiente domestico (numero di sigarette fumate dal coniuge, o dai genitori), alquanto più imprecisi per la valutazione dell'entità della esposizione a fumo passivo nell'ambiente di lavoro.

I rischi da fumo diretto o MS sono conosciuti "da sempre", e comunque storicamente ben documentati fin dagli anni '60; il fumo è considerato una delle cause maggiori di morbilità e mortalità nel mondo, sia per ciò che riguarda la carcinogenesi (vedi tabella 1), polmonare e non solo polmonare, sia per ciò che riguarda la patologia cardiovascolare, sia per ciò che riguarda la patologia respiratoria.

**Tabella 1** Rischi relativo (RR) di ca. polmonare in studi "pooled" condotti in varie nazioni: valori per tutti i fumatori e per fumatori di oltre 16 sigarette al giorno (da: Respiratory health effects of passive smoking: lung cancer and other disorders EPA/600/6-90/006F).

| Nazione         | Tutti i fumatori > |           | > 16 sig/die |           |
|-----------------|--------------------|-----------|--------------|-----------|
|                 | RR                 | IC (90%)  | RR           | IC (90%)  |
| Grecia          | 2,01               | 1,42-2,84 | 2,15         | 1,38-3,35 |
| Hong Kong       | 1,48               | 1,21-1,81 | 1,68         | 1,08-2,62 |
| Giappone        | 1,41               | 1,18-1,69 | 1,96         | 1,49-2,60 |
| USA             | 1,19               | 1,04-1,35 | 1,38         | 1,13-1,70 |
| Europa Ovest    | 1,17               | 0,84-1,62 | 3,11         | 1,18-7,71 |
| Cina            | 0,95               | 0,81-1,12 | 2,32         | 1,78-3,03 |
| Tutti gli studi | -                  | -         | 1,81         | 1,60-2,05 |

Ai rischi da ETS si è cominciato invece a pensare solo dai primi anni '70. Le associazioni che hanno presentato da subito il massimo grado di evidenza riguardano gli effetti del fumo materno sul prodotto del concepimento (che è



una forma molto particolare di ETS) e l'aumentato rischio di tumore negli adulti esposti. Sono stati successivamente messi in evidenza alcuni effetti specifici sul bambino: la cosiddetta sindrome della morte improvvisa e inattesa del lattante (SIDS) e le manifestazioni respiratorie (asma, bronchiti, broncopolmoniti, otiti). Più recentemente sono stati messi in evidenza anche gli effetti dello ETS sulle vie respiratorie dell'adulto, infine gli effetti dello ETS sull'apparato cardio-circolatorio e, da ultimo, ancora con qualche dubbio, un aumentato rischio di tumore anche nel bambino.

Sebbene non paragonabili ai danni diretti (sugli apparati respiratorio e cardio-circolatorio, sulle funzioni neurologiche superiori, e sulla oncogenesi), i danni indiretti da fumo passivo (che in buona sostanza sono da considerare semplicemente come effetto di una esposizione quantitativamente minore ma qualitativamente simile) sono ormai largamente documentati. Quale sia poi la quota della popolazione di adulti e di bambini esposti a una dose significativa di fumo passivo è un po' più difficile da definire; tale quota varia, nelle diverse realtà, da meno del 10% a più del 50%. In un recentissimo studio policentrico su 36 situazioni europee, i risultati sulla popolazione italiana hanno dato valori di prevalenza di esposizione passiva in adulti tra il 40% e il 50%. A questi valori di esposizione corrisponde una prevalenza di fumatori attivi un po' superiore. Da questi dati, da quelli pubblicati dall'Istat, e da altri dati osservazionali raccolti direttamente sulla prevalenza dell'abitudine al fumo tra le madri nutrici, e più in generale tra i genitori di bambini in tenera età, possiamo valutare che il 40% circa dei bambini italiani sono esposti al fumo ambientale e che il 10% hanno uno o entrambi i genitori che fumano più di 10 sigarette al giorno.

*L'esposizione al fumo ambientale ed il rischio di tumore del polmone nel coniuge non fumatore*

Negli ultimi 20 anni sono stati condotti numerosi studi epidemiologici che hanno valutato l'associazione tra esposizione al fumo passivo e tumore del polmone nei coniugi non fumatori.

Il primo importante studio fu quello condotto in Giappone su quasi 100mila donne non fumatrici nel quale si dimostrò che il rischio di tumore del polmone aumentava in modo statisticamente significativo con la quantità di sigarette fumate dal coniuge fumatore.

Nel 1986, l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) concluse, anche sulla base di altri rapporti che mettevano in relazione il fumo passivo ed il tumore del polmone, che "il fumo passivo fa aumentare il rischio di cancro". Nello stesso anno, anche due rapporti americani, rispettivamente

del National Research Council e del Surgeon General conclusero che il fumo passivo aumenta l'incidenza di tumore del polmone tra i non fumatori.

Più tardi, nel 1992, la statunitense Environmental Protection Agency (EPA) sulla base di una metanalisi degli studi pubblicati fino a quel momento classificò il fumo passivo come carcinogeno di classe A, cioè un carcinogeno umano noto. Complessivamente questa metanalisi riscontrò un aumento significativo di tumore del polmone in donne non fumatrici sposate con uomini fumatori.

Dal 1988, la IARC ha coordinato uno studio internazionale multicentrico di caso-controllo di tumore del polmone in non-fumatori. Il rischio dall'esposizione a fumo passivo da coniuge fumatore era consistente ma inferiore alle precedenti analisi. Un risultato che poteva essere spiegato dalla presenza di un numero elevato di persone la cui esposizione al fumo passivo era terminata diversi anni prima. Vi era anche un rapporto dose-risposta piuttosto consistente, ed i rischi più alti si riscontravano quando venivano combinati il fumo passivo dal coniuge ed il fumo passivo dal luogo di lavoro.

Lo studio più importante condotto negli Stati Uniti ha invece dimostrato un eccesso di rischio del 30% di tumore del polmone nei coniugi non fumatori di coniugi fumatori. Anche in questo studio era dimostrato un eccesso di rischio molto aumentato quando venivano combinati il fumo passivo del coniuge con il fumo passivo in ambiente di lavoro.

Ad un livello di esposizione più alto, combinando diversi fattori, vi era un aumento del 75% del rischio.

### *L'esposizione al fumo ambientale nell'ambiente di lavoro ed il rischio di cancro*

Lo studio più importante che è stato condotto è quello della IARC, studio multicentrico condotto in Europa, al quale ha partecipato anche l'Italia e che ha confermato l'aumento di rischio per esposizione al fumo passivo in ambiente di lavoro.

Il rischio di tumore del polmone è simile al rischio riscontrato nel caso di esposizione al fumo del coniuge fumatore e mostra un simile rapporto dose-risposta. D'altra parte, invece, pochi studi sono stati condotti sulla esposizione al fumo passivo in luoghi pubblici, per esempio bar e ristoranti anche se uno studio molto importante degli Stati Uniti ha riportato un aumento significativo di rischio per l'esposizione in ambienti sociali ed un rapporto positivo con la durata dell'esposizione.

È evidente peraltro che va tenuto conto, nel valutare il rischio di cancro del polmone da fumo passivo, della combinazione dei vari fattori di rischio: coniuge fumatore, ambiente di lavoro, luoghi sociali quali bar e ristoranti,

esposizione durante l'età pediatrica ed adolescenziale, etc. È ovvio che combinando questi rischi, si può arrivare ad aumentare il rischio di sviluppare un tumore del polmone fino al 75% rispetto a chi non è esposto a nessuno dei fattori di rischio sovraesposti.

### *Effetto del fumo materno sul prodotto del concepimento*

Tratteremo molto brevemente questo capitolo, sebbene sia uno dei più studiati in pediatria. Infatti, pur trattandosi tipicamente di un "rischio ambientale" per l'embrione e per il feto, la questione non riguarda l'ambiente domestico, bensì la diade madre-embrione-feto: la madre è una fumatrice diretta (MS) e il prodotto del concepimento è esposto ad una concentrazione di tossici da tabacco di livello assai vicino a quello materno. Tuttavia, va detto che i danni embrio-fetali costituiscono eventi biologicamente interessanti, e che questi si sovrappongono in parte agli effetti della esposizione post-natale.

Il fumo materno produce un aumentato rischio di aborto, di malformazione, in particolare di labbro leporino e di palatoschisi (rischio relativo (RR): 1,3), di interruzione precoce di gravidanza, di basso peso a termine di gravidanza (-170 g, mediamente). È probabile che il rischio di malformazioni sia legato alle sostanze mutagene del fumo, mentre il basso peso alla nascita e i disturbi della gestazione siano legati ad alterazioni del flusso placentare. Inoltre, il figlio di madre fumatrice mostrerà, in età scolare, alcuni effetti di carattere neuropsichiatrico: un aumentato rischio di sindrome da difetto di attenzione con iperattività (ADHD), di insuccesso scolastico e di disturbi della condotta. Per questi effetti sul sistema nervoso centrale è ragionevole chiamare in causa, oltre il disturbo degli scambi a livello placentare e di tessuto, l'azione diretta della nicotina.

C'è poi una serie di altri effetti, inattesi e congiunti, sul sistema respiratorio, in particolare sulla conformazione e sulla reattività bronchiale e sul sistema immunitario e sul suo orientamento in senso allergico della risposta immune. Un accurato studio condotto da ricercatori australiani ha dimostrato che il fumo in gravidanza è associato ad una significativa riduzione del calibro bronchiale e ad un significativo aumento delle resistenze espiratorie (FEV1) nel primo anno di vita. Inoltre i figli di madri fumatrici hanno un aumentato livello degli anticorpi responsabili di reazioni allergiche, le IgE, e un più basso livello dei linfociti T-Helper (CD4) che controllano positivamente la risposta immune. Questi effetti si sommano, come vedremo tra poco, a quelli dovuti alla esposizione post-natale al fumo ambientale, con più evidente rilevanza degli effetti del fumo materno rispetto a quelli del fumo paterno.

*L'esposizione al fumo materno e il rischio di morte improvvisa (SIDS)*

La morte improvvisa e inattesa del lattante (SIDS, Sudden Infant Death Syndrome), chiamata anche popolarmente "morte in culla", è la prima e quasi la sola causa di morte del bambino tra la fine del primo mese e il compimento del dodicesimo mese di vita (mortalità infantile). Gli studi epidemiologici più attendibili danno per questa causa di morte, in Italia, una incidenza pari allo 0,7%. Il meccanismo di questo tipo di morte non è chiaro; la maggior parte degli indizi suggerisce che esso dipenda da un impaccio meccanico alla respirazione, forse prodotto semplicemente dalle coperte che coprono il viso del bambino o dal cuscino troppo morbido in cui affonda la testina, che si traduce in un accumulo di anidride carbonica nell'aria inspirata (re-breathing) e in un effetto tossico sul centro del respiro. Alla base di questo evento drammatico si sommano fattori costituzionali, difetti, forse genetici della conduzione cardiaca (Q-T lungo) e del trasporto di neurotrasmettitori (5-HT), e fattori ambientali. A loro volta, le cause ambientali evitabili sono tre: la posizione prona nel sonno, il fumo materno e le coperte troppo pesanti. Il fumo materno dunque, dopo la posizione nel sonno, costituisce il fattore di rischio di maggior rilevanza. Riportiamo i risultati di un recente lavoro di revisione sistematica della letteratura. I risultati mostrano un rischio quasi doppio di SIDS per i bambini nati da madre fumatrice (fumo esclusivamente prenatale e fumo pre e post-natale considerati assieme) con un effetto dose-risposta (cioè con un effetto tanto maggiore quanto maggiore era il numero di sigarette consumate). Anche il fumo post-natale paterno mostra un effetto significativo in 2 lavori su 3. In sostanza, il fumo materno pre-parto sembra predisporre il neonato a subire più pesantemente i rischi post-natali che producono la SIDS, ma anche il fumo ambientale post-natale per sé costituisce un fattore di rischio. E' presumibile che l'effetto del fumo sia al tempo stesso di tipo farmacologico (effetto sul sistema nervoso centrale, sul centro respiratorio e sui recettori cardiaci) sia di tipo irritativo sull'apparato respiratorio da parte delle ciliotossine.

*L'esposizione al fumo ambientale e il rischio di asma e di malattie allergiche nei primi anni di vita*

Abbiamo già visto che già in epoca prenatale il fumo materno influenza sia il sistema bronchiale sia il sistema immune orientandoli verso una risposta sia di tipo asmatico (bronchiale) sia di tipo allergico (immunologica). Nelle successive epoche della vita l'esposizione al fumo ambientale risulta correlata ad un maggior numero di malattie allergiche e ad una maggiore prevalenza di

sensibilità allergica cutanea (prick test) verso allergeni respiratori, oltre che ad un aumento delle IgE. La maggior parte di questi studi sono stati fatti tra gli anni '80 e gli anni '90, e sono noiosamente concordi. In sintesi, è stata inequivocabilmente dimostrata un'incidenza significativamente maggiore di asma e di bronchite asmatica in bambini esposti a fumo domestico e nell'asilo-nido rispetto ai bambini non esposti (25-30% nei bambini esposti contro 15% nei bambini non esposti).

Uno studio relativamente recente su 786 bambini non selezionati dai 2 ai 12 anni di età ha rilevato un rischio particolarmente elevato di asma nei figli di donne che fumavano più di 10 sigarette al giorno, specie se appartenenti a classi sociali disagiate. La correlazione tra il fumo materno e l'asma persistente è risultato comunque, in tutti gli studi, molto maggiore che quella tra asma e fumo paterno, la cui significatività è incerta.

Meno numerosi, ma egualmente significativi, sono gli studi caso-controllo: in uno di questi, il livello di cotinina è risultato più alto nei soggetti di 2 anni di età con bronchite asmatica che non nei controlli sani; in un altro studio, il numero delle madri fumatrici è risultato significativamente più alto per i soggetti con bronchite asmatica che per i controlli.

Infine - è questa, forse, l'osservazione più rilevante - in uno studio prospettico su 897 bambini asmatici, questi mostrarono un miglioramento della gravità dell'asma e della funzionalità respiratoria quando i genitori accettarono di ridurre drasticamente il consumo di sigarette o di interrompere l'abitudine al fumo.

### *L'esposizione al fumo ambientale e il rischio di infezioni respiratorie e di difettosa funzionalità timpanica nei primi anni di vita*

Numerosi studi condotti tra la fine degli anni '70 e gli anni '80 hanno dimostrato una consistente influenza del fumo dei genitori sulle infezioni delle alte e basse vie respiratorie, con particolare riguardo all'otite e alle sue conseguenze. Nel corso del primo anno di vita, è stato dimostrato, nei figli di madri fumatrici, rispetto ai coetanei non esposti a fumo passivo, un eccesso del 150% di bronchiti e polmoniti; un eccesso del 60% di otiti medie acute (OMA) e un rischio di ospedalizzazione 4 volte superiore. Nelle età successive (1-5 anni), i figli di fumatrici presentano circa il doppio di riniti, sinusiti, bronchiti, polmoniti, rispetto ai figli di non fumatori. E' stato valutato che ogni 5 sigarette in più fumate dalla madre aumenta del 70% circa il rischio di infezioni che richiedano il ricovero ospedaliero. Esiste analogamente una associazione tra il numero di sigarette fumate dalla madre e la frequenza di otiti purulente e di perforazioni timpaniche. Inversamente, alla presenza di livelli dosabili di cotinina ematica corrisponde un eccesso di otiti del 40%; si può infine

documentare. una significativa correlazione tra alterazioni del timpanogramma e livello di cotinina salivare

Nell'insieme, più di 40 pubblicazioni qualitativamente e quantitativamente rilevanti hanno confermato un rischio doppio di patologia otoiatrica nei bambini esposti a ETS rispetto ai non esposti; nei bambini esposti al fumo, inoltre, la capacità di riconoscere gli odori è ridotta rispetto ai controlli

### *Il rischio di patologia respiratoria nell'adulto*

Nell'adulto l'evidenza di un effetto negativo del fumo passivo sulla funzione respiratoria, sulla gravità dell'asma e sulla bronchite ostruttiva è meno netta che nel bambino, ma dello stesso segno. Esiste anche un dimostrato rapporto dose/risposta, (maggiore è l'entità della esposizione, maggiori sono gli effetti clinici). Gli studi su questo argomento sono più recenti di quelli effettuati nel bambino (anni '90). Un ampio studio multinazionale, su quasi 8000 adulti (European Community Respiratory Health Survey), dimostra un effetto negativo dell'ETS sulla spirometria, e sulla incidenza di asma molto modesto e al limite della significatività statistica per il fumo passivo in famiglia (coniuge fumatore), molto consistente invece per il fumo passivo sul posto di lavoro, con un rischio (OR) di patologia di una volta e mezzo superiore per i soggetti esposti rispetto ai non esposti. L'associazione di ETS con la broncopatia cronica ostruttiva (una forma di insufficienza respiratoria cronica propria dell'anziano e altamente invalidante), sebbene dimostrata da molti lavori, è invece molto più contenuta, al limite della significatività.

### *Fumo passivo e danno cardiovascolare*

Il fumo attivo produce sia un aumentato fabbisogno di ossigeno da parte del muscolo cardiaco, sia una compromissione della vasodilatazione controllata dall'endotelio vasale (mediante la produzione di monossido di azoto e di acetilcolina), con riduzione del calibro e della distensibilità aortica e con riduzione del flusso ematico nelle coronarie. E' dunque responsabile di vasocostrizione, ridotto arrivo di sangue al miocardio, e ipertensione: effetti che si verificano immediatamente ad ogni singola esposizione al fumo e che tendono a produrre un danno permanente e automantenuto al cuore e ai vasi.

Effetti simili si osservano col fumo passivo. L'effetto immediato del fumo passivo sulla distensibilità aortica, sia nel fumatore abituale che nel non fumatore è stato riprodotto sperimentalmente. Il rischio sulla popolazione esposta è stato dimostrato in larghi studi epidemiologici nella seconda metà degli anni

'90. L'esposizione al fumo del coniuge aumenta il rischio di ischemia cardiaca del 30%; l'esposizione sul posto di lavoro lo aumenta fino all'80%. Diversamente da quanto si verifica per il tumore o per il danno respiratorio, in cui si evidenzia una relazione lineare tra entità dell'esposizione e effetto clinico, per la patologia cario-vascolare la relazione non è lineare, e anche una modesta esposizione ha un effetto misurabile sul rischio di ischemia cardiaca. E' stato calcolato che una singola esposizione a fumo passivo aumenta del 34% il rischio di infarto a breve termine nel non fumatore, a causa di un aumento nella viscosità del sangue (aggregazione piastrinica). L'aumentato rischio cessa dopo circa 2 ore.

#### *Rischio di tumore nel bambino*

L'esposizione al fumo in età pediatrica può essere considerato "a priori" un aumentato rischio di tumore in età adulta. In effetti, il rischio statistico da esposizione ai cancerogeni del fumo (così come l'esposizione ad ogni altro tipo di cancerogeno) si accumula, per così dire, nel corso dell'intera vita. Ma solo recentemente è stata documentata anche una correlazione tra ETS e tumore maligno e leucemia infantile. Il rapporto è relativamente debole (e d'altronde anche l'incidenza assoluta di tumori nel bambino è bassa) ma sufficiente per essere considerato significativo.

#### *Conclusioni*

Il fumo passivo, ETS, costituisce una significativa situazione di rischio per i non fumatori, bambini e adulti. Per i bambini, l'ambiente a maggior rischio è quello domestico, per gli adulti lo è invece l'ambiente del lavoro. Per il rischio specifico di infarto cardiaco questo viene aumentato per ogni singola esposizione. Nel loro insieme, i rischi da fumo passivo interessano da 1/3 alla metà della popolazione dei non fumatori.

Per il cancro del polmone l'esposizione al fumo del coniuge comporta un aumento del rischio pari al 24%; per la patologia cardiovascolare il fumo del coniuge produce un aumento del rischio pari al 30%; per la patologia respiratoria dell'adulto il fumo del coniuge non costituisce un fattore di rischio misurabile, ma il fumo nel posto di lavoro aumenta del 30% il rischio di asma e di compromissione. Nel bambino, la patologia respiratoria presa nel suo insieme è all'incirca raddoppiata per l'esposizione al fumo materno.

Estrapolando i dati epidemiologici raccolti in California alla realtà italiana si può calcolare, grosso modo, che l'esposizione a fumo passivo possa esser causa ogni anno di circa 200 "morti in culla", di circa 500.000 casi di dis-

turbi respiratori più o meno gravi (dall'otite, all'asma, alla broncopolmonite) nel bambino, di circa 500 cancro polmonari, di circa 10.000 cardiopatie ischemiche.

Tutto questo fa, del fumo passivo, un importante fattore di rischio evitabile, sia di invalidità, sia di morte. Gli interventi possibili sono di tre ordini:

un intervento educativo sulla popolazione generale, che riducendo il fumo attivo riduca indirettamente il rischio di fumo passivo (media, medici di medicina generale); un intervento educativo mirato alle donne in gravidanza (ostetrici) e alle famiglie dei bambini piccoli (media, pediatri)

una limitazione (possibilità di separazione dei non fumatori dai fumatori, misure per aumentare il ricambio aereo) o interdizione del fumo nei luoghi pubblici (NB: questa precauzione ha significato in pratica solo per la prevenzione dell'attacco ischemico acuto).

Misure simili, ma più rigorose per la limitazione o la interdizione del fumo nei luoghi di lavoro o aperti al pubblico con medio-lunghe permanenze dello stesso (cinematografi, teatri, ristoranti, etc.) e/o per un ricambio aereo continuo.



### Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)

Per idrocarburi policiclici aromatici (IPA – PAH) si intende una vasta classe (circa 500) di composti organici con due o più anelli benzenici. Non sono considerati nella classe dei VOC a causa della loro minore volatilità; vengono infatti classificati, tranne alcune eccezioni (naftalene) come composti organici semi volatili (sVOC).

Sono presenti ovunque in atmosfera; sono prodotti dalla combustione di combustibili fossili e nei processi industriali. Altre sorgenti sono la combustione di carburanti per trazione e il trasporto dei combustibili. Incendi in foreste e in campi agricoli possono essere sorgenti temporanee, limitate a particolari periodi dell'anno.

In ambienti indoor le principali sorgenti sono, oltre l'aria esterna, la combustione derivante dal consumo di tabacco e dalle utenze domestiche che bruciano combustibili (riscaldamento, forni e fornelli per cucina, camini). Gli idrocarburi policiclici aromatici sono presenti anche nei cibi (cucinati sulle fiamme, affumicati, etc.) e nell'acqua. In ambiente indoor gli IPA si presentano parzialmente sottoforma di vapore e parzialmente adsorbiti su particelle sospese.

L'elevato numero di composti rende difficile una valutazione globale, tuttavia esiste una specie di indicatore, il benzo(a)pirene (BaP) la cui misura fornisce una qualche indicazione (a meno di casi particolari) sulla presenza di molti tra i più importanti IPA. Le concentrazioni indoor di molti IPA sono, generalmente, maggiori di quelle outdoor: in ambienti con fumatori possono arrivare ad un valore anche tre-quattro volte superiore.

Le concentrazioni indoor variano da 1 a 50 ng/m<sup>3</sup>, ma in casi eccezionali, si sono misurate concentrazioni di singoli composti fino a migliaia di ng/m<sup>3</sup> (IPCS, 1998). Molto importante è la presenza di polveri, a causa della capacità degli IPA di depositarsi su di esse e della successiva risospensione di queste ultime che ne consente l'inalazione. Per questo motivo, parte degli IPA sono dovuti al trasporto dall'esterno attraverso le scarpe e gli indumenti.

Molti Ipa sono stati valutati dall'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro e sono stati classificati come probabilmente cancerogeni (gruppo 2A), mentre sembrano non esserci evidenze di altri effetti. Allo scopo di fare una valutazione sul rischio è stata scelta, come indicatore, la concentrazione di benzo(a)pirene. L'OMS, sulla base di studi epidemiologici sui lavoratori nelle industrie con forni a carbone ha indicato un rischio di tumore polmo-

nare pari a  $8.7 \cdot 10^{-5}$  per  $\text{ng}/\text{m}^3$  di benzo(a)pirene (WHO 1999, WHO 2000). Concentrazioni di BaP pari a 0,012–0,12 e 1,2  $\text{ng}/\text{m}^3$  corrispondono ad una stima dell'eccesso di rischio per tumore esteso a tutta la vita rispettivamente di 1/1.000.000 – 1/100.000 e 1/10.000.

## Monossido di carbonio

Il monossido di carbonio (CO) è un gas incolore, inodore e insapore. È prodotto a causa dell'incompleta combustione dei materiali che contengono carbone (combustibili per cucine e per riscaldamento, sigarette, ecc.). È uno degli inquinanti maggiormente diffusi, in particolare è ampiamente generato negli ambienti chiusi, soprattutto in cucina e a causa del consumo di tabacco.

Il principale effetto sanitario è dovuto alla maggiore affinità del CO nel legarsi all'emoglobina rispetto all'ossigeno e alla conseguente riduzione del trasporto di ossigeno nel sangue.

In genere la percentuale di carbossiemoglobina (COHb) è dell'ordine del 0,5-1 %; tale valore sale a 3-4% per i fumatori fino al 10% per i forti fumatori. Esposizioni continue a circa 11,5 mg/m<sup>3</sup> in aria portano la percentuale di COHb ad un valore di circa il 2% dopo 8 ore (Maroni et al., 1995).

Per percentuali che superano il 70-80% di COHb (~500-600 mg/m<sup>3</sup>) si arriva all'arresto cardiocircolatorio. Si stima che in Italia circa 165-200 decessi l'anno sono attribuibili ad intossicazioni avvenute a seguito di esposizioni accidentali al CO, essenzialmente causate dal malfunzionamento di caldaie, scaldabagni, stufe, cucine a gas.

Per esposizioni a concentrazioni dell'ordine di alcune decine di mg/m<sup>3</sup> si hanno possibili effetti cardiovascolari e neurologici; per concentrazioni inferiori a 15 mg/m<sup>3</sup> non sono stati riportati effetti sanitari.

Le concentrazioni che si riscontrano negli ambienti chiusi variano molto in relazione alla tipologia dell'ambiente, alla presenza e all'utilizzo di dispositivi che producono il CO. Nelle abitazioni la concentrazione, in situazioni normali, è di alcuni mg/m<sup>3</sup>, mentre nei luoghi di lavoro normali (uffici pubblici, scuole, negozi) la concentrazione è leggermente superiore, fino ad arrivare a valori superiori a 5 mg/m<sup>3</sup> per ambienti particolari quali box, autofficine, garage. In concomitanza di un utilizzo di apparecchi a combustione (stufe, cucine, etc) la concentrazione sale fino a valori superiori a 10 mg/m<sup>3</sup>, con valori di picco (di breve durata) di alcune decine di mg/m<sup>3</sup>. Anche il consumo di tabacco aumenta la concentrazione di CO: la presenza di CO in un'area non fumatori e in un'area fumatori, è risultata essere pari rispettivamente a 0,8 mg/m<sup>3</sup> e a 5 mg/m<sup>3</sup> (Sterling et al., 1982). Anche la vicinanza a sorgenti esterne particolari quali zone ad alto traffico o garage o parcheggi influenzano la concentrazione indoor arrivando a registrare valori anche superiori a 10 mg/m<sup>3</sup>.

L'OMS ha indicato delle linee guida per le quali non si supera il valore di COHb del 2,5% (WHO, 1999):

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 100 mg/m <sup>3</sup> (87 ppm) | per 15 min |
| 60 mg/m <sup>3</sup> (52 ppm)  | per 30 min |
| 30 mg/m <sup>3</sup> (26 ppm)  | per 1 h    |
| 10 mg/m <sup>3</sup> (9 ppm)   | per 8 h    |

Il D.M. 02/04/02 n. 60 ha stabilito un valore limite di 10 mg/m<sup>3</sup>, come media massima giornaliera ed entrerà in vigore il 1/1/05.

Possibili azioni di controllo dell'esposizione sono: corretta manutenzione delle caldaie a gas, ventilazione dei locali in cui è in funzione una stufa, ventilazione durante l'utilizzo della cucina tramite cappe di estrazione, evitare di tenere l'auto accesa in garage, ispezionare annualmente tutte le apparecchiature di combustione.

## Ossidi di azoto

Gli ossidi di azoto sono indicati con la formula generica  $\text{NO}_x$ . Tra questi il più importante dal punto di vista dell'inquinamento indoor e per gli effetti sanitari è il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ). È un gas di colore rosso bruno, solubile in acqua, caratterizzato da un forte, pungente odore; è un forte ossidante e corrosivo.

Viene prodotto naturalmente per azione batterica, ma anche per effetto della reazione tra l'ossigeno e l'azoto presenti in aria, che avviene ad elevate temperature e quindi in corrispondenza di processi di combustione (durante i processi di combustione si forma principalmente  $\text{NO}$ , ma anche  $\text{NO}_2$  e  $\text{N}_2\text{O}$ , che per effetto dell'ossidazione si trasformano in  $\text{NO}_2$ ).

Oltre che l'aria outdoor, nella quale la concentrazione di  $\text{NO}_2$  dipende in particolare dal traffico, sorgenti di  $\text{NO}_2$  sono i fornelli da cucina, le stufe, gli impianti di riscaldamento con caldaie interne, il fumo di sigaretta.

Le concentrazioni rilevate in indagini effettuate in ambienti confinati variano da alcune decine a centinaia di  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con picchi misurati nell'arco di un'ora fino a migliaia di  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (in cucina, durante le fasi di cottura).

Come il CO anche l' $\text{NO}_2$  inibisce il trasporto dell'ossigeno attraverso la formazione di metaemoglobina. Un'esposizione a circa  $10^6$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per alcuni minuti è mortale; un'esposizione a  $20 \cdot 10^3$  -  $80 \cdot 10^3$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  può causare fibrosi ed enfisema polmonare.

Relativamente ad effetti derivanti da esposizioni a breve termine è stata riscontrata, su individui in salute, una diminuzione della funzionalità polmonare a seguito di esposizioni di  $4700$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$  per circa due ore. Non sono stati riscontrati, sempre per individui sani, effetti al di sotto di circa  $1880$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . In soggetti particolarmente sensibili, come ad esempio gli asmatici, tali effetti sono stati osservati anche a concentrazioni di circa  $900$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Alcuni studi epidemiologici hanno suggerito che bambini esposti a contaminanti derivanti dall'impiego di forni a gas hanno un maggior tasso di sintomi e patologie polmonari (EPA 1982, WHO 1987).

Esposizioni a lungo termine (mesi) su animali hanno mostrato effetti a concentrazioni anche inferiori a  $1880$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Studi epidemiologici su bambini fino a 2 anni e su adulti esposti in abitazioni con uso di gas per cucinare non hanno evidenziato effetti, mentre per i bambini dai 2 ai 12 anni si è notato un incremento del rischio di effetti a carico dell'apparato respiratorio per esposizioni medie settimanali comprese tra 15 a  $128$   $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Rimane una incertezza se tali effetti, stimati sulla base di medie settimanali, siano

attribuibili a esposizioni prolungate piuttosto che a picchi di esposizioni a breve periodo, avvenute durante la settimana. Infine, l'esposizione a  $\text{NO}_2$  aumenta la suscettibilità verso allergeni, batteri e virus.

L'OMS ha fissato alcuni valori guida per l'esposizione all' $\text{NO}_2$ : 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media di un'ora e 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media in un anno. Il D.M. 02/04/02 n. 60 ha fissato due valori limite: il primo, 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media oraria da non superare più di 8 volte l'anno il secondo, 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media annuale. Entrambe entreranno in vigore gradualmente entro il 1/1/2010.

Come per la riduzione dei livelli di monossido di carbonio, anche in questo caso è utile mantenere in perfetta efficienza, tramite ispezioni annuali e qualificate, le apparecchiature di combustione, sia di riscaldamento sia di cottura, con particolare riguardo ai sistemi di allontanamento dei gas prodotti. L'efficienza del solo bruciatore non riduce infatti la formazione degli ossidi di azoto, resa comunque possibile dalle alte temperature. È utile anche ventilare i locali delle caldaie, accendere regolarmente la cappa di aspirazione durante la cottura dei cibi ed eliminare il fumo di sigaretta (fonte anche di monossido di azoto).

## Ossidi di zolfo

Il biossido di zolfo (anidride solforosa) è un gas incolore con un odore pungente ed irritante avvertibile a partire da concentrazioni di circa 1-3 mg/m<sup>3</sup>. In concomitanza col biossido di zolfo è importante anche la presenza di "aerosols acidi" prodotti dalla ossidazione degli ossidi di zolfo, ad esempio acido solforico che si forma dalla reazione di triossido di zolfo (anidride solforica) con l'acqua presente in atmosfera.

Anche se la principale sorgente di composti dello zolfo in aria è di tipo naturale (eruzioni vulcaniche, attività batteriche), una parte delle emissioni è prodotta dall'attività dell'uomo e, in particolare, queste avvengono in zone delimitate quali ambienti urbani e industriali, causando concentrazioni particolarmente elevate. Lo zolfo è infatti presente in quasi tutti i combustibili e viene emesso in aria a seguito di processi di combustione.

Negli ambienti indoor, in assenza di sorgenti interne, la presenza degli ossidi di zolfo in genere è dovuta all'ingresso dell'aria outdoor. Per l'SO<sub>2</sub> si registra un fenomeno di rapida riduzione della concentrazione, dovuta alla deposizione su superfici interne, abiti, tappeti, tende e altri arredi, e alla neutralizzazione con l'ammoniaca particolarmente presente in ambienti indoor per la presenza dall'uomo e di animali. Per questo motivo la concentrazione indoor è generalmente inferiore di quella outdoor (medie annuali 5-400 microg/m<sup>3</sup>) con percentuali che variano dal 10% al 60% (le percentuali minori si registrano quando la concentrazione outdoor è maggiore e per le abitazioni rispetto agli uffici).

Anche in questo caso, come per gli altri prodotti di combustione, la concentrazione indoor dipende dalla presenza di sorgenti interne, che sono legate all'utilizzo di stufe, forni, impianti di riscaldamento. Tipicamente, i livelli di SO<sub>2</sub> indoor sono di alcune decine di microg/m<sup>3</sup>, e generalmente non superano i 200 microg/m<sup>3</sup>.

L'ingresso nel corpo umano dell'SO<sub>2</sub> avviene principalmente per inalazione. Data la solubilità in acqua si ha un rapido assorbimento nel naso e solo una parte minore raggiunge il tratto respiratorio, ove passa nel sangue. I principali effetti sono comunque a carico dell'apparato respiratorio e le concentrazioni a cui si notano sono dipendenti dalla sensibilità del soggetto esposto.

Il fastidioso odore si avverte a partire da concentrazioni di alcune migliaia di microg/m<sup>3</sup> e la sua assenza non è sufficiente a garantire l'assenza di effetti, che sono possibili anche a concentrazioni inferiori, non avvertibili dall'olfatto. In seguito a esposizioni brevi ed acute (ad esempio 1000 microg/m<sup>3</sup> per

10 minuti o 250 microg/m<sup>3</sup> per un giorno) si possono conseguire irritazione delle mucose nasali, bronchiti e malattie polmonari, in particolare per individui fumatori e in individui particolarmente sensibili (asmatici). Durante periodi particolarmente sfavorevoli con un'elevata concentrazione outdoor di SO<sub>2</sub> (ma anche di smog e di particolato sospeso) è stato riscontrato, in diversi studi, un eccesso di mortalità e di sintomi dell'apparato respiratorio, in particolare tra gli individui più anziani e i malati cronici (UK Ministry of Health 1954, Buechley, 1973). Prolungate esposizioni a valori più bassi (>100 microg/m<sup>3</sup> come media in un anno) possono dare effetti sull'apparato respiratorio, in particolare per i bambini.

Oltre all'esposizione a SO<sub>2</sub> merita di essere menzionata quella agli aerosol acidi, essenzialmente acido solforico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), sempre a carico dell'apparato respiratorio che possono avvenire a partire da esposizioni brevi (10-120 min) a concentrazioni di 100-1000 microg/m<sup>3</sup>. Le concentrazioni indoor raramente raggiungono simili valori in quanto l'acido è rapidamente neutralizzato dall'ammoniaca, particolarmente presente in ambienti indoor.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha fissato delle linee guida per l'esposizione all'SO<sub>2</sub>: 100-150 microg/m<sup>3</sup> come valore medio per esposizioni di 24 ore e 40-60 microg/m<sup>3</sup> come valore medio esteso a tutto l'anno. Nel D.M. 02/04/02 n. 60 è stato fissato un valore limite di 350 microg/m<sup>3</sup> come media oraria da non superare più di 24 volte l'anno: entrata in vigore 1 gennaio 2005.

Nel corso degli ultimi decenni le concentrazioni outdoor di SO<sub>2</sub> sono andate riducendosi (e quindi anche le concentrazioni indoor) per via della maggiore attenzione verso le problematiche ambientali, ad esempio attraverso la graduale sostituzione di impianti domestici con impianti più grandi che disperdono gli ossidi in modo più ampio. Particolare attenzione deve essere posta nel caso di utilizzo di combustibili negli ambienti confinati avendo cura di provvedere ad un'adeguata ventilazione degli ambienti ed ad un'efficiente evacuazione dei fumi.



## Ozono

L'ozono ( $O_3$ ) è un gas con forti proprietà ossidanti. Viene prodotto per via fotochimica negli strati alti dell'atmosfera (stratosfera, a 15-60 km di altezza). Lo strato di ozono che si forma ha un effetto protettivo dai raggi ultravioletti del sole.

A livello del suolo non ci sono significative emissioni di origine antropogenica, tuttavia l'ozono è un prodotto indiretto dell'inquinamento in genere. In determinate condizioni atmosferiche, (forti insolazioni, scarsa ventilazione), che si riscontrano, in particolare, nei periodi estivi, e in presenza di particolari inquinanti (ossidi di azoto, o composti organici volatili), sono favorite le condizioni di formazione dell'ozono. Per questo motivo è considerato un inquinante secondario. Infine, l'ozono tende a ricombinarsi con l'NO e a decomporre in ossigeno per effetto della luce a lunghezze d'onda superiori a 240-300 nm.

Tipiche concentrazioni outdoor sono generalmente al di sotto di 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  con picchi minimi durante le prime ore del mattino e massimi durante il pomeriggio. In assenza di specifiche sorgenti, i fattori che tendono a ridurre la concentrazione di ozono negli ambienti confinati sono predominanti per cui, generalmente, nelle normali condizioni di ventilazione degli edifici, la principale sorgente di ozono indoor resta l'aria esterna, con valori che sono circa il 10-25% di quelli outdoor.

Negli ambienti indoor fonti di ozono possono derivare dall'uso di depuratori di aria, di lampade ultraviolette, di fotocopiatrici o stampanti laser.

Come ossidante l'ozono reagisce con la quasi totalità delle sostanze biologiche. In particolare, gli occhi e le vie aeree sono soggette all'azione dell'ozono, provocando irritazione al naso, alla gola e al torace con sintomi quali tosse e mal di testa. Tali effetti si manifestano per esposizioni brevi (1 ora) a partire da concentrazioni di 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Gli effetti sono maggiormente evidenti nei bambini, negli anziani e in soggetti allergici o sofferenti di asma. L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha emanato delle linee guida per l'ozono: 150-200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media per esposizioni di 1 ora e 100-120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media per esposizioni di 8 ore. La direttiva della Commissione Europea 2000/69/CE ha fissato un valore che viene definito "bersaglio" da raggiungere entro il 2010: 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  come media giornaliera su 8 ore da non superare più di 25 volte in un anno come media per tre anni.

Possibili contromisure in ambienti indoor non sono facilmente individuabili se non in un maggior controllo dell'inquinamento in genere e in un più razionale utilizzo delle apparecchiature responsabili della produzione di ozono.

### Particolato atmosferico (polveri PM<sub>2,5</sub> - PM<sub>10</sub>)

Con il termine particolato atmosferico si intende una complessa miscela di sostanze organiche e inorganiche presenti in aria. Possono essere individuate due classi principali di particolato atmosferico suddivise sia per dimensioni, sia per composizione, sia per comportamento:

- particolato grossolano, costituito da particelle con diametro aerodinamico superiore a 2,5 microm, costituite principalmente da particelle provenienti dalla erosione/disgregazione della crosta terrestre e da polvere prodotta sulle strade e dalle industrie; tali materiali sono in genere trattenuti dalla parte superiore dell'apparato respiratorio (naso, laringe). Anche pollini e spore fanno parte di questa classe
- particolato fine, costituito da particelle con diametro aerodinamico inferiore a 2,5 microm, costituite principalmente da prodotti di combustione, aerosol gas addensati o convertiti in particelle, vapori organici o di metalli ricondensati; queste particelle raggiungono il tratto respiratorio inferiore (trachea polmoni). Viene indicato con la sigla PM<sub>2,5</sub> ed è definito anche come particolato "inalabile".[G2][RTF annotation: diametro di una sfera di densità pari a 1 g/cm<sup>3</sup> con la stessa velocità terminale dovuta alla forza gravitazionale in aria "calm" della particella in esame alle prevalenti condizioni di umidità, temperatura e pressione.]

Nell'ambito del particolato grossolano viene fatta un'ulteriore classificazione in relazione a quella frazione definita "respirabile" con diametro aerodinamico inferiore a 10 microm e indicata con PM<sub>10</sub>.

In ambiente esterno le principali sorgenti sono sia di origine naturale (suolo, sospensioni marine, emissioni vulcaniche, spore) per le quali si riscontra una maggiore frazione di particelle grossolane, sia di origine antropica (motori a combustione, impianti industriali, impianti per riscaldamento civili), per le quali si riscontra una maggiore frazione di particelle fini.

Mentre in aria esterna la relazione tra composizione chimica e dimensione del particolato è stata relativamente ben identificata, in ambiente indoor è meno evidente. In altre parole, la composizione del particolato indoor non rispecchia quella dell'aria outdoor.

Le principali sorgenti di particolato negli ambienti indoor sono tutti gli apparati di combustione e il fumo di tabacco. Altre sorgenti secondarie sono: gli spray, i fumi degli alimenti cucinati, batteri e spore, pollini, secre-

zioni essiccate di animali domestici (saliva, feci, urina). Particelle più grossolane provengono essenzialmente dall'esterno (polveri, frammenti biologici, muffe) attraverso il trasporto umano, la deposizione e il successivo risollevaramento.

Il rapporto tra le concentrazioni indoor/outdoor è circa 1 per il particolato fine (inalabile) e per quello respirabile (PM<sub>2,5</sub> - PM<sub>10</sub>) in assenza di fumatori. Nei casi in cui vi è una maggiore presenza di particolato grossolano tale rapporto risulta inferiore per effetto della "schermatura" dell'edificio. In presenza di fumatori (circa il 33-66% delle case in Europa ha almeno un fumatore) tale rapporto può arrivare a 2-3. È da sottolineare che, negli ultimi anni, mentre si è riscontrato un aumento di attenzione sull'inquinamento outdoor con alcuni effetti positivi sulla qualità dell'aria, si è molto probabilmente avuto un peggioramento della qualità dell'aria negli ambienti confinati.

Come accennato, la composizione del particolato indoor è differente rispetto a quella outdoor e fortemente condizionata dalla presenza di fumo di tabacco, che di per sé, oltre a produrre grandi quantità di particolato fine che rimane in sospensione per parecchie ore, presenta molte sostanze che si depositano sul particolato stesso, cambiandone le caratteristiche in relazione agli effetti sanitari.

Particolare importanza assume il particolato atmosferico come agente di trasporto di altri inquinanti, tra i quali particolare importanza hanno gli idrocarburi policiclici aromatici (qui di seguito trattati).

La maggior parte degli studi sugli effetti sanitari, e i conseguenti provvedimenti, tengono conto, principalmente, della quantità totale del particolato e della loro distribuzione senza considerare la composizione chimica: sono stati registrati aumenti della mortalità e della ospedalizzazione in relazione alle quantità di particolato presente in aria.

Sulla base di questi riscontri, L'OMS aveva stabilito nel 1987 una linea guida per l'esposizione al particolato fissando un valore di riferimento, da misurarsi col metodo della riflettanza, pari a 125 microg/m<sup>3</sup> come media sulle 24 ore e pari a 50 microg/m<sup>3</sup> come media sull'intero anno (WHO, 1987).

Recenti studi evidenziano che il parametro PM<sub>10</sub> attualmente adottato per la definizione di linee guida o di livelli di riferimento sarebbe meno rilevante rispetto al PM<sub>2,5</sub>, ma molto importante sarebbe la composizione del particolato. Ad esempio, i solfati e le particelle acide sarebbero indicatori ancora migliori del PM<sub>2,5</sub>.

Per questo motivo, e per la sempre più evidente mancanza di una soglia per il manifestarsi di effetti sanitari, l'Organizzazione Mondiale della Sanità ha recentemente rivisto la propria posizione, ritenendo non opportuno dare una specifica indicazione in termini di PM<sub>10</sub>.

Sono pertanto forniti gli strumenti in termini di valutazione del rischio al fine di rendere maggiormente consapevoli i decisori (WHO, 2000).

L'estensione delle linee guida derivate da considerazioni sugli effetti sanitari, basate su esposizioni tipiche outdoor devono in questo particolare caso essere prese con molta attenzione.

Il D.M. n. 60 del 02/04/02 ha stabilito diversi valori limite per il PM10 da raggiungere gradatamente entro il 1 gennaio 2010: 50 microg/m<sup>3</sup> come media delle 24 ore da non superare più di 7 volte l'anno e 20 microg/m<sup>3</sup> come media annuale.

Eventuali contromisure, tra le quali molto importante è la totale eliminazione del fumo da sigaretta, sono l'aspirazione verso l'esterno dei fumi di qualsiasi combustione, l'ispezione e la corretta manutenzione degli impianti di riscaldamento e di condizionamento compresa la periodica sostituzione dei filtri, la riduzione dell'ingresso di particolato outdoor.

## Pesticidi

I pesticidi sono una classe di composti utilizzati per l'eliminazione di animali, funghi, batteri o virus. Il numero di pesticidi sul mercato è elevatissimo. Circa il 95% dei pesticidi è utilizzato in agricoltura, tuttavia una delle maggiori vie di esposizione è l'ambiente indoor. Mentre l'utilizzo in agricoltura è strettamente regolato, negli ambienti indoor non vi è nessun tipo di regolamentazione. Pesticidi vengono utilizzati su molti prodotti di uso domestico, ad esempio per preservare il legno, o per la protezione delle piante da appartamento (contenenti mercurio[G3]). Molti di questi hanno un lungo tempo di permanenza dopo la loro diffusione: sono state misurate concentrazioni indoor considerevoli di idrocarburi clorinati anche dopo svariati anni dalla loro applicazione, alcuni dei quali sono stati riconosciuti come probabili cancerogeni.

I pesticidi sono prodotti tossici per definizione. La loro pericolosità è notevolmente amplificata dal non corretto utilizzo dei prodotti. I pesticidi attualmente sul mercato includono una grande varietà di prodotti, che differiscono oltre che per il principio attivo, per tipo di azione, per assorbimento nell'organismo, per meccanismo di trasformazione biologica e per modo di rilascio. Per questo motivo gli effetti sanitari sono molto diversi. Si può tuttavia affermare che la maggiore rilevanza dal punto di vista sanitario è legata alla loro cancerogenicità. Molti sono stati classificati come possibili o probabili cancerogeni.

Da non sottovalutare la incidenza di numerosi casi di avvelenamento. Tra il 1980 e il 1985 circa il 46,5 % dei decessi per avvelenamento accidentale da pesticidi è avvenuto in casa. Nel 1987 sono stati riportati in USA 57.430 casi di esposizioni a pesticidi, di cui il 98% accidentale). Di circa 400 casi di avvelenamento registrati dal Centro Anti Veleni di Milano (CAV) il 16% erano dovuti a esposizioni occupazionali, il 18% a tentati suicidi e il 65% a avvelenamenti accidentali.

Possibili contromisure sono: corretto utilizzo dei pesticidi seguendo accuratamente le istruzioni dei produttori; applicazione delle giuste quantità (vi è la tendenza ad eccedere per migliorare l'efficacia del prodotto); incremento della ventilazione a seguito dell'utilizzo indoor; applicazione dei prodotti su piante e animali all'esterno, mai all'interno; utilizzo di sistemi alternativi ove possibile; rivolgersi a disinfestatori professionali; non conservare le confezioni in ambienti indoor e soprattutto disporli in modo da evitare esposizioni accidentali (specie per i bambini); conservare indumenti utilizzati durante l'uso dei pesticidi in ambienti esterni.

## Piombo

Il piombo è un elemento chimico presente in quantità relativamente abbondanti in natura. Il "Secretary of the Department of Health and Human Services" (Dipartimento della Salute e dei Servizi Umani) degli Stati Uniti lo ha definito come la principale causa di danno di origine ambientale per la salute dei bambini.

Le maggiori emissioni naturali provengono da eruzioni vulcaniche, incendi, decomposizione chimica della crosta terrestre e, in misura minore, dal decadimento del radon. Sorgenti legate all'attività dell'uomo sono le emissioni da veicoli e da industrie, incluse quelle per la produzione di energia. In ambienti indoor la presenza di piombo in aria è legata, oltre che all'ingresso di aria outdoor, alla presenza di vernici e di fumo da sigaretta.

Non solo l'aria è una fonte di esposizione (per inalazione), ma anche cibo e acqua. La presenza di piombo in aria aumenta la concentrazione di piombo nel sangue sia in modo diretto che indiretto attraverso altre vie di ingresso (cibo etc.).

In assenza di specifiche sorgenti interne, tipo vernici a base di piombo o presenza di fumatori, la concentrazione di piombo in aria indoor è strettamente correlata alla concentrazione outdoor, ed è quantificabile in una frazione di quest'ultima, valutata in circa il 60% (Diemel et al., 1981). Tipiche concentrazioni in aria indoor variano da 0,01 a 2 microg/m<sup>3</sup>.

La presenza di piombo nel sangue è un ottimo indicatore dell'esposizione dell'individuo. L'agenzia per la protezione dell'Ambiente americana (US EPA) suggerisce di effettuare, sui bambini, analisi sulla concentrazione di piombo nel sangue per valutarne l'esposizione al fine di prendere provvedimenti correttivi.

Approssimativamente una concentrazione di 1 microg/m<sup>3</sup> contribuisce ad una concentrazione di piombo nel sangue di circa 16 microg/l per gli adulti e di circa 19 microg/l per i bambini. Se si considerano anche i contributi indiretti (aumento di piombo in cibo, etc.) tale valore sale a 50 microg/l.

La presenza di piombo nel sangue ha effetti su praticamente tutti i sistemi del corpo umano. Ad elevate concentrazioni può causare convulsioni, coma e perfino la morte. A concentrazioni inferiori può danneggiare il cervello, il sistema nervoso centrale, reni e cellule del sangue. Sono stati riscontrati effetti a partire da concentrazioni di piombo nel sangue di 100-150 microg/l. I bambini, in quanto soggetti in crescita, subiscono effetti più rilevanti che riguardano ritardi nello sviluppo fisico e mentale. Per que-

sto motivo, linee guida che proteggono i bambini sono ritenute valide anche per gli adulti.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità ha proposto un valore guida corrispondente ad una media annuale di 0,5 microg/m<sup>3</sup> (WHO, 2000).

Possibili modi per la riduzione dell'esposizione al piombo sono:

- eliminare il più possibile la polvere nei luoghi in cui siano presenti i bambini, lavare i loro giocattoli, curare l'igiene prima di mangiare;
- non tentare di modificare le superfici verniciate con pitture a base di piombo se sono in buone condizioni; evitare di tentare di rimuovere le pitture con mezzi inappropriati (carte vetrate, bruciatori) per evitare la volatilizzazione di polveri; se necessario, richiedere l'assistenza di specialisti per analizzare ed eventualmente rimuovere le vernici;
- evitare di introdurre in casa polveri che possano essere particolarmente ricche di piombo (ad esempio se si lavora in particolari ambienti avere cura di cambiare gli indumenti);
- analizzare l'acqua per l'eventuale presenza di piombo (molte tubature sono state realizzate con materiali contenente piombo);
- evitare la conservazione degli alimenti, specie le bevande, in contenitori di cristallo o di porcellana che contengono piombo;
- una alimentazione con corretto apporto di ferro e calcio riduce l'assorbimento di piombo.

## Radon

Il radon è un gas, inodore, incolore e insapore, e non produce alcun effetto avvertibile dai sensi anche ad elevate concentrazioni. Proviene dal decadimento del radio-226 presente ovunque, in concentrazioni variabili, nella crosta terrestre. Nonostante sia un gas nobile, quindi chimicamente inerte ed elettricamente neutro, tuttavia è un elemento radioattivo, e decade, emettendo radiazioni, trasformandosi in altri elementi radioattivi che a loro volta emettono ancora radiazioni. In particolare, due dei suoi prodotti di decadimento, il Po-218 e il Po-214 emettono radiazioni di tipo alfa. Questi elementi sono solidi e in aria, in parte rimangono liberi (frazione "non attaccata"), in parte si fissano al particolato (frazione "attaccata"), e in parte si depositano sulle pareti e sulle superfici presenti all'interno degli edifici (effetto "plate out"). I prodotti di decadimento, possono, quindi essere inalati e si fissano sul tessuto polmonare continuando ad emettere radiazioni. L'interazione delle radiazioni con il nucleo delle cellule è in grado di danneggiare il DNA dando origine, in alcuni casi, ad un processo cancerogeno. Nell'atmosfera si disperde rapidamente senza quasi mai raggiungere concentrazioni ritenute pericolose (tipicamente, ha una concentrazione di attività di 5-15 Bq/ m<sup>3</sup>). Tuttavia se viene emesso all'interno degli edifici (o in luoghi con poca aerazione) il ridotto ricambio di aria fa sì che si concentri fino a valori che aumentano di molto il rischio di effetti sanitari. La presenza di un edificio, inoltre, ha l'effetto di generare le condizioni per "aspirare" il radon presente nel suolo sottostante. Il radon passa attraverso le fessure dei solai, le giunzioni parete-pavimento, i passaggi dei servizi (elettrici, idraulici, di scarico, ecc.).

La concentrazione del radon dipende da molti fattori: contenuto di radio nel suolo sottostante l'edificio, permeabilità del suolo, presenza di faglie e falde acquifere, clima, variazioni atmosferiche (temperatura, vento, piogge), tipo di costruzione, impiego dell'edificio, e perfino abitudini di vita. Di conseguenza, la concentrazione di radon negli edifici è molto variabile, sia in termini temporali (variazioni giorno/notte, variazioni con cicli meteorologici, e variazioni stagionali) sia in termini spaziali: due edifici simili costruiti in vicinanza possono avere una concentrazione di radon molto differente.

Questa particolarità fa sì che, per le valutazioni del rischio associato, siano necessarie misure che possano stimare la concentrazione media annuale. Misure effettuate su brevi periodi (inferiori al mese) corrono il rischio, senza opportune correzioni, di sottostimare o di sovrastimare la concentrazione media annuale. Esistono da decenni tecnologie di misura che sono in grado



di effettuare, a bassi costi, misure integrate, ossia misure per periodi lunghi. Il principale effetto sanitario causato dal radon e dai suoi prodotti di decadimento (da ora in poi, ove non specificato con il termine radon s'intenderà radon e i suoi prodotti di decadimento) è il tumore polmonare, prodotto dalle interazioni delle radiazioni alfa con i nuclei delle cellule dell'apparato respiratorio.

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha valutato la cancerogenicità del radon nel 1988 e lo ha inserito nel gruppo 1, in cui, attualmente, sono classificate le 87 sostanze, miscele o condizioni di esposizione che sono state riconosciute come cancerogene per gli esseri umani (IARC, 1988).

Le evidenze sulla cancerogenicità del radon derivano da studi molecolari, cellulari, sugli animali e soprattutto da studi epidemiologici. Il meccanismo d'induzione del tumore da parte delle radiazioni è un processo complesso, non ancora noto, che avviene in più stadi, che possono essere influenzati, ognuno, da altri fattori.

Per quantificare il rischio sanitario per la popolazione associato all'esposizione al radon e ai suoi prodotti di decadimento, la tendenza attuale è quella di basarsi principalmente sugli studi epidemiologici sui minatori. Diversi modelli di calcolo per la valutazione dell'aumento di rischio di tumore polmonare, sono stati sviluppati e discussi negli ultimi decenni (ICRP 1986, BEIR IV 1990, ICRP 1993, BEIR VI 1998). Va comunque detto che l'ipotesi di base fatta in questi modelli è la poco giustificata linearità senza soglia tra il rischio di tumore polmonare e l'esposizione al radon.

Tra i vari fattori che entrano in gioco nel meccanismo di formazione del tumore è senz'altro da porre l'accento sul fumo. La combinazione tra fumo e radon ha un effetto sinergico, più che sommatorio.

In tabella 1 è riportata una stima, effettuata dal National Research Council Americano, sul numero di tumori polmonari attribuibili al radon sulla base dei dati disponibili per l'anno 1993 (BEIR VI 1998) negli Stati Uniti, ove la stima della concentrazione media di radon nelle abitazioni è di circa 50 Bq/m<sup>3</sup>.

Dai dati riportati in tabella 1 si può notare che la grande maggioranza dei casi di tumore polmonare occorrerebbe tra i fumatori e le fumatrici. Considerando, poi, che in Usa vi sono circa 48 milioni di fumatori su 260 milioni di abitanti, si nota che il rischio per i fumatori è molto superiore che per i non fumatori. Questo fa sì che anche ai fini di una strategia volta alla riduzione del rischio sanitario dovuto al radon, uno dei sistemi è quello di ridurre o meglio ancora di eliminare il fumo da tabacco.

Deve essere sottolineato che le stime effettuate sono affette da una notevole

**Tabella 1 - Stima del numero di tumori polmonari attribuibili al radon nelle abitazioni per l'anno 1993 in USA (BEIR VI, 1998)**

| Popolazione   | No. di tumori polmonari<br>(tutte le cause) | Numero di tumori polmonari<br>attribuibili all'esposizione al radon<br>e ai suoi prodotti di decadimento |                                      |
|---------------|---|--|--------------------------------------|
|               |   | Modello<br>esposizione-età<br>concentrazione   | Modello<br>esposizione-età<br>durata |
|               | Uomini (a)                                  |  |                                      |
| Fumatori      | 90.600                                      | 11.300   | 7.900                                |
| Non-fumatori  | 4.800                                       | 1.200  | 900                                  |
| Totale        | 95.400                                      | 12.500   | 8.800                                |
|               | Donne (a)                                   |  |                                      |
| Fumatrici     | 55.800                                      | 7.600  | 5.400                                |
| Non-fumatrici | 6.200                                       | 1.700  | 1.200                                |
| Totale        | 62.000                                      | 9.300  | 6.600                                |
|               | Uomini e donne                              |  |                                      |
| Fumatori      | 146.400                                     | 18.900   | 13.300                               |
| Non-fumatori  | 11.000                                      | 2.900  | 2.100                                |
| Totale        | 157.400                                     | 21.800   | 15.400                               |

*a - Assumendo che il 95% di tutti i tumori polmonari negli uomini siano tra i fumatori, e che il 90 % di tutti i tumori polmonari tra le donne siano tra le fumatrici.*

incertezza. Ad esempio l'EPA afferma che il numero di 15.000 casi per anno di tumori polmonari, è la migliore stima, ma il valore può variare da 7.000 a 30.000. Vi è, comunque, un consenso generale sul fatto che l'esposizione al radon potrebbe rappresentare dopo il fumo diretto, la seconda causa di morte per tumore polmonare.

L'Unione Europea ha affrontato il problema del radon nelle abitazioni emanando la raccomandazione del 21/2/1990 in cui è indicato un livello di azione (400 Bq/ m<sup>3</sup>), superato il quale "si adotteranno provvedimenti semplici ma efficaci volti a ridurre il livello di radon" (Commissione Europea 1990). Nel provvedimento, particolare attenzione è rivolta all'informazione al pubblico; viene infatti raccomandato che "laddove siano ritenuti necessari provvedimenti correttivi, la popolazione interessata sia informata sui livelli di radon ai quali è esposta e sui provvedimenti adottabili per ridurre tali livelli". L'esposizione al radon è stata presa in considerazione nel Piano Sanitario Nazionale 1998-2000. Nel documento è riportata una stima sull'incidenza dei tumori polmonari attribuibili al radon: il 5-20 % di tutti i tumori polmonari (Ministero della salute 1998). Annualmente in Italia vi sono circa 36.000 casi

di tumore polmonare; ciò significa che il radon potrebbe essere ritenuto responsabile di circa 1800–7200 casi ogni anno.

Riguardo ad altri effetti sanitari, i risultati di alcuni studi ecologici hanno indicato un possibile effetto del radon per alcuni tipi di leucemie e tumori (BEIR VI, 1998). L'analisi aggregata degli studi sui lavoratori di 11 miniere non mostra evidenze di altri tipi di tumori diversi da quello polmonare. Pur se con le dovute cautele la tendenza attuale è quella di affermare che i risultati delle valutazioni sui minatori (assenza di altri tipi di tumori) possono essere estesi alla popolazione; in altre parole non vi sarebbero altri effetti riscontrabili alle basse esposizioni (abitazioni) che non sarebbero visibili anche alle alte esposizioni (miniere).

In Italia, è stata effettuata una Indagine Nazionale sulla Radioattività Naturale nelle Abitazioni (Bochicchio et al., 1994; Bochicchio et al., 1999). L'indagine nazionale ha preso in considerazione un campione rappresentativo di circa 5000 abitazioni, nelle quali sono state effettuate misure di radon per un intero anno (v. rif. 12) suddivise per due semestri. In fig. 1 è riportata la mappa della concentrazione media di radon nelle regioni italiane. In tabella 2 sono riportati i principali risultati dell'indagine.

La concentrazione media annuale nazionale è risultata  $70 \text{ Bq/m}^3$ . Il valore di  $70 \text{ Bq/m}^3$  può essere considerato un valore medio-alto in confronto con i valori di altri Paesi e con la media mondiale, stimata di circa  $40 \text{ Bq/m}^3$ . È da notare la situazione molto diversificata tra le regioni. Nell'ambito delle regioni si sono riscontrate aree con concentrazioni annuali anche notevolmente superiori alla media regionale.

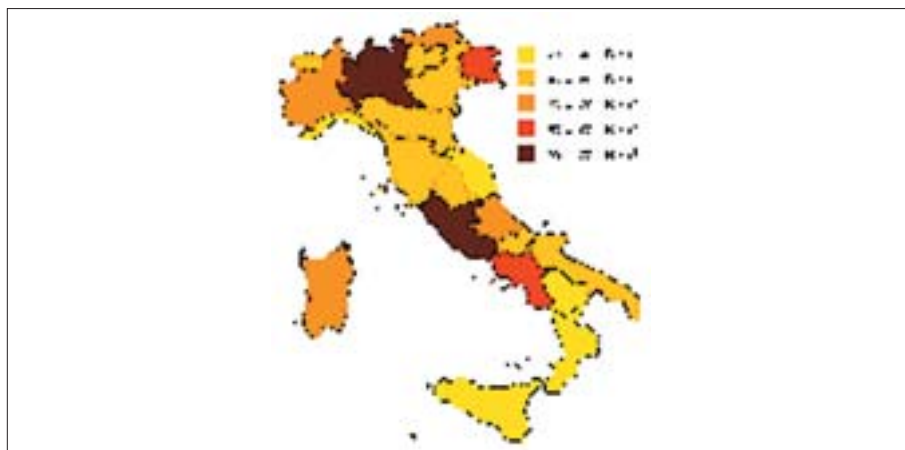


Figura 1: Valori delle concentrazioni medie regionali di radon in Italia

In tabella 2 sono riportate le principali informazioni dell'indagine nazionale.

|  |       |
|--|-------|
| No. di abitazioni                            | 5361  |
| No. di città                                 | 232   |
| Max (Bq/m <sup>3</sup> )                     | 1036  |
| Media aritmetica (Bq/m <sup>3</sup> )        | 70    |
| Scarto tipo della media (Bq/m <sup>3</sup> ) | 1     |
| Media geometrica (Bq/m <sup>3</sup> )        | 52    |
| Scarto tipo della media geometrica           | 2.1   |
| Abitazioni > 150 Bq/m <sup>3</sup>           | 7.9 % |
| Abitazioni > 200 Bq/m <sup>3</sup>           | 4.1 % |
| Abitazioni > 400 Bq/m <sup>3</sup>           | 0.9 % |
| Abitazioni > 600 Bq/m <sup>3</sup>           | 0.2 % |

In tabella 3 sono riportati i dati disaggregati per regione.

**Tabella 3: Risultati della concentrazione media annuale di radon nelle regioni italiane.**

| Regione               | Rn Conc.<br>(Bq/ m <sup>3</sup> )<br>AM ± SE | Abitazioni<br>> 200 Bq/ m <sup>3</sup> |        | Abitazioni<br>> 400 Bq/ m <sup>3</sup> |       |
|-----------------------|--|--|--------|--|-------|
|                       |  | N                                      | %      | N                                      | %     |
| Piemonte              | 69 ± 3                                       | 9                                      | 2.1 %  | 3                                      | 0.7 % |
| Valle d'Aosta         | 44 ± 4                                       | 0                                      | 0.0 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Lombardia             | 111 ± 3                                      | 70                                     | 8.4 %  | 18                                     | 2.2 % |
| Alto Adige Province   | 70 ± 8                                       | 1                                      | 1.3 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Veneto                | 58 ± 2                                       | 7                                      | 1.9 %  | 1                                      | 0.3 % |
| Friuli-Venezia Giulia | 99 ± 8                                       | 22                                     | 9.6 %  | 11                                     | 4.8 % |
| Liguria               | 38 ± 2                                       | 1                                      | 0.5 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Emilia-Romagna        | 44 ± 1                                       | 3                                      | 0.8 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Toscana               | 48 ± 2                                       | 4                                      | 1.2 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Umbria                | 58 ± 5                                       | 1                                      | 1.4 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Marche                | 29 ± 2                                       | 1                                      | 0.4 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Lazio                 | 119 ± 6                                      | 37                                     | 12.2 % | 10                                     | 3.4 % |
| Abruzzo               | 60 ± 6                                       | 5                                      | 4.9 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Molise                | 43 ± 6                                       | 0                                      | 0.0 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Campania              | 95 ± 3                                       | 42                                     | 6.2 %  | 3                                      | 0.3 % |
| Puglia                | 52 ± 2                                       | 5                                      | 1.6 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Basilicata            | 30 ± 2                                       | 0                                      | 0.0 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Calabria              | 25 ± 2                                       | 1                                      | 0.6 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Sicilia               | 35 ± 1                                       | 0                                      | 0.0 %  | 0                                      | 0.0 % |
| Sardegna              | 64 ± 4                                       | 3                                      | 2.4 %  | 0                                      | 0.0 % |

AM = Media aritmetica; SE = Standard Error

Le percentuali di abitazioni che, a livello nazionale superano i valori di 200, 400 e 600 Bq/m<sup>3</sup> sono rispettivamente del 4,1%, 0,9% e 0,2% su un totale di circa 20 milioni di abitazioni. Nelle normali condizioni il contributo principale alla concentrazione di radon è dato dal suolo, seguito dai materiali da costruzione. In tab. 4 sono riportati i principali contributi alla concentrazione di radon indoor.

Nei casi in cui le concentrazioni sono molto alte (>400 Bq/m<sup>3</sup>) è il suolo, generalmente, la principale fonte di ingresso. Il radon penetra all'interno degli edifici per effetto della minore pressione che si riscontra rispetto all'esterno. La depressione, prodotta principalmente dalla differenza di tempera-

tura tra interno ed esterno, e dal vento che colpisce l'edificio, è in grado di aspirare il radon dal sottosuolo che passa attraverso le microscopiche fessure delle superfici di contatto con il suolo. Tanto maggiore è la differenza di temperatura e la forza e costanza dei venti, tanto maggiore è generalmente l'ingresso e la conseguente concentrazione di radon. Per questo motivo d'inverno e di notte si registrano le concentrazioni maggiori.

**Tabella 4 - Stima dei contributi alla concentrazione media di radon indoors ( $Bq/m^3$ ) e confronto con la concentrazione media osservata**

| Sorgente                 | Monofamiliari | Appartamenti |
|--------------------------|---------------|--------------|
| Suolo                    | 55            | >0           |
| Materiali da costruzione | 2             | 4            |
| Esterno                  | 10            | 10           |
| Acqua                    | 0,4           | 0,4          |
| Conc. media osservata    | 55            | 12           |

Per quanto riguarda la normativa si deve distinguere tra ambienti di lavoro e ambienti domestici.

Per gli ambienti di lavoro (incluse le scuole), è stato pubblicato il 31 agosto 2000 il Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241 (G.U., 2000), di attuazione della direttiva 96/29/EURATOM (Commissione Europea 1996), in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti.

Nel decreto sono indicati gli adempimenti dei datori di lavoro (controlli, misure, eventuali azioni di risanamento, etc.) nei confronti del problema del radon. È stabilito, tra vari altri provvedimenti, un livello di azione di 500  $Bq/m^3$ , superato il quale devono essere adottati provvedimenti volti a ridurre l'esposizione al radon. Fin da subito dovranno essere misurati tutti gli ambienti di lavoro sotterranei. Entro 5 anni, le Regioni dovranno indicare le aree in cui stabilire l'obbligo di effettuare controlli della concentrazione di radon anche negli ambienti di lavoro in superficie.

Per gli ambienti domestici non vi sono, attualmente, normative italiane. Va sottolineato che le esposizioni in ambienti domestici possono essere, in molti casi, superiori a quelle riscontrabili nei luoghi di lavoro, in virtù del maggior tempo di permanenza e per il fatto che molto di questo tempo è trascorso di notte, durante la quale, come detto, le concentrazioni sono, generalmente, superiori alla media. Molti Paesi hanno emanato delle raccomandazioni nelle quali si indicano dei livelli di azione superati i quali si raccomanda di adot-

tare provvedimenti per ridurre la concentrazione di radon (Akerblom 1999). Solo pochi Paesi hanno invece, imposto per legge dei livelli massimi di concentrazione, superati i quali vi è l'obbligo di intervenire.

Il sistema delle raccomandazioni è generalmente preferito in quanto è molto difficile imporre per legge dei livelli di azione per ambienti molto particolari quali le abitazioni, tra l'altro per un inquinante di origine naturale. In molti Paesi in cui sono state adottate le raccomandazioni, queste sono state accompagnate da campagne di informazione per la popolazione.

A livello regionale, solo la regione del Veneto ha emanato una delibera regionale riguardo l'esposizione al radon in ambienti domestici (n. 79/2002) nella quale è stato individuato un valore di riferimento di 200 Bq/m<sup>3</sup> di concentrazione di radon media annuale, oltre il quale viene raccomandato di adottare azioni di bonifica. È stata anche effettuata una prima valutazione delle aree che presentano una maggiore probabilità di superamenti del valore di riferimento e sono stati identificati i comuni che si trovano in queste aree.

In fig. 2 è riportata la mappatura della regione in termini di percentuale di edifici che superano la concentrazione di 200 Bq/m<sup>3</sup> (ARPA VENETO, 2000).

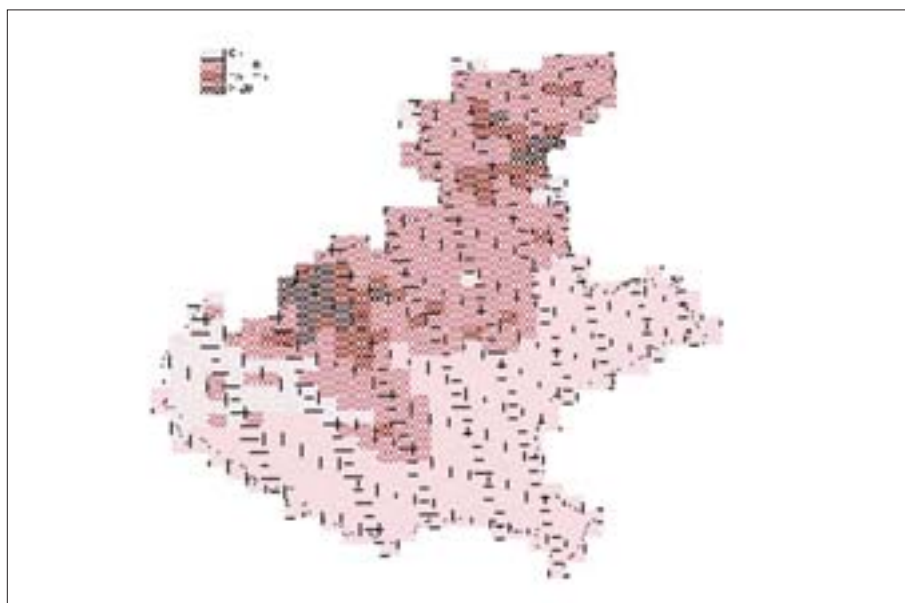


Figura 2: Frazioni di abitazioni (%) con livelli eccedenti 200 Bq/m<sup>3</sup> (dati normalizzati alla tipologia standard regionale rispetto al piano).

Si consiglia ai cittadini residenti in questi comuni di effettuare misurazioni di radon per un intero anno. Si consiglia ai cittadini residenti al di fuori di questi comuni di effettuare misurazioni qualora la loro abitazione abbia locali al piano terra o inferiore.

Sono possibili azioni di rimedio per ridurre la concentrazione di radon negli edifici. Tali azioni possono essere suddivise in tre categorie (Giangrasso et al., 1994):

- Eliminazione del radon dall'aria interna;
- Ventilazione/miscelazione con aria esterna;
- Riduzione dell'ingresso di radon.

Il parametro principale con cui si valuta l'efficacia delle azioni di rimedio è rappresentato dal Fattore di Riduzione FR, ossia dal rapporto tra la concentrazione di radon in condizioni normali (concentrazione iniziale) e a seguito o durante l'intervento (concentrazione finale). Il successo di una azione di rimedio dipende ovviamente oltre che dalla concentrazione iniziale di radon, dal livello di riferimento, ossia quel valore al di sotto del quale si vuole ridurre la concentrazione stessa. Generalmente, buone azioni di rimedio si considerano quelle con fattori di riduzione superiori ad alcune unità (4-5).

Tabella 5: Fattori di riduzione per alcune azioni di rimedio in abitazioni inglesi.

| Tipo di azione di rimedio         | N° di abitazioni | F.R.<br>Media | F.R.<br>Range |
|-----------------------------------|------------------|---------------|---------------|
| Sigillatura parziale              | 40               | 2,3           | 1 - 32        |
| Sigillatura totale                | 21               | 2,2           | 1 - 6,5       |
| Pressurizzazione                  | 70               | 3,2           | 1 - 24        |
| Ventilazione naturale del vespaio | 46               | 3,1           | 1 - 17        |
| Ventilazione forzata del vespaio  | 14               | 4,0           | 1 - 17        |
| Depressurizzazione del suolo      | 159              | 16            | 1 - 110       |

Eliminazione dall'aria interna - Questi sistemi consistono nella installazione di apparecchiature all'interno degli edifici (precipitatori elettrostatici, generatori di ioni, ventilatori e sistemi di filtrazione) che sono in grado di ridurre la concentrazione di radon e, in modo particolare, la concentrazione dei pro-



dotti di decadimento trattenendo soprattutto la frazione di questi ultimi non attaccata.

I fattori di riduzione sono relativamente bassi (qualche unità) pertanto sono di scarsa applicazione nelle abitazioni (Mueller 1988). Qualche applicazione può essere individuata nei casi di lieve superamento dei livelli di azione in particolare per gli ambienti di lavoro.

Ventilazione/miscelazione con aria esterna - La concentrazione di radon presente nell'aria esterna è in genere minore della concentrazione di radon all'interno degli edifici. Un aumento del numero di ricambi di aria, ottenuto sia con una ventilazione naturale che forzata, è in grado di ridurre la concentrazione di radon.

Riduzione dell'ingresso di radon - I metodi più adottati in pratica sono quelli che prevengono l'ingresso del radon all'interno dell'abitazione (sigillatura delle vie di ingresso, pressurizzazione dell'edificio, ventilazione del vespaio, depressurizzazione del suolo).

In tabella 5 sono riportati i FR di alcune tipiche azioni di rimedio condotte nel Regno Unito (EUR 1994). Come si può notare dalla tabella i sistemi che fanno uso di una ventilazione-aspirazione danno risultati generalmente migliori rispetto a sistemi di sigillatura.

**BIBLIOGRAFIA**

- ARPA VENETO 2000, Indagine Regionale per l'individuazione delle aree ad alto potenziale di radon nel territorio del Veneto (delibera della giunta regionale, 8 novembre 1996 n. 5000); <http://www.arpa.veneto.it/radon/default.asp>.
- Akerblom G., Radon Legislation and National Guidelines Swedish radiation Protection Institute SSI Rapport: 99:18 Juli 1999 ISSN 0282-4434.
- BEIR IV National Research Council. Committee on the Biological effects of Ionizing Radiations. Health risks of radon and other internally deposited alpha emitters: BEIR IV; Washington D.C. National Academy Press 1990.
- BEIR VI National Research Council. Committee on the Biological effects of Ionizing Radiations. Health effects of exposure to radon. BEIR VI; Washington D.C. National Academy Press, 1998.
- Bochicchio (a) F., Campos Venuti G., Nuccetelli C., Piermattei S., Risica S., Tommasino L., Torri G. Indagine Nazionale sulla Radioattività Naturale nelle Abitazioni. Istisan Congressi 34 pp. 80 (1994).
- Bochicchio (b), F., Campos Venuti G., Piermattei, S., Torri, G., Nuccetelli, C., Risica S., Tommasino L.. Results of the national survey on radon in all the 21 italian regions International Workshop Radon in the Living Environment 19-23 April 1999, Athens, Greece.
- BRE Radon sumps: a BRE guide to radon remedial measures in existing dwelling. BR 277 ISBN 0 85125 538 8. 1992.
- Buechley R.W. Riggan W.B., Hasseblad V. and Van Bruggen J.B. SO<sub>2</sub> Levels and perturbation in mortality - a study in New York / New Jersey metropolis. Arh. Environ. Health 27: 134-137, 1973.
- CCTN, 1995. Raccolta dei pareri della Commissione Consultiva Tossicologica Nazionale Mucci, N. e Camoni, I Serie relazioni 95/2 Istituto Superiore di Sanità Roma p 30-96 1995.
- Commissione Europea. Raccomandazione della Commissione Europea del 21/2/1990 sulla tutela della popolazione contro l'esposizione al radon negli ambienti chiusi. G.U. C.E. N.L. 80/26 27/3/90.
- Commissione Europea Direttiva 29/96 Euratom del 13 maggio 1996 che stabilisce le norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti GU CE N. L. 159/29 del 29/6/1996.
- Diemel JAL, Brunekreef B, Boleu JSM, Biersteker K, & Veenstra SJ (1981) The Arnhem lead study. II. Indoor pollution, and indoor/outdoor relationships. Environ Res, 25: 449-456.
- EUR. Report 16003 DE/EN/FR, Radiation protection research action 1992-94 Progress report 1992-93 pp. 1084-87 ISSN 1085-5593, 1994.

Giangrasso M., Notaro M., Torri G., Azioni di rimedio in edifici con elevata concentrazione di radon. ARIA '94: Atti del 3° convegno nazionale dell'associazione Aria - Monteporzio Catone 26-28 ottobre 1994 p. 107-113.

G.U. n. 203 del 31 agosto 2000 - Supplemento Ordinario n. 140 Decreto Legislativo 26 maggio 2000, n. 241 "Attuazione della direttiva 96/29/EURATOM in materia di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori contro i rischi derivanti dalle radiazioni ionizzanti".

G.U. n. 278 del 27 novembre 2001. Supplemento ordinario n. 252 "Linee-guida per la tutela e la promozione della salute negli ambienti confinati", 2001. IARC, International Agency for Research on Cancer 1987 Monographs Supplement 7 p.120 (1987).

IARC, International Agency for Research on Cancer 1982. Monographs Volume 62 Wood dust and Formaldehyde 1995; 405 pages ISBN 92 832 1262 2.

IARC, International Agency for Research on Cancer Monographs, Supplement 7: p.106 (1987).

ICRP International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the 60 International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Ann. Of ICRP 21, 1986.

ICRP International Commission on Radiological Protection Protection Against Radon-222 at Home and at Work. London, England: Pergamon press 23(2): 1-65. ICRP Publication 1993.

IPCS 1998 INTERNATIONAL PROGRAMME ON CHEMICAL SAFETY Environmental Health Criteria Monographs (EHCs) n°202 Selected non-heterocyclic polycyclic aromatic compound; www.inchem.org.

Konisky D.M. Comparative risk project: A methodology for cross-project analysis of human health risk rankings. Discussion paper 99-46. Resources for the future <http://www.rff.org> 1999.

Ministero della salute. Piano Sanitario Nazionale 1998 - 2000 Supplemento ordinario alla Gazzetta Ufficiale n. 288 del 10 dicembre 1998.

Molhave, L., Bach, B. and Pedersen, O. F., 1987. Human reactions to low concentrations of volatile organic compounds. Environ. Int. 8: 117-127

Mueller Associated Inc., Syscon Corporation, Brookhaven National Laboratory, Handbook of Radon in Buildings. Detection, Safety and Control Hemisphere Publishing Corporation ISBN 0-89116-823-0 1988

Norback, D., Michel, I. and Widstrom, J., 1990a. Indoor air quality and personal factors related to the sick building syndrome. Scan. J. Work Environ. Health. 16:121-128

Norback, D., Torgen, M. and Edling, C., 1990b. Volatile Organic Compounds, respirable dust, and personal factors related to the prevalence and incidence of sick building syndrome in primary schools, Br. J. Ind. Med. 47:733-741

- NCRP National Council on Radiation Protection (USA) and measurements Report N° 103 - "Control of Radon in Houses" - 1989.
- Price, J. A., Pollock, I., Little, S.A., Longbottom, J.L., and Warner, J.O., 1990. Measurements of airborne mite antigen in homes of asthmatic children. *Lancet* 336:895-897.
- UK Ministry of Health 1954 Mortality and morbidity during the London fog of December 1952, London, HMSO (report on public health and medical Subjects No95).
- US EPA 1982 Air Quality Criteria for Oxides of nitrogen: final report. Report No EPA-600/8-82-026F Research Triangle Park NC. 1982.
- US EPA 1987. Unfinished Business: A Comparative Assessment of Environmental Problems Overview Report. Office of Policy, Planning and Evaluation, U.S. EPA. February 1987; <http://www.epa.gov/opperspd/history7/unfinish/toc.htm>.
- US EPA 1990. Reducing Risk: Setting Priorities and Strategies for Environmental Protection. Science Advisory Board, U.S. EPA. SAB-ED-90-021. September 1990; <http://www.epa.gov/opperspd/history7/reduce/toc.htm>.
- US EPA 1990b. Region 6 comparative risk project overview report. U.S. EPA., November 1990.
- US EPA 1999. Integrated Environmental Decision-Making in the 21st Century: Peer Review Draft. Science Advisory Board, U.S. EPA. May 1999; <http://www.epa.gov/science1/intenv1.htm>.
- Maroni, M., Seifert, B. and Lindval, T. 1995. Indoor Air Quality a Comprehensive book Elsevier Science p. 19
- Sterling, T.D., Dimich, H. and Kobayashi, D., 1982 Indoor byproduct levels of tobacco smoke: a critical review of the literature. *J. Air Pollution Control Association*. 32: 250-259.
- WHO, 1987. World Health Organization, Air Quality guidelines for Europe. WHO regional Publication European Series No. 23 WHO Regional Office For Europe Copenhagen, Denmark.
- WHO 1999 World Health Organization, Air Quality guidelines for Europe. WHO regional Publication European Series No. 91 WHO Regional Office For Europe Copenhagen, Denmark; <http://www.who.dk>
- WHO Guidelines for Air Quality, Geneva 2000; <http://www.who.int/peh/air/Airqualitygd.htm>
- IARC, 1988 Monographs; Radon and its decay products (10043-92-2) Vol. 43 (1988).
- EPA Proposed guidelines for carcinogen risk assessment; notice. Federal Register Vol. 61 No 79 April 23 1996.

# Energia e ambiente

## 1. Introduzione

Uno dei principali problemi con cui l'umanità dovrà confrontarsi nel prossimo futuro è quello della questione energetica, in relazione sia alla disponibilità di energia sia ad un suo utilizzo rispettoso dell'ambiente. Entrambi questi aspetti del problema non possono essere risolti solo dalla scienza, ma solo la scienza, cioè il metodo scientifico, è in grado di suggerire possibili modi di affrontarli e di valutare le conseguenze delle scelte effettuate. Pesare i pro e i contro di ogni scelta deve essere un'operazione fondata sui fatti e sui dati quantitativi, e non sulle emotività o su desideri che, alla luce dei fatti, abbiano scarsa possibilità di realizzarsi. La scienza, ad esempio, è in grado di dirci quali sono i limiti intrinseci imposti dalla Natura nello sfruttamento delle diverse possibilità di produrre energia e ci permette di non peccare di eccessi di pessimismo o di ottimismo.

Ogni attività produttiva umana, se deve rendere un reale servizio all'uomo, deve rispondere ad una domanda sociale ed essere economicamente redditizia e rispettosa dell'ambiente. Nessuno di questi requisiti deve essere privilegiato e nessuno deve essere trascurato. In questo documento si intende analizzare con metodo scientifico quegli aspetti della questione energetica che possono essere di maggiore rilievo per l'impatto ambientale, in funzione delle modalità di produzione adottate.

Nel seguito useremo le seguenti unità di misura: la tonnellata equivalente di petrolio, Tep, o i suoi multipli, MTep (Mega Tep pari a un milione di Tep) e GTep (Giga Tep pari a un miliardo di Tep) e il chilowattora, kWh:

$$1 \text{ Tep} = 11.700 \text{ kWh}$$

(per una rapida conversione, può essere conveniente approssimare 1 Tep a 12mila kWh). Per avere una maggiore sensibilità sul significato di queste unità è opportuno sapere che il consumo energetico annuo di ogni italiano vale poco meno di 4 Tep, cioè poco meno di 50.000 kWh. Val la pena di osservare che se ogni cittadino del mondo avesse la stessa disponibilità energetica di un italiano, nel mondo si consumerebbero annualmente 24 miliardi di Tep, mentre invece se ne consumano circa 10, di cui il 14% è energia elettrica (questa percentuale sale al 35% nei Paesi industrializzati). Infine, va anche detto che mentre il consumo di energia di ogni cittadino europeo (o giapponese o russo) è prossimo a quello italiano, il consumo dei cittadini americani è doppio, e quello dei cinesi è ridotto di un quarto.

A livello globale, i circa 10 miliardi di Tep consumati annualmente nel mondo sono distribuiti tra le varie fonti secondo la seguente tabella:

Tabella 1

| Sorgente      | %  |
|---------------|----|
| Petrolio      | 33 |
| Carbone       | 21 |
| Gas naturale  | 19 |
| Lignite       | 12 |
| Idroelettrico | 7  |
| Nucleare      | 6  |
| Rinnovabili   | 2  |

Dalla tabella si vede che petrolio, carbone e gas naturale complessivamente contribuiscono oggi per 3/4 al fabbisogno energetico mondiale. E' opportuno anche inserire una tabella di stima degli anni delle attuali riserve e agli attuali ritmi di consumo:

Tabella 2

| Fonte                           | anni     |
|---------------------------------|----------|
| Petrolio                        | 40       |
| Gas                             | 50       |
| Carbone                         | 200      |
| Uranio                          | 200      |
| Lignite                         | 300      |
| Uranio in surgeneratori         | 20.000   |
| Uranio e torio in surgeneratori | infinito |

Per quanto concerne le riserve stimate di combustibili fossili, va fatto presente che lo sfruttamento di riserve non convenzionali di combustibili fossili (giacimenti dei fondi oceanici, scisti bituminosi, idrati di metano) potrebbe elevare di diverse centinaia di anni la disponibilità attuale dalle riserve convenzionali, anche se va detto che lo sfruttamento dei giacimenti non convenzionali pone problemi severi sia di carattere ambientale che di costi. Quanto all'uranio, questo elemento può estrarsi, ma ad un costo sino a 10 volte quello attuale di estrazione da giacimenti convenzionali, anche dall'acqua marina che ne contiene in concentrazioni di circa 3 ppb (parti per miliardo). C'è però da notare che l'impiego di reattori di nuova generazione, cui si accennerà in seguito, porterebbe la durata delle riserve d'uranio da 200 a 20.000 anni.

Si deve però precisare che difficilmente i ritmi attuali di consumo rimarranno invariati nel tempo. Anzi: il Dipartimento dell'Energia americano (DOE) stima che al 2020, in corrispondenza di un previsto incremento del 25% della

popolazione mondiale (dagli attuali 6 ai 7.5 miliardi previsti per il 2020), il consumo totale di energia e l'incremento di emissione di anidride carbonica aumenteranno di oltre il 50%. Incrementi, questi, che interesseranno per lo più i Paesi in via di rapido sviluppo, il cui consumo energetico si avvicinerà sempre più a quello dei paesi industrializzati. Rispetto alla domanda di elettricità, le previsioni sono ancora più drammatiche (non necessariamente "in negativo"): si stima che essa aumenterà, da qui al 2020, del 150%.

In Italia la domanda complessiva di energia nel primo trimestre del 2002 è stata (dati ENI) pari a quasi 53 MTep con un incremento, rispetto allo stesso periodo del 2001, dell'1.8%. Il consumo medio pro-capite nel nostro Paese, estrapolato sui dati del primo trimestre del 2002, risulta dell'ordine di 3.7 MTep/anno. Nel grafico di Fig. 1 è riportata, per l'Italia, la ripartizione percentuale delle fonti primarie di energia dal quale risulta che il contributo dei combustibili fossili è pari al 94%. I consumi delle fonti energetiche impiegate per combustione ha comportato, nel primo trimestre del 2002, l'emissione di CO<sub>2</sub> per un totale di 123.86 Mt con un incremento rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente del 4.2% a fronte di un aumento del 4.4% dei consumi. Nel grafico di Fig. 2 sono riportati i contributi all'emissione di CO<sub>2</sub> delle varie fonti.

Qualunque sia la fonte, l'energia ha un prezzo. La tabella 3 riassume i costi indicativi (in centesimi di euro per kWh) per la produzione di energia elettrica dalle diverse fonti. Naturalmente, può accadere che in certe realtà può essere conveniente una fonte che nella tabella risulta più cara di un'altra. Ad esempio, se si vuole alimentare una casa isolata in montagna potrebbe essere preferibile l'uso del solare anziché inserirsi nel complesso di una rete centralizzata.

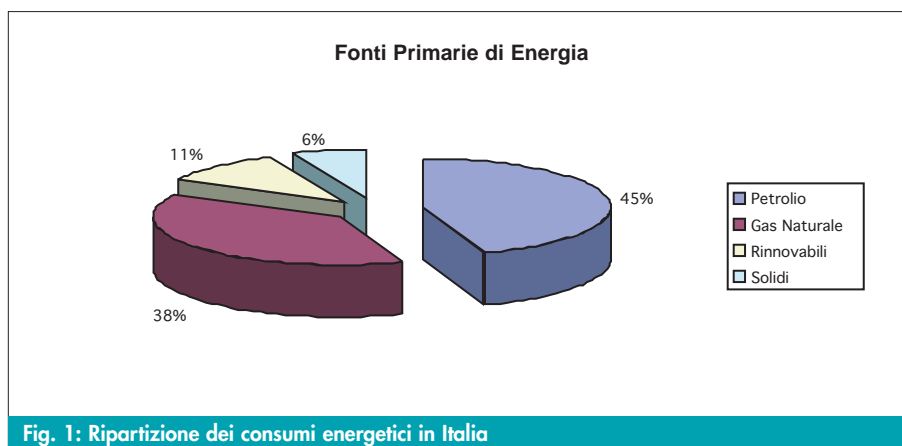
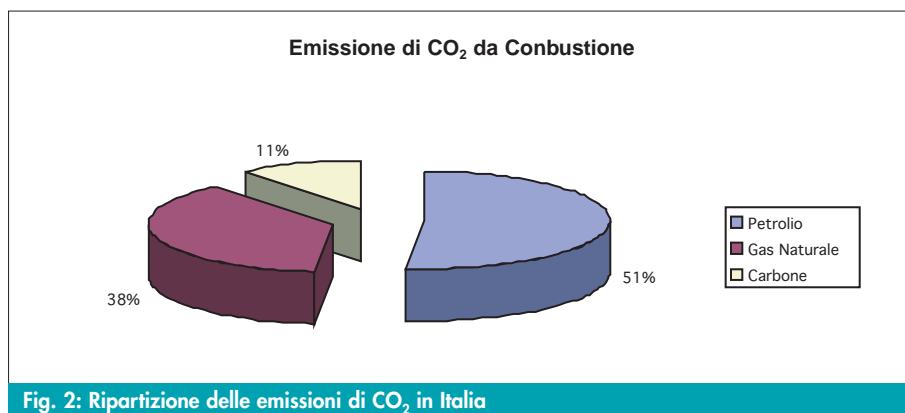


Fig. 1: Ripartizione dei consumi energetici in Italia



Inoltre, la tabella tiene conto, necessariamente, solo di un aspetto dei costi. Ad esempio, essa non valuta quelli a carico della società e legati ad eventuali conseguenze negative su salute e ambiente da ciascuna fonte; una valutazione, quest'ultima, tutt'altro che banale da effettuarsi. L'Unione Europea ha intrapreso programmi di studio volti a determinare i costi, inclusi quelli ambientali, sanitari o di vite umane per possibili incidenti, dalle varie fonti d'energia. I risultati di questi studi sono inficiati da larghi margini di incertezza; per esempio, l'inclusione, nelle stime, dei più disastrosi scenari dovuti all'effetto serra, lieviterebbe il costo sociale della fonte fossile rispetto a quella, ad es., nucleare. Rimandiamo alla sezione 6.10 per un confronto dei rischi dalle varie fonti d'energia.

Tabella 3

| Fonte               | Costo (c€/ kWh) |
|---------------------|-----------------|
| Solare fotovoltaico | 50              |
| Solare termico      | 12              |
| Biomassa            | 8               |
| Geotermico          | 7               |
| Eolico              | 6               |
| Fossile             | 6               |
| Nucleare            | 5               |
| Idroelettrico       | 2.5             |



benessere si usa quantitativamente una grandezza, chiamata Indice di Sviluppo Umano (ISU), calcolata a partire da tre indicatori: la longevità (misurata dall'attesa di durata della vita), il livello di istruzione (misurato combinando - con peso 2/3 - i dati sulla alfabetizzazione degli adulti e - con peso 1/3 - il rapporto di inquadramento nei settori primario, secondario e terziario delle attività umane), e lo standard di vita (misurato dal prodotto interno lordo per abitante). Ebbene, in uno studio effettuato sulle 60 nazioni più popolate (comprendenti il 90% della popolazione mondiale) è stata trovata una forte correlazione tra consumo di elettricità e ISU e che il livello di ISU si stabilizza ad un valore di consumo di elettricità individuale annua di circa 40.000 kWh, cioè di circa 3 Tep (che è, grosso modo, la situazione in cui ci si trova attualmente in Italia). Insomma, se da un lato non sembra che ad un aumento, anche significativo, di consumo di elettricità individuale annuo oltre i 3 Tep corrisponda un aumento del valore dell'ISU, dall'altro, sarebbero necessari un notevole sforzo economico e una precisa volontà politica per portare la popolazione mondiale al livello dei 40.000 kWh di consumo di energia elettrica individuale annua. Per garantire prosperità economica, qualità ambientale e stabilità politica nel mondo, è essenziale che si aumenti la popolazione che goda di accesso a quote di energia più consistenti e rispettose dell'ambiente, della sicurezza e della salute, e a questo scopo solo un'analisi scientificamente orientata delle prospettive realistiche della tecnologia e di quel che ci si può aspettare e di quel che non ci si deve aspettare dalle varie fonti, può aiutare i responsabili politici nelle loro decisioni.

Ad esempio, non si può trascurare il fatto che, data la gran mole esistente a livello globale di infrastrutture destinate specificamente all'utilizzo delle fonti fossili, queste continueranno per diversi decenni ad avere il ruolo preminente di cui attualmente godono. Allo stesso modo, i timori di un loro possibile impatto ambientale a lungo termine non possono essere ignorati: la necessità dell'impegno nello sviluppo di fonti alternative difficilmente può essere sottovalutata. A questo proposito, vi sono pochi dubbi che la fonte nucleare possa essere un componente essenziale tra quelle che producono energia senza emissioni di gas-serra. E' però necessario che si dia alla popolazione una informazione scientificamente attendibile: nel recente passato questa necessità è stata purtroppo sottostimata e farvi fronte è stata un'opportunità perduta. Parimenti, vi sono pochi dubbi che le fonti eolica e solare, richiedono, per un loro uso diffuso, che si affrontino una serie di questioni tecniche, economiche, e infrastrutturali, e non tutte con garanzia di risposta soddisfacente. In ogni caso, quella dell'approvvigionamento energetico rispettoso dell'ambiente è una sfida per i prossimi decenni, una sfida da affrontare: le generazioni future ce ne saranno grate.

## 2. Combustibili fossili

### 2.1 Le riserve

La questione delle riserve di idrocarburi può così riassumersi: come per ogni risorsa finita e non rinnovabile, la quantità di essa estratta nel tempo comincia a zero, cresce in media nel tempo (generalmente esibendo uno o più punti di massimo) e si chiude inevitabilmente a zero. Usando un modello che tiene conto di questo comportamento generale, M.K. Hubbert predisse nel 1956 che, in media, la quantità di petrolio estratto in USA avrebbe raggiunto un massimo tra il 1966 e il 1971 per poi decrescere. Hubbert venne ignorato, ma il massimo da egli previsto si verificò nel 1970, e oggi l'estrazione di petrolio in USA è la metà di quella del 1970.

Come accennato nell'introduzione, si potrebbe pensare di fare affidamento a più moderni metodi di sfruttamento dei giacimenti di petrolio e, in particolare, alle tecniche della loro localizzazione nelle profondità degli oceani, da cui si potrebbe addirittura pensare di raddoppiare la attuale disponibilità. In più si stima la presenza di centinaia di miliardi di tonnellate di petrolio negli scisti bituminosi. Non bisogna però trascurare il fatto che sfruttare tali giacimenti comporterebbe, oltre al problema di dover affrontare costi elevati di estrazione (sino a 10 volte i costi di estrazione dai giacimenti convenzionali), elevati rischi ecologici connessi a possibili rotture di canalizzazioni profonde e alle rimozioni di enormi masse di suolo.

Immensa quantità di metano sono localizzate sotto forma di clatrati (sistemi cristallini stabili solo in particolari condizioni e composti in gran parte d'acqua; la stima prevede in questi casi una quantità di metano doppia di quella attualmente presente nei giacimenti noti di petrolio, carbone e gas naturale. Il prelievo di questi idrati non sembra comportare particolari difficoltà tecniche, ma certamente comporta rischi ecologici da non sottovalutare: 1) la possibile emissione in atmosfera di enormi quantità di metano, un gas-serra oltre 20 volte più efficace dell'anidride carbonica; 2) la possibile destabilizzazione di equilibri geologici accompagnata da maremoti con conseguenze anche catastrofiche.

In un recente lavoro, S. Deffreys, utilizzando il metodo di Hubbert, stima che il massimo di estrazione mondiale di petrolio si verificherà tra il 2003 e il 2009. E' stato anche stimato che ogni miliardo di tonnellate di petrolio in più rispetto alle stime attuali delle risorse sposterebbe in avanti il picco di circa 50 giorni. Per dirla con le parole di Deffreys, "una cosa è certa: nessuna iniziativa che venga oggi intrapresa potrà avere alcun sostanziale effetto sulla data in cui il massimo di estrazione di petrolio andrà a verificarsi. Nessuna esplorazione del mar Caspio, nessuna ricerca nei mari del sud della Cina,

nessun progetto di energia rinnovabile potrà mai evitare una guerra per il petrolio rimasto. C'è solo da sperare che sia una guerra economica e non militare”.

In conclusione, fare affidamento alle risorse non convenzionali di combustibili fossili significa doversi confrontare con costi elevati e rischi ecologici elevati. In ogni caso, la fine del petrolio a buon mercato non è lontana (si pensi che già oggi il costo di estrazione del petrolio dal Mar del Nord è 20 volte più elevato del costo di estrazione in Arabia Saudita). Non sembra superfluo sottolineare queste cose ai responsabili politici: chiudere gli occhi dinanzi alla realtà potrebbe rivelarsi sgradevole nel prossimo futuro.

## 2.2 L'impatto ambientale

I problemi ambientali dello sfruttamento dei combustibili fossili sono di due tipi: uno, certo, dovuto agli effetti immediati della degradazione dei siti e dell'inquinamento da prodotti della combustione (primari e secondari) accertati nocivi; il secondo, a lungo termine, dovuto alla possibile influenza sul clima che potrebbe conseguire dall'immissione in atmosfera di quantità di gas-serra in eccesso rispetto a quelle di origine naturale, principalmente anidride carbonica, ma anche metano. Quest'ultimo combustibile, in particolare, necessita di essere trasportato attraverso metanodotti che, al meglio, hanno perdite intorno al 5%, ma che raggiungono valori del 30% nei metanodotti siberiani. Queste perdite sono un inconveniente serio se si teme l'eccessiva introduzione di gas-serra in atmosfera: rispetto all'effetto serra, il metano è oltre 20 volte più efficace dell'anidride carbonica.

Specifichiamo subito che il secondo problema è una questione aperta ed è lontano dall'essere una certezza. Ci limitiamo qui alle seguenti osservazioni: sembra accertato che la temperatura media globale sia aumentata di mezzo grado nell'ultimo secolo e, parimenti, la concentrazione di anidride carbonica presente nell'atmosfera, nello stesso periodo, è aumentata del 25%. Rimane dubbio però il passaggio da semplice correlazione a rapporto causa-effetto tra i due fatti e, in particolare, se le attività antropogeniche ne siano la causa. Ad esempio, se è vero che la temperatura atmosferica media globale non è mai stata così elevata da 1400 anni a oggi, bisognerebbe pur trovare una spiegazione agli elevati valori di 1400 anni fa, quando non si avevano emissioni antropogeniche. E' necessario essere consapevoli che è limitata la nostra capacità di valutare l'eventuale influenza delle attività umane sul clima globale, sui cui cambiamenti è necessario stimare l'influenza di fenomeni ciclici naturali, come ad esempio quelli legati all'attività solare o ai moti della Terra (modificazioni dell'eccentricità della sua traiettoria, dell'obliquità del

suo asse di rotazione e dei moti di precessione attorno al suo asse). In ogni caso, pur con tutti i dubbi che il problema merita, esso, ove fosse ritenuto rilevante, sarebbe uno stimolo maggiore a ridurre la dipendenza dai combustibili fossili per l'approvvigionamento energetico.

Naturalmente, la produzione di gas-serra non è il solo tipo di inquinamento dall'uso dei combustibili fossili. Anzi: forse è il meno importante. Nella tabella seguente riportiamo i tassi di emissione di inquinanti dalle diverse risorse fossili. Si vede dalla tabella che, in linea di principio, la fonte più inquinante è il carbone, quella meno inquinante è il gas naturale.

Tabella 4

| Emissioni da<br>(per kWh) | g di CO <sub>2</sub> | g di SO <sub>2</sub> | g di NO <sub>2</sub> |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Carbone                   | 950                  | 7.5                  | 2.8                  |
| Gasolio                   | 800                  | 5                    | 1.8                  |
| Gas naturale              | 570                  | -                    | 1.3                  |

Tipicamente, i rendimenti delle centrali termiche convenzionali non superano il 35%. Oggi, grazie ai progressi della ricerca su nuovi materiali, è possibile utilizzare turbine a gas che funzionano a temperature più alte (900°) di quelle convenzionali: i gas emessi da queste turbine sono ancora sufficientemente caldi da essere utilizzabili per far funzionare un'altra turbina a vapore accoppiata alla prima (**ciclo combinato**), raggiungendo così rendimenti del 50%. Si può anche realizzare la situazione in cui i vapori di questa seconda turbina siano ancora sufficientemente caldi da essere utilizzati come sorgenti di calore, ad esempio per riscaldamento dei locali (**cogenerazione di elettricità e di calore**). In questo caso i rendimenti possono raggiungere anche l'85% (naturalmente questa tecnica trova piena efficacia solo ove vi sia necessità contemporanea di produzione di elettricità e calore, e non è giustificata, ad esempio, nelle stagioni calde se ci si limitasse ad utilizzare il calore per il riscaldamento dei locali). Con queste nuove tecnologie è possibile abbattere, anche di un fattore 2, le emissioni inquinanti riportate nella tabella.

Rimane infine un'ultima osservazione da fare: il petrolio è una sostanza preziosa e non sarebbe forse sbagliato pensare di economizzarne l'uso come combustibile e destinarla invece a usi più opportuni, come la produzione di materie plastiche. Rivolgere pertanto l'attenzione alla esplorazione di sorgenti alternative d'energia è, come si vede, motivato da diversi fattori: la non inesauribilità dei combustibili fossili, la ricerca di risorse meno inquinanti, la possibilità di utilizzare diversamente e più oculatamente alcuni di essi.

### 3. Energie rinnovabili

Con questo termine si intendono due tipi di sorgenti energetiche: quelle sostanzialmente inesauribili (sole, vento) e quelle che possono essere rigenerate entro tempi brevi (biomassa). L'interesse verso queste fonti è molteplice: in termini di inquinamento da sostanze nocive, l'utilizzo delle risorse rinnovabili è più rispettoso dell'ambiente rispetto all'utilizzo dei combustibili fossili; inoltre esse ridurrebbero la dipendenza da importazione d'energia da altri Paesi; infine, vi è oggi un generale consenso sull'opportunità di utilizzare al meglio tutte le fonti disponibili cercando di evitare preclusioni ideologiche e di fare affidamento alle analisi del rapporto costi/benefici. Bisogna tuttavia essere consapevoli delle effettive potenzialità di queste fonti ed evitare facili ottimismo. In particolare, nella tabella successiva si riportano le stime più favorevoli del contributo dalle varie fonti di energia rinnovabile al fabbisogno energetico italiano previsto per il 2020 (qualora si preferisse includerla tra le rinnovabili, la fonte geotermica contribuirebbe per il 2.7%).

Tabella 5

| Sorgente            | Contributo (%) |
|---------------------|----------------|
| Idroelettrico       | 7              |
| Biomassa            | 4.4            |
| Eolico              | 1.3            |
| Solare termico      | 1              |
| Solare fotovoltaico | 0.5            |

In ogni caso, aggiungendo anche altre fonti rinnovabili (biogas, rifiuti solidi urbani, etc.) si stima che il massimo teorico ottenibile dalla totalità di queste fonti, nelle condizioni di scenario di loro sviluppo più favorevole, non supererà nel 2020 il 24% del fabbisogno energetico nazionale. In particolare, il contributo delle fonti solare ed eolica, non è atteso, sempre nelle condizioni più favorevoli, essere superiore al 3% del fabbisogno energetico nazionale. Una politica che volesse legittimamente perseguire l'utilizzo delle nuove fonti rinnovabili e il sostegno all'attività di ricerca a esse inerenti non dovrebbe perdere la consapevolezza che, allo stato attuale delle cose, esse difficilmente possono considerarsi veramente "alternative" alle fonti tradizionali e, in particolare, a quelle fossili. Un termine più appropriato per qualificare queste energie sembrerebbe essere quello di energie "complementari". Un problema, in particolare delle fonti eolica e solare, è quello dell'imma-

gazzinamento dell'energia che queste fonti, data la loro natura intermittente, pongono. A questo scopo si usano accumulatori, che però sono adatti ove siano richieste piccole potenze (case isolate, ad esempio). Essi, a parte il fatto che a causa di forti dispersioni di calore forniscono meno energia di quella necessaria per caricarli, sono costosi e pesanti (ad es., gli accumulatori al piombo immagazzinano circa 0.1 kWh per kg, e questa è indubbiamente una delle ragioni di inibizione dello sviluppo delle vetture elettriche).

In ogni caso, sembra comunque saggio investire in ricerca e nello sviluppo delle tecnologie legate a queste fonti: come detto, nessuna di esse dovrebbe essere trascurata. Nella tabella seguente riportiamo le spese di ricerca sull'energia per abitante in alcuni paesi industrializzati, esplicitando il contributo di spesa sulle fonti rinnovabili (per l'anno 1996) e la percentuale di queste sul totale.

Tabella 6

| Paese         | €/abitante  |            | % delle rinnovabili sul totale |
|---------------|-------------|------------|--------------------------------|
|               | Rinnovabili | Totale     |                                |
| Danimarca     | 6.6         | 7.6        | 88                             |
| USA           | 7.1         | 9.2        | 77                             |
| <b>Italia</b> | <b>3.0</b>  | <b>5.2</b> | <b>58</b>                      |
| Germania      | 1.7         | 3.2        | 53                             |
| Regno Unito   | 0.5         | 1.3        | 38                             |
| Giappone      | 5.2         | 33.8       | 15                             |
| Francia       | 0.2         | 10.4       | 2                              |

Si noti sia la buona posizione dell'Italia rispetto agli investimenti sulla ricerca nel settore delle energie rinnovabili, sia la posizione preminente della Danimarca. Questo Paese ha sostenuto un notevole sforzo, in particolare nel settore della fonte eolica; pur tuttavia, questa fonte ricopre appena il 3% del fabbisogno energetico danese (12% del fabbisogno di elettricità) che, invece, viene soddisfatto, principalmente, dai combustibili fossili. A fronte degli investimenti consistenti di Danimarca e Italia contro quelli irrisori della Francia sulle fonti rinnovabili, deve far riflettere che mentre quest'ultima già soddisfa i parametri richiesti dal protocollo di Kyoto, le prime due ne sono invece ben lontani (rispetto a quelle del 1990, l'Italia deve ridurre le proprie emissioni del 6.5%, la Danimarca del 21%!).

### 3.1 Energia solare

Il solare fotovoltaico sfrutta la produzione, indotta da fotoni di luce solare, di coppie elettrone-lacuna che, tenuti separati dal campo elettrico realizzato alla

giunzione di due materiali semiconduttori, generano una corrente elettrica. Naturalmente non tutta l'energia solare incidente è disponibile come energia elettrica. Tipicamente, l'efficienza teorica si attesta attorno al 25%, quella effettiva intorno al 10%.

Circa l'85% dei pannelli commerciali sono realizzati con silicio cristallino, elemento che possiede le migliori proprietà fotovoltaiche e che, nel lungo termine, sembrerebbe essere la soluzione più promettente. L'efficienza dei pannelli si attesta intorno al 20% per quelli a cristallo singolo, che però hanno costi molto elevati, e intorno al 13% per quelli policristallini, il cui costo è meno elevato: in ogni caso, una delle maggiori sfide di questo campo è il raggiungimento di costi competitivi. Il resto dei pannelli commerciali è realizzato con silicio amorfo, il cui vantaggio economico rispetto ai pannelli a silicio cristallini è scompensato da un rendimento inferiore che, attualmente, si attesta intorno al 7%.

Allo stato attuale, una produzione centralizzata d'elettricità di origine fotovoltaica avrebbe un costo più elevato dell'elettronucleare o dell'uso dei combustibili fossili. E' vero che il costo del fotovoltaico sta diminuendo col tempo, ma è difficile fare previsioni sulla sua effettiva competitività futura. E' ragionevole presumere che bisognerà attendere una trentina d'anni prima che il fotovoltaico abbia una penetrazione nel mercato dell'ordine del 10-20%. D'altra parte, per Paesi a bassa densità di popolazione (quindi non per l'Italia), ove può essere costosa la realizzazione di una rete elettrica convenzionale, o in zone isolate, ove può essere costoso l'allacciamento alla rete elettrica centrale, l'uso dell'energia solare può essere una scelta conveniente.

Bisogna tuttavia non sottovalutare il fatto che, comunque, una superficie di oltre 20 kmq (tanta occorrerebbe ricoprirne) per ottenere la stessa quantità di energia fornita da una centrale convenzionale (termica o nucleare) della potenza di un milione di kW, è una superficie importante e farvi ombra equivale, se in aperta campagna, ad effettuare una piccola deforestazione.

### 3.2 Energia eolica

Le variazioni di intensità di energia solare incidente sulla Terra, provocando differenze di temperatura, densità e pressione atmosferiche generano circolazioni d'aria, a livello planetario - i venti - la cui energia può essere sfruttata da opportune turbine eoliche. Si stima che se si sfruttasse effettivamente tutta l'energia eolica potenzialmente sfruttabile, questa potrebbe ricoprire il 30% dell'attuale consumo energetico a livello planetario (come detto sopra, la Danimarca, Paese che più di ogni altro ha investito per sviluppare e utilizzare questa fonte, ricopre attualmente il 3% del proprio fabbisogno energetico).

I limiti dell'eolico sono evidenti: le turbine funzionano solo quando c'è vento. In Francia, ad esempio, sarebbero necessarie 75mila turbine da installare lungo le zone costiere per ottenere un'energia pari a quella di 20 reattori nucleari (in Francia, attualmente, sono operativi 55 reattori nucleari). La valutazione sull'impatto paesaggistico di 75mila turbine eoliche esulano dai compiti che questo comitato si è prefissato.

### 3.3 Energia idroelettrica

Oggi la produzione mondiale d'energia idroelettrica, pari a circa 1 GTep (1 miliardo di Tep), è 5 volte maggiore di quella di 10 anni fa. Questa fonte, a differenza dell'eolica e del solare, offre un apporto non insignificante al consumo energetico mondiale, che è dell'ordine di 10 GTep (la frazione elettrica è pari al 14% a livello globale ma a circa il 35% se si considerano solo i Paesi industrializzati). Le potenzialità dell'idroelettrico, però, non sono illimitate e sono già oggi quasi completamente sfruttate: se si tiene conto delle risorse effettivamente sfruttabili non si ritiene si possano superare rese superiori ai 1.2 GTep/anno e, comunque, le potenzialità globali non vanno oltre i 3 GTep/anno. La maggior parte del potenziale idroelettrico non utilizzato si trova in Asia, Sud America e in Europa Orientale: il potenziale non sfruttato nei Paesi industrializzati è una quota minima. Nel complesso, il Consiglio mondiale dell'energia non prevede un contributo idroelettrico superiore al 7% del fabbisogno totale.

L'idroelettrico ha un impatto ambientale non indifferente sui climi ed ecosistemi locali, in conseguenza di deviazioni di corsi d'acqua, soppressione e decomposizione della vegetazione che occupava le zone inondate, e anche un impatto sulla popolazione, a causa della possibile necessità di spostamenti e dei rischi di rotture con possibili eventi catastrofici (quello delle rotture è un rischio reale: in media, nel mondo, si verifica una rottura all'anno).

### 3.4 Biomassa

Il desiderio di sfruttare la biomassa per produrre energia si fonda su due tipi di vantaggi, solo presunti o ragionevolmente probabili. Al primo tipo dà grande importanza un forte movimento d'opinione, convinto che i cambiamenti climatici, venturi o già in atto, siano dovuti a un aumento di concentrazione del biossido di carbonio nell'atmosfera. Tale teoria, che ha portato alla stesura del protocollo di Kyoto, ha sostenitori ma anche validi oppositori nel mondo scientifico; questi ultimi, alla luce dei dati sperimentali raccolti nel Novecento sulle temperature della bassa atmosfera e sull'andamento della



concentrazione suddetta, muovono critiche molto forti ai modelli usati per predire il clima dei prossimi decenni.

Esistono comunque argomenti meno opinabili a favore dell'uso energetico delle biomasse. In linea di principio, esse possono contribuire a ridurre la dipendenza dagli stati esteri produttori delle materie prime impiegate tradizionalmente come fonti d'energia. Inoltre, dopo l'11 settembre 2001, il mondo civile è divenuto molto più sensibile alle minacce terroristiche; e può dunque apprezzare la frammentarietà intrinseca allo sfruttamento energetico delle biomasse, che avviene in impianti di dimensioni relativamente contenute, e anche la pericolosità molto minore d'un deposito di biomassa, rispetto a quelli dei combustibili fossili o nucleari.

Nell'aprile 2002 s'è svolto a Pisa un seminario del programma PROBIO. Vari oratori hanno illustrato le prospettive della bioenergia (o energia da biomassa), alcune delle quali incoraggianti. Ci sono però anche aspetti diversi. Uno degli organismi organizzatori ha pubblicato nello stesso mese un documento dove, nel paragrafo dedicato al biodiesel (cioè al carburante per motori diesel ricavato chimicamente da oli vegetali), si legge: "L'Italia importa circa il 70% degli oli per la fabbricazione del biodiesel prevalentemente da Francia e Germania e, in misura minore, da altri Paesi europei ed extraeuropei". Pur se non ufficiale (come dichiarato da V. Bartolelli, vicepresidente, ITALBIA, Italian Biomass Association), questo dato mostra già come l'Italia non possa illudersi che il settore possa dare un gran contributo alla valorizzazione d'un prodotto nazionale, avvalorando dunque lo scetticismo che, a proposito delle forti agevolazioni fiscali al biodiesel, il comitato scientifico dell'ANPA ha già manifestato.

Nel gennaio 2002, nel corso d'un convegno a Roma, l'economista G. Munda comunicò un'informazione che, accostata a quella di poco sopra, rafforza parecchio la sensazione che sia necessaria un'informazione più corretta, e magari che la politica italiana sul biodiesel debba cambiare: il nostro paese produce il 70% del biodiesel europeo. In poche parole, le agevolazioni fiscali italiane vanno a beneficio delle economie d'altri paesi, che nel biodiesel credono molto meno.

Il chimico S. Ulgiati espone inoltre i risultati d'alcuni calcoli molto interessanti: se il biodiesel dovesse essere miscelato al 5% (il limite entro cui non sarebbero necessarie modifiche ai motori) in tutto il gasolio consumato in Italia, nella migliore delle ipotesi la produzione agricola nostrana, per far fronte alla domanda, sarebbe costretta ad aumentare del 200%, occupando il 50% di terreno in più. Crescerebbero del 20% anche l'acqua consumata e i pesticidi immessi nell'ambiente. L'obiettivo è dunque molto pericoloso, e comunque cozza con la indisponibilità di nuovi suoli agricoli. M. Giampietro, del-

L'Istituto Nazionale di Ricerca dell'Alimentazione e Nutrizione, portò l'esempio del Brasile, dove, per produrre il carburante bioetanolo sufficiente agli spostamenti di quarantamila persone, si è dovuto fronteggiare un inquinamento pari a quello delle attività di due milioni di abitanti.

Su uno degli ultimi numeri dell'organo ufficiale della Società Chimica Italiana, A. Girelli, dopo aver riprodotto una tabella da fonte attendibile che ricorda come il potere calorifico del petrolio grezzo sia notevolmente maggiore di quello dei vegetali più importanti, ha scritto: "La lotta all'inquinamento, alla quale fanno spesso riferimento gli zelatori delle biomasse, mi sembra alquanto pretestuosa, dato che le emissioni del cosiddetto biodiesel non sono nel complesso assai migliori di quelle del gasolio debitamente raffinato". Altrettanto si può dire dell'idea d'un ritorno in grande stile al legno come combustibile: il suo potere calorifico è meno della metà di quello del petrolio grezzo, per tacere del fatto che la legna da ardere è il combustibile solido la cui combustione genera emissioni particolarmente inquinanti (soprattutto particolato).

C'è poi l'aspetto quantitativo. Nel 2000 la biomassa rinnovabile, compreso il legno, il gas prodotto nelle discariche e il bioetanolo, fornì soltanto circa il 3,4% dell'energia necessaria agli Stati Uniti, sommando elettricità, carburanti e riscaldamento. Il rendimento con cui le piante immagazzinano l'energia solare è in media circa lo 0.1%. I costi di raccolta e trasporto della biomassa a grandi impianti industriali è molto alto, perché essa ha una bassa densità energetica. Ciò ne ha ristretto lo sfruttamento ai siti dove viene raccolta per altri scopi: carriere, stabilimenti alimentari, centri di raccolta e trattamento dei rifiuti.

Dal punto di vista economico, il rendimento energetico della biomassa è molto inferiore a quello dei combustibili fossili. I programmi americani più recenti nel settore della bioenergia si sono spostati verso le cosiddette bioraffinerie integrate, capaci di produrre, con grande elasticità, oltre all'energia elettrica, anche sostanze chimiche d'interesse industriale (tramite processi enzimatici o pirolitici) e carburanti, in modo da adattare la produzione alla domanda variabile del mercato. Per i piccoli impianti, come potrebbero essere quelli delle singole fattorie, la biomassa potrebbe subire gassificazione termica o degradazione enzimatica, e alimentare celle a combustibile.

Rimangono tuttavia i limiti per cui si calcola in almeno 2500 km<sup>2</sup> la superficie da coltivare (alle nostre latitudini) per fornire biomassa a una centrale da 7 miliardi di kWh/anno (per dare una vaga idea, circa un quarantesimo del fabbisogno italiano), e si ricorda che occorre consumare un litro di combustibile fossile per produrne due d'olio di colza esterificato (da usare come biodiesel) o uno e mezzo di bioetanolo.

Anche F. Trifirò, nel settembre 2001, metteva in guardia contro convinzioni errate: le biomasse "devono essere raccolte, lavorate e fatte ricrescere di

nuovo, con i tempi dettati dalla natura; per ottenerle occorre sudore della fronte, terreno, acqua non salmastra, insetticidi, fertilizzanti e forse anche sementi geneticamente modificati, per aumentare la produttività dei raccolti. [...] Attualmente in Malesia ci sono magazzini colmi d'olio di palma non utilizzato, materia prima ottimale per il gasolio, ma quello derivato dal petrolio è ancora più economico. Infine, ci si può chiedere quale senso abbia l'utilizzo delle risorse agricole per produrre prodotti chimici, quando ci sono miliardi d'individui sul pianeta ancora da sfamare e la terra è ancora piena di petrolio, carbone, gas naturale e scisti bituminosi”.

#### 4. Energia geotermica

L'energia geotermica proviene essenzialmente dalla disintegrazione degli elementi radioattivi contenuti all'interno del pianeta, principalmente uranio, torio e potassio. Le risorse di questa fonte sarebbero potenzialmente enormi (la temperatura media della Terra cresce di circa 3 °C ogni 100 metri di profondità), ma il flusso geotermico è troppo debole per essere direttamente sfruttabile: le risorse classiche riconosciute, distribuite in circa 80 Paesi (di cui poco più della metà la utilizzano in modo quantificabile), sono valutate dell'ordine di 60 miliardi di Tep (ricordiamo che la quantità di energia consumata in un anno nel mondo è dell'ordine di 10 miliardi di Tep). Quindi, questa sorgente non è inesauribile: una volta che il calore è stato estratto, bisogna attendere a lungo prima che il mantello terrestre si riscaldi di nuovo.

Comunque, questa fonte è certamente a basso impatto ambientale: i gas contenuti nell'acqua sono essenzialmente azoto e anidride carbonica, un po' di idrogeno solforato e tracce di ammoniaca, mercurio e radon. L'emissione di anidride carbonica, a parità di energia prodotta, è 10 volte inferiore di quella da combustibili fossili.

Attualmente nel mondo dalla fonte geotermica si producono annualmente poco meno di 4 milioni di Tep di energia elettrica e poco più di 3 milioni di Tep vengono utilizzati direttamente come calore (quindi neanche un millesimo del consumo totale di energia). Si stima che da qui a 20 anni la produzione potrebbe anche quintuplicare: il contributo di questa fonte, quindi, anche se a livello globale sostanzialmente poco significativo, potrebbe risultare interessante in certe situazioni locali. L'Italia è certamente tra i Paesi che hanno registrato, negli ultimi 10 anni, le più alte crescite di utilizzo di questa fonte, sviluppando attualmente dalla geotermia una potenza di quasi 250 mila kW (cioè, in termini di consumo energetico, meno dell'1% del totale). Come già detto, la stima più favorevole del contributo geotermico al fabbisogno energetico italiano previsto per il 2020 si attesta al 2.7%.

## 5. Idrogeno

L'idrogeno molecolare è un ottimo combustibile, non è tossico e, inoltre, bruciando non inquina, nel senso che produce solo acqua (al massimo favorisce la formazione degli ossidi di azoto). Se poi viene combinato elettrochimicamente in una cella a combustibile per produrre elettricità, si ha solo emissione di vapore acqueo. Il rovescio della medaglia è disarmante: l'idrogeno non esiste sulla Terra. Esso bisogna produrlo da composti che contengono idrogeno (inclusa l'acqua, mediante elettrolisi). La produzione deve naturalmente procedere attraverso una tecnologia che non introduca quegli inquinanti che l'idrogeno in sé evita (cioè l'energia utilizzata deve essere solare, eolica o nucleare). Una volta prodotto, l'idrogeno deve essere immagazzinato, un problema, questo, tutt'altro che risolto a causa di alcune caratteristiche di questo gas.

L'idrogeno deve essere compresso ad alte pressioni (tipicamente diverse centinaia di atmosfere) o liquefatto a basse temperature (inferiori a  $-250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) per essere confinato in un volume ragionevolmente piccolo (si pensi che a parità di pressione e volume l'idrogeno contiene un terzo dell'energia contenuta nel metano, mentre la densità d'energia dell'idrogeno liquido è un terzo di quella della benzina). La molecola di idrogeno è piccola ed è soggetta a dispersioni più facilmente di quanto non lo siano i combustibili più tradizionali. Essa diffonde facilmente anche all'interno della struttura metallica dei contenitori, che perciò devono essere costruiti con particolari tipi di acciai o altri materiali speciali, risultando così ben più pesanti di quelli usati per i combustibili tradizionali. Rispetto a questi ultimi, l'idrogeno ha più basse soglie di esplosività e di infiammabilità (cioè concentrazioni nell'aria al di sopra delle quali il gas esplose o si incendia). La facilità ad infiammarsi, soprattutto, crea le maggiori preoccupazioni: se l'idrogeno si infiamma, il fuoco si diffonde con una velocità 10 volte maggiore di quanto non accada quando si brucia metano o benzina.

I contenitori per l'immagazzinamento di idrogeno sono più voluminosi e più pesanti di quelli per i combustibili liquidi o per il gas naturale compresso: tipicamente, un serbatoio contenente idrogeno al 12% in peso e alla pressione di 340 atmosfere, pesa 32 kg e ha un volume di 182 l, ridotti a 28 kg e 116 l con l'idrogeno liquido (comunque la soluzione dell'idrogeno compresso è preferibile a quella dell'idrogeno liquefatto, anche perché l'energia richiesta per la compressione, se pur elevata, è significativamente inferiore a quella richiesta per la liquefazione). A titolo di confronto, un serbatoio per combustibili tradizionali equivalente rispetto all'energia immagazzinata peserebbe, incluso il combustibile, 25 kg e occuperebbe un volume di 25 l. Una promet-

tente tecnologia di immagazzinamento sembra essere quella che coinvolge l'uso di nanostrutture di grafite, ma per il momento la loro realizzabilità può considerarsi ancora di là da venire.

I problemi di sicurezza non vanno trascurati. L'idrogeno brucia con una fiamma quasi invisibile e irradia poco calore, rendendo difficoltoso il rilevamento di eventuali incendi, soprattutto di giorno, ma l'uso di rivelatori di radiazione infrarossa o di speciali pitture sensibili al calore, permetterebbe una più facile rivelabilità in caso di incendi. Nel complesso, si può dire che vi è sufficiente confidenza nella possibilità di usare in modo sicuro questo combustibile, a patto di rispettarne le quasi uniche proprietà; anzi, con una appropriata ingegneria, la sicurezza di veicoli equipaggiati con celle a combustibile potrebbe essere superiore a quella degli attuali veicoli a combustibili tradizionali.

Quella della produzione, distribuzione e immagazzinamento dell'idrogeno, è solo metà della sfida con cui confrontarsi per sviluppare l'uso dell'idrogeno in alternativa ai combustibili tradizionali: bisogna anche disporre della adeguata tecnologia per renderne operativo l'uso. Di queste, la più promettente sembra essere quella delle pile a combustibile, un sistema elettrochimico che converte energia chimica in energia elettrica, utilizzabile sia per centrali elettriche che nel settore dei trasporti. Il loro rendimento è eccellente: fino al 60% dell'energia disponibile viene convertita in elettricità (per confronto, motori a idrogeno a combustione interna hanno un'efficienza di circa il 45%, che è già del 20-25% superiore a quella dei motori che usano combustibili tradizionali).

La pila a combustibile differisce dalla batteria tradizionale: in quest'ultima l'energia chimica è trasformata in energia elettrica e il fenomeno è reversibile, nel senso che quando la batteria è scarica essa deve essere ricaricata mediante apporto di energia elettrica; in una centrale termica l'elettricità è prodotta dal calore che proviene dalla combustione del carburante; nella pila a combustibile il carburante viene convertito direttamente in acqua, senza combustione, grazie ad una reazione elettrochimica e con produzione di elettricità.

Anche se il principio delle celle a combustibile è noto da 160 anni, le prime applicazioni sono emerse solo in seguito all'avvio dei programmi spaziali negli anni sessanta e settanta, e solo più recentemente si sono investite risorse per cercare di renderle commerciabili e candidate per la costruzione di autoveicoli a emissione zero. Il loro costo è tuttavia ancora elevato (da 1000 a 10.000 € per kilowatt) e ne sarebbe necessaria una riduzione di uno o due ordini di grandezza prima che esso possa essere competitivo per le applicazioni nel settore dei trasporti. Comunque, le

ragioni economiche e di mercato, da sole, difficilmente condurranno ad una transizione dagli attuali combustibili all'idrogeno: essa, se mai avverrà, potrà solo essere in conseguenza di una forte volontà politica. In ogni caso, si stima che si dovranno attendere diversi decenni prima che tale transizione si realizzi.

## 6. Energia nucleare

### 6.1 La situazione internazionale

Nella tabella 7 riportiamo per alcuni Paesi il rapporto tra il consumo energetico da fonte nucleare e quello da fonte fossile (1996). Nelle due tabelle seguenti, tabelle 8 e 9, riportiamo la situazione, rispettivamente, in Europa e nel mondo, della fonte nucleare al 31.12.2000 (dati OCSE-NEA, ONU-IAEA)

Il contributo nucleare alla copertura del fabbisogno elettrico è stata nel 2001 del 17% a livello mondiale, del 25% nei paesi dell'OCSE e del 35% a livello europeo. In Europa la fonte nucleare è da tempo la prima fonte di produzione elettrica, con percentuali di copertura del fabbisogno elettrico che hanno raggiunto il 46% in Svezia, il 55% in Belgio, il 77% in Francia e il 78% in Lituania.

Tabella 7

| Paese         | nucleare/fossile |
|---------------|------------------|
| Francia       | 0.722            |
| Giappone      | 0.133            |
| Germania      | 0.132            |
| Gran Bretagna | 0.112            |
| USA           | 0.105            |
| Russia        | 0.040            |
| Cina          | 0.004            |
| <b>Italia</b> | <b>0.0</b>       |

Le scelte politiche effettuate a cavallo fra gli anni Ottanta e Novanta hanno di fatto (non di diritto) precluso all'Italia la possibilità di ricorrere all'energia nucleare. Il settore nucleare nazionale, che aveva conseguito risultati significativi, è stato in tal modo azzerato, vanificando un investimento complessivo di 120 mila miliardi in lire storiche condotto in condizioni di assoluta sicu-

Tabella 8

| Nazione       | Quota<br>elettronucleare<br>(%) | Unità in funzione |                           | Unità fuori<br>servizio |                           | Unità in<br>costruzione |                           |
|---------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
|               |                                 | Numero            | Potenza<br>netta<br>(MWe) | Numero                  | Potenza<br>netta<br>(MWe) | Numero                  | Potenza<br>netta<br>(MWe) |
| Belgio        | 55                              | 7                 | 5713                      | 1                       | 11                        | 0                       | 0                         |
| Bulgaria      | 42                              | 6                 | 3538                      | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         |
| Finlandia     | 27                              | 4                 | 2656                      | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         |
| Francia       | 76                              | 58                | 61733                     | 12                      | 3853                      | 1                       | 1450                      |
| Germania      | 33                              | 19                | 21122                     | 18                      | 4999                      | 0                       | 0                         |
| Gran Bretagna | 26                              | 35                | 12120                     | 10                      | 1475                      | 0                       | 0                         |
| <b>Italia</b> | <b>0</b>                        | <b>0</b>          | <b>0</b>                  | <b>4</b>                | <b>0</b>                  | <b>0</b>                | <b>0</b>                  |
| Kazakistan    | 0,2                             | 1                 | 52                        | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         |
| Lituania      | 77                              | 2                 | 2370                      | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         |
| Olanda        | 6                               | 1                 | 449                       | 1                       | 55                        | 0                       | 0                         |
| Romania       | 10,4                            | 1                 | 646                       | 0                       | 0                         | 1                       | 630                       |
| Russia        | 13                              | 29                | 19843                     | 13                      | 1494                      | 3                       | 2825                      |
| Slovacchia    | 40                              | 5                 | 2020                      | 1                       | 104                       | 3                       | 1164                      |
| Slovenia      | 39                              | 1                 | 632                       | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         |
| Spagna        | 30                              | 9                 | 7347                      | 1                       | 480                       | 0                       | 0                         |
| Svezia        | 46                              | 11                | 10040                     | 2                       | 910                       | 0                       | 0                         |
| Svizzera      | 40                              | 5                 | 3127                      | 1                       | 8                         | 0                       | 0                         |
| Ucraina       | 44                              | 14                | 12120                     | 3                       | 2575                      | 2                       | 1900                      |
| Ungheria      | 38                              | 4                 | 1729                      | 0                       | 0                         | 0                       | 0                         |

Tabella 9

|   |             |
|---|-------------|
| Numero di reattori effettivamente in funzione nel mondo           | 438         |
| Potenza netta complessiva degli impianti in esercizio             | 350.772 MWe |
| Numero di reattori in costruzione nel mondo                       | 39          |
| Potenza elettrica netta complessiva degli impianti in costruzione | 29.859 MWe  |
| Quota elettronucleare nella produzione elettrica mondiale         | 17%         |

rezza nel quadro del Trattato Euratom e del Trattato di non proliferazione, sotto la sorveglianza internazionale dell'ONU e dell'OCSE.

Per effetto delle decisioni assunte, l'Italia si trova in una posizione di evidente singolarità rispetto agli altri paesi industriali, nessuno dei quali ha assunto

analoghe decisioni di chiusura immediata di tutti gli impianti in esercizio. In considerazione del fatto che la domanda nazionale di energia elettrica è stata coperta negli ultimi anni per quote annue variabili fra il 14 e il 18% attraverso le importazioni di elettricità nucleare, è evidente che l'Italia non ha rinunciato all'uso dell'energia nucleare, ma l'ha resa una nuova fonte di importazione.

## 6.2 La riflessione in atto

Il disastro di Chernobyl ha avviato in alcuni paesi industrializzati una approfondita riflessione sul ruolo che l'energia nucleare potrà assumere nei programmi energetici. Questa riflessione ha tuttavia portato a riconoscere l'essenzialità dell'apporto di questa fonte energetica.

Nella tabella 10 che segue riportiamo i dati (da fonte ONU-IAEA, OCSE-NEA) sullo sviluppo dell'energia nucleare dopo il disastro di Chernobyl.

Tabella 10

|  |             |
|--|-------------|
| Potenza elettronucleare in funzione nel mondo al 1° gennaio 1986         | 249.688 MWe |
| Potenza elettronucleare in funzione nel mondo al 31 dicembre 2000        | 350.772 MWe |
| Crescita della potenza elettronucleare in funzione fra il 1986 e il 2000 | 40%         |

I dati ufficiali di ONU e OCSE mostrano come sia erronea la convinzione che, a valle del disastro di Chernobyl, la fonte nucleare sia stata oggetto di riduzioni: dopo quel drammatico evento la potenza nucleare in funzione nel mondo è aumentata del 40%, passando da 250.000 MWe (1986) a oltre 350.000 MWe (2000). Oggi sono in costruzione 39 nuovi impianti nucleari in 16 diversi paesi per una potenza aggiuntiva di 30.000 MWe.

È parimenti ingiustificato considerare sintomo di regresso della tecnologia nucleare il fatto che i paesi che già impiegano estesamente questa fonte rinuncino a costruire nuove centrali. I programmi nucleari sono infatti limitati per definizione: una volta raggiunto un *mix* produttivo ottimale (fatto di nucleare, fonti fossili, idroelettrico e nuove fonti rinnovabili) non è più necessario realizzare nuovi impianti nucleari. Ciò è ancora più vero perché, grazie agli interventi di sostituzione programmata dei componenti, una moderna centrale nucleare ha una vita utile di 50-60 anni. Questa situazione è stata raggiunta in quasi tutti i paesi industriali avanzati, e in particolare in Europa dove, come detto, la fonte nucleare copre un terzo del fabbisogno elettrico. Ben diversa è la situazione nei paesi che sono lontani dall'aver raggiunto il *mix* energetico ottimale, come il Giappone (che ha in costruzione 4.500



MWe nucleari), la Corea (3.800 MWe nucleari in costruzione), la Russia (3.400 MWe nucleari in costruzione), la Cina (che prevede di realizzare 30 mila MWe nucleari nei prossimi 25 anni) e la Finlandia (che ha recentemente deciso di realizzare il suo quinto impianto nucleare).

La scelta nucleare è stata confermata dalla Francia, che grazie ad essa registra il costo del kWh più basso d'Europa e il più stabile rispetto alle fluttuazioni del prezzo dei combustibili fossili. La dipendenza energetica della Francia dall'estero si è ridotta dal 78% al 50% dal '73 ad oggi, e ciò si accompagna a un'esportazione netta di energia elettrica per 3 miliardi di euro all'anno e a un fatturato estero dell'industria nucleare pari a oltre 2 miliardi di euro all'anno. La chiusura dell'impianto Superphénix, prototipo di reattore autofertilizzante, lungi dall'essere un segnale di ripensamento, ha avuto motivazioni esclusivamente economiche, e ha preso atto del fatto che la grande abbondanza di uranio sul mercato internazionale non incita per il momento a spingere le ricerche nella direzione di una migliore economia del combustibile. Il programma Superphénix è comunque servito ad acquisire una tecnologia che è oggi disponibile per gli sviluppi di medio e lungo termine.

In Germania il governo ha deciso di limitare a 35 anni la vita utile di ciascuno degli impianti nucleari installati, ma ciò è avvenuto - contro il parere degli economisti e dell'industria - per scelta esclusivamente politica. L'applicazione di questa decisione porterebbe a una graduale chiusura degli impianti nucleari dopo 35 anni di esercizio, e in questa ipotesi l'ultimo dei reattori oggi in esercizio sarebbe fermato nel 2020. Le associazioni industriali, scientifiche e dei consumatori hanno ufficialmente espresso al governo tedesco la convinzione che il paese (che peraltro dispone di ingenti risorse carbonifere) non può permettersi di rinunciare a una fonte che copre il 33% del fabbisogno elettrico nazionale. Nel frattempo nessuno dei reattori tedeschi in funzione prima della decisione è stato ancora fermato.

La Svezia, che in seguito a un referendum tenuto nell'80 dopo l'incidente di Three Mile Island avrebbe dovuto uscire dal nucleare a partire dal '92, delle 12 centrali nucleari che aveva nel 1980, ne ha tuttora 11, che funzionano a pieno regime coprendo il 46% del fabbisogno elettrico nazionale (la parte restante proviene dall'idroelettrico). Dopo la fermata del primo reattore della centrale di Barsebäck (avvenuta solo all'inizio del 2000) il governo ha deciso di rinviare *sine die* la fermata del secondo reattore "per la mancanza di alternative valide sul piano economico e ambientale". Più recentemente, e al solo scopo di garantire la tenuta della coalizione di maggioranza, il governo ha adottato una risoluzione di principio (limitazione della vita operativa degli impianti) analoga a quella adottata in Germania

### 6.3 Prospettive di sviluppo

Gli studi condotti in campo internazionale dall'ONU e dall'OCSE mostrano che l'energia elettronucleare è competitiva rispetto all'elettricità prodotta negli impianti termoelettrici convenzionali, con vantaggi più generali che riguardano il miglioramento della bilancia dei pagamenti dei paesi importatori di combustibili fossili, la stabilizzazione dei prezzi di questi ultimi sui mercati internazionali, un mercato contribuito alla occupazione e alla crescita economica e l'assenza delle conseguenze ambientali proprie delle fonti fossili. Per quanto riguarda il futuro, i più recenti studi dell'OCSE stimano che la quota elettronucleare sul totale delle forniture elettriche è destinata a crescere nel medio-lungo termine fino a valori del 20-25% nell'America del Nord e del 40-60% nella zona europea dell'OCSE e in Giappone. In tabella 11 riportiamo le previsioni di sviluppo (da fonte NEA) della domanda elettronucleare nei paesi dell'OCSE:

In presenza di una popolazione mondiale che continua a crescere e di un fabbisogno energetico che cresce ancor più rapidamente, la domanda di energia elettrica continuerà ad aumentare sia nei paesi sviluppati sia in quelli in via di sviluppo. Petrolio e gas naturale saranno le fonti sulle quali insisterà in massima parte la domanda proveniente dai paesi emergenti, e continueranno a rimanere affette da grossi squilibri regionali tra offerta e domanda; il loro approvvigionamento resterà quindi soggetto a eventi non controllabili da parte dei paesi consumatori.

Tabella 11

| Anno | Domanda di elettricità (TWh) | Produzione elettronucleare (TWh) | Quota nucleare % | Potenza nucleare installata (GWe) |
|------|------------------------------|----------------------------------|------------------|-----------------------------------|
| 2010 | 9.250                        | 2.320 - 2.600                    | 25,1 - 28,1      | 365 - 414                         |
| 2020 | 10.680                       | 2.800 - 3.500                    | 26,2 - 32,8      | 430 - 563                         |
| 2030 | 12.190                       | 3.345 - 4.390                    | 27,4 - 36,0      | 496 - 651                         |

In considerazione di questo scenario di medio-lungo periodo gli esperti e gli organi di consulenza dello Stato si espressero fin dalla Conferenza sull'Energia dell'87 contro l'abbandono - e anzi in favore di un pronto rilancio - dell'impegno nazionale nel settore elettronucleare, posizione ribadita dall'AIN (Associazione Italiana Nucleare) anche in occasione della Conferenza Nazionale Energia Ambiente del novembre 1998.

## 6.4 La sicurezza

Premesso che il rischio zero non esiste in alcuna attività umana, va detto che, sia in assoluto sia in comparazione con altre tecnologie di produzione elettrica, il nucleare è una tecnologia sicura. I reattori nucleari occidentali sono progettati e costruiti in modo tale da prevenire rilasci indesiderati di radioattività, e tutte le caratteristiche di sicurezza si sono dimostrate realmente efficaci. Il tipo di reattore più diffuso nel mondo è quello ad acqua leggera (LWR) che può essere o ad acqua pressurizzata (PWR) o ad acqua bollente (BWR). La radioattività contenuta in un reattore in esercizio di tipo LWR va da circa 15 a circa 30 miliardi di Curie (Ci), ma le caratteristiche degli impianti fanno sì che questo carico potenzialmente pericoloso non possa entrare in contatto con l'ambiente esterno. In condizioni di normale esercizio una centrale nucleare non ha impatto sensibile sull'ambiente esterno e sulla popolazione, e anche l'esposizione radiologica di routine dei lavoratori degli impianti nucleari è costantemente diminuita negli ultimi decenni, ed è attualmente ben entro i restrittivi e ultra cautelativi limiti previsti dalla normativa.

Quanto al problema dello smaltimento delle scorie radioattive, tutti i paesi che impiegano dell'energia nucleare si sono dotati o si stanno dotando delle necessarie strutture per la gestione delle scorie prodotte entro i loro confini. Particolare rilievo va assumendo in questa fase lo svolgimento di un'azione informativa tesa a soddisfare la domanda di sicurezza in tema di radioattività, e a far sì che la società civile, attraverso la corretta percezione dei rischi e dei benefici da parte della pubblica opinione, possa continuare a giovarsi nella maniera più razionale dell'energia nucleare.

## 6.5 Il ciclo del combustibile

L'uso dell'energia nucleare richiede un complesso di infrastrutture industriali e di operazioni che includono le fasi di estrazione, macinazione e raffinazione del minerale uranifero, di fabbricazione del combustibile, di movimentazione del combustibile fresco ed esaurito, di riprocessamento o confinamento del combustibile irraggiato e di gestione delle scorie radioattive.

Il processo di estrazione del minerale uranifero espone agli effetti del radon, che ha prodotto in passato diversi casi di cancro al polmone, a partire dal 1950, nei minatori degli Stati Uniti del Sud-Ovest. Oggi questo rischio è ridotto attraverso il ricorso alla ventilazione delle miniere, che riduce la concentrazione di radon fino a valori inferiori ai limiti previsti per i lavoratori esposti.

Gli impianti che producono l'ossido di uranio per la successiva operazione di raffinazione accumulano grandi quantitativi di scorie minerali (le "code di

macinazione”) che contengono molto del radio inizialmente presente nel minerale grezzo e che emanano radon-222. Le code di macinazione costituiscono una sorgente potenziale di polveri radioattive che possono essere immesse nell’ambiente per dilavamento o per trasporto atmosferico. Per eliminare questi rischi, gli enti di controllo nazionali e internazionali hanno fissato limiti di emissione molto restrittivi. Il radon-222 è peraltro naturalmente presente nei suoli, e tende a concentrarsi negli edifici fino a determinare dosi individuali medie al polmone di 20 mSv per anno.

Un’altra componente del rischio radiologico associato all’uso dell’energia nucleare è data dalla fase di riprocessamento del combustibile irradiato, che serve a separare le componenti riutilizzabili (uranio-235 e plutonio-239) dai prodotti di fissione, e inoltre per trattare chimicamente questi ultimi fino ad una forma adatta al confinamento. Nonostante l’intenzione espressa inizialmente a livello mondiale di sottoporre a riprocessamento tutto il combustibile irraggiato, la maggior parte dei paesi ha successivamente deciso di non procedere su questa via. In questi paesi il combustibile esaurito, dopo un periodo di raffreddamento nelle piscine di decadimento delle centrali, è inserito in appositi contenitori a tenuta che vengono conservati in depositi controllati temporanei (in quasi tutti i paesi europei tali depositi sono già stati realizzati e sono attualmente in esercizio). In tal modo sarà possibile in futuro procedere al riprocessamento oppure confinare il combustibile irraggiato in depositi geologici definitivi (recentemente il dipartimento dell’energia americano (DOE) ha approvato quello della montagna dello Yucca, in Nevada, quale sito per la sistemazione definitiva delle scorie del nucleare).

In tutti i paesi industriali il trasporto di materiali radioattivi è strettamente regolamentato, e riguarda in gran parte piccoli quantitativi di radionuclidi utilizzati in esperienze di laboratorio o per scopi medici. Il trasporto dei materiali meno pericolosi richiede l’impiego di recipienti, cosiddetti di “tipo A”, che hanno requisiti di resistenza variamente definiti. I contenitori per il trasporto di materiali a radioattività intermedia (contenitori di “tipo B”) devono essere invece in grado di resistere a prove quali la caduta da un’altezza di 9 metri su una superficie dura, la caduta da oltre un metro sull’estremità di una barra d’acciaio del diametro di 15 centimetri, l’esposizione per 30 minuti a una temperatura di 800 °C, e l’immersione sotto un metro d’acqua per oltre 8 ore.

Il trasporto di materiali ad alta attività, come il combustibile irraggiato e le scorie, avviene con minore frequenza, e richiede l’impiego di contenitori speciali di grandi dimensioni (*cask*), che a causa della schermatura possono raggiungere il peso complessivo di 100 tonnellate. Si tratta in questo caso di contenitori in grado di resistere a sollecitazioni molto intense, come ad esempio l’impatto di una locomotiva alla velocità di 120 km/h.

## 6.6 Le scorie radioattive

Il problema delle scorie radioattive prodotte dalle centrali nucleari non è dissimile da quello di tutti gli altri rifiuti tossici e veleni prodotti dalle attività industriali, con la differenza che questi ultimi (arsenico, cadmio, piombo, cromo, mercurio, vanadio, etc.) danno luogo a composti di ben più lunga durata che sono talora dispersi nell'ambiente, mentre l'industria nucleare ha programmato fin dall'inizio l'immagazzinamento e il trattamento di tutte le proprie scorie. La maggior parte dei rifiuti nucleari consiste di materiali a basso livello di radioattività, usualmente comparabile con la radioattività naturale. I rifiuti ad alta attività si riducono a pochi metri cubi all'anno per centrale. Opportunamente condizionati, i rifiuti radioattivi di tutti i tipi possono essere sistemati in depositi temporanei per alcuni decenni, prima di essere smaltiti per via ordinaria (a decadimento avvenuto) o collocati in depositi geologici definitivi. Le scorie a bassa attività consistono in residui di laboratorio, materiali di consumo debolmente contaminati, protezioni antipolvere e indumenti, materiali biologici e altri rifiuti generati nell'impianto nucleare. In questa categoria rientrano anche le code di macinazione e le altre scorie generate nel processo di raffinazione del minerale uranifero. Le scorie ad alta attività sono invece costituite da due diverse categorie di prodotti: il combustibile irradiato, e i residui solidi e liquidi del ciclo del combustibile.

Per quanto riguarda la gestione delle scorie a bassa attività, i paesi industriali si sono dotati di strutture per il confinamento delle scorie a bassa attività per il tempo sufficiente a consentirne il decadimento a valori che ne consentano lo smaltimento come rifiuti ordinari.

Per quanto concerne le scorie ad alta attività, sono stati proposti e studiati numerosi metodi di confinamento, basati sulla vetrificazione e sull'isolamento geologico. Le scorie ad alta attività derivanti dal riprocessamento del combustibile o dai rifiuti di esercizio sono trattate mediante stabilizzazione in forma vetrosa o ceramica, il successivo confinamento entro contenitori metallici a prova di corrosione, l'inserimento dei contenitori in altri di materiale fortemente assorbente (allo scopo di evitare la diffusione di sostanze eventualmente sfuggite) e la deposizione definitiva in gallerie controllate ricavate in strati geologici ad elevata stabilità (strati salini, granito, basalto).

La capacità di segregazione dei depositi controllati è elevatissima. Il DOE ha calcolato che una persona che visse in prossimità del Waste Isolation Pilot Plant nel New Mexico riceverebbe una dose individuale complessiva alle ossa di  $1.1 \mu\text{Sv}$  (micro-Sievert) e una al corpo intero di  $8.7 \text{nSv}$  (nano-Sievert), cioè da 100.000 a un miliardo di volte inferiore di quella cui ognuno di noi riceve a causa della radioattività naturale.

I metodi utilizzati per prevedere le prestazioni di un deposito di scorie radioattive sono basati su modelli di diffusione, dilavamento, corrosione, solubilizzazione, trasporto e di migrazione dei radionuclidi attraverso le strutture geologiche e nella biosfera. Le evidenze sperimentali validate dall'Accademia delle Scienze statunitense inducono a ritenere che l'effettivo tasso di mobilizzazione globale dei radionuclidi possa essere di due o più ordini di grandezza inferiore a quello calcolabile applicando strettamente i modelli. Gli esempi naturali conosciuti di diffusione dei radionuclidi (il "reattore naturale" scoperto nella miniera di uranio di Oklo, in Gabon, e il vasto deposito di torio e di terre rare di Morro do Ferro, nello stato brasiliano di Minas Gerais) evidenziano comportamenti rassicuranti. Nel caso del reattore naturale di Oklo, in particolare, si è riscontrata una migrazione delle diverse specie dell'ordine di qualche metro in 2 milioni di anni, con tassi di mobilizzazione compresi fra 1/10.000.000 e 1/10.000.000.000 per anno.

### **6.7 Il rischio nell'esercizio normale**

In condizioni di normale funzionamento di un impianto nucleare, la principale causa di esposizione del personale è data dalla radioattività emessa dai prodotti di corrosione e dalle impurità presenti nell'acqua di raffreddamento del nocciolo. Dette sostanze subiscono un processo di attivazione all'atto dell'accensione del reattore, e sono trasportate in circolo nel circuito primario. La principale sorgente è rappresentata dal cobalto-60, generato dall'attivazione del cobalto-59. A questa componente si aggiunge quella dovuta all'azoto-16, isotopo radioattivo a vita media breve che si forma nel reattore per attivazione neutronica dell'ossigeno-16 costituente l'acqua di raffreddamento.

I lavoratori più esposti alle radiazioni sono quelli impegnati nei lavori di grande manutenzione del reattore, ma l'esposizione interessa anche il personale che si occupa della decontaminazione dell'impianto e della gestione dei materiali radioattivi. L'esposizione del personale della centrale può avvenire essenzialmente in occasione delle operazioni di manutenzione e di ricarica del reattore, oppure, durante il funzionamento del reattore, in seguito all'effettuazione di interventi al circuito primario. Negli impianti PWR i lavoratori possono essere esposti in occasione degli accessi all'edificio di contenimento con il reattore in funzione, mentre negli impianti BWR analoga esposizione si ha con l'accesso alla sala macchine, poiché le turbine sono alimentate direttamente col vapore generato dall'acqua che transita nel reattore. Gli impianti BWR possono essere inoltre causa di esposizione per la popolazione esterna, a causa dei possibili rilasci di vapore dalla sala macchine. L'esposizione alle radiazioni dei lavoratori e della popolazione tende per questo ad esse-

re leggermente più elevata in termini assoluti nel caso degli impianti BWR. La migliore stima dell'effetto complessivo del ricorso all'energia nucleare sulla salute è dato dalla dose assunta dai lavoratori dell'industria nucleare, che è di norma decine di volte inferiore ai limiti imposti dalla normativa vigente. I limiti di esposizione fissati per gli individui della popolazione sono una piccola frazione dei 2-3 mSv/anno assorbiti in media da ciascun individuo della popolazione dalla radiazione naturale di fondo. In pratica, la maggior parte dei reattori opera in modo tale che l'esposizione effettiva della popolazione è di gran lunga inferiore ai limiti fissati. Le dosi individuali tipiche sono molto inferiori a 1 mSv/anno al corpo intero.

## 6.8 La probabilità di incidenti

In un impianto nucleare un rilascio indesiderato di radioattività può avvenire in seguito a malfunzionamenti, anche se gli impianti sono dotati di sistemi atti ad impedire qualunque rilascio. L'evento più grave per le possibili conseguenze all'esterno dell'impianto è rappresentato dalla fusione del combustibile nel reattore (fusione del nocciolo) per difetto di raffreddamento.

Nel 1975 l'autorità di controllo nucleare statunitense (NRC) pubblicò il Reactor Safety Study (WASH 1400), più noto come "Rapporto Rasmussen", un'analisi dettagliata delle possibilità di incidente e delle conseguenze nei reattori della filiera LWR. Le conclusioni dello studio stabiliscono che la probabilità che si verifichi un incidente di fusione del nocciolo è di 1/20.000 per reattore e per anno. Lo studio conclude inoltre che in meno dell'1% dei casi di fusione del nocciolo si avrebbero rilasci radioattivi significativi all'esterno dell'impianto. In tal modo la probabilità che avvenga una fusione del nocciolo con conseguenze gravi all'esterno dell'impianto è di 1/1.000.000 per reattore e per anno.

Applicando queste cifre, se i 400 reattori nucleari in esercizio nel mondo avessero operato mediamente per 10 anni ciascuno, raggiungendo in tal modo 4.000 anni-reattore di funzionamento, la probabilità di avere un incidente di fusione senza conseguenze esterne sarebbe pari a  $1/20.000 \times 4.000 = 0,20$ , ovvero del 20% per decade. Poiché la probabilità di forti rilasci all'esterno è di 1 su 100 eventi di fusione, la probabilità di fusione con conseguenze esterne è di 2 per secolo. Il tutto con riferimento alle caratteristiche della filiera LWR tipiche dei primi anni Settanta, e senza considerare i significativi avanzamenti intervenuti nelle sue caratteristiche e dotazioni di sicurezza dai tempi dello studio WASH 1400.

A tale proposito, dopo il Rapporto Rasmussen oltre due dozzine di altri studi ne hanno sostanzialmente confermato le conclusioni per quanto riguarda le

probabilità di fusione, ma hanno sensibilmente ridotto le stime dei quantitativi di radioattività che sarebbero rilasciati nel corso dell'incidente. A valle del disastro di Chernobyl, le specifiche di progetto elaborate dagli esercenti europei nell'ambito delle European Utility Requirement (EUR) hanno ulteriormente elevato di un fattore 1000 la sicurezza delle installazioni LWR di tecnologia occidentale.

In caso di incidente nucleare con conseguenze all'esterno, l'esposizione alla radioattività può avvenire in tre modi: per irraggiamento diretto dalla nube radioattiva generata dall'incidente, per inalazione di radioisotopi e per esposizione alla radioattività depositata al suolo, che rimane anche dopo il dissolvimento o il passaggio della nube. L'esperienza di Chernobyl ha dimostrato che anche nei rilasci più intensi l'esposizione alla nube e l'inalazione non sono tali da determinare dosi letali. Simili livelli possono essere raggiunti solo attraverso l'azione concomitante dei tre contributi per molte ore. La dose a lungo termine per la popolazione è determinata in larga misura dal cesio-137, mentre la dose alla tiroide è determinata essenzialmente dagli isotopi radioattivi dello iodio, in particolare lo iodio-131. In generale, i maggiori contributi all'esposizione complessiva nelle prime 24 ore da un eventuale incidente sono dovuti agli isotopi del cesio, dello iodio, del tellurio, del bario e del lantanio.

L'esposizione a tutti e tre i meccanismi può essere ridotta restando all'interno degli edifici, specialmente in locali interrati, almeno fino all'avvenuto passaggio della nube, ed evacuando successivamente la zona interessata, almeno entro il raggio di pochi chilometri, quando è passato il rischio di esposizione alla nube. Nel frattempo l'esposizione della tiroide allo iodio radioattivo può essere limitata utilizzando in modo proprio (nel giusto dosaggio quantitativo e temporale) i farmaci tireobloccanti, come lo ioduro di potassio.

In caso di grosso rilascio di radioattività, gli individui della popolazione possono essere interessati da esposizioni entro un vasto intervallo. Le esposizioni più ingenti determinano la comparsa della sindrome da radiazioni e di effetti acuti; ma solo in caso di totale fallimento delle misure di protezione civile ci si può attendere un elevato numero di persone in questo gruppo. Il WASH 1400 stima che in questo gruppo possano esserci 3.000 persone in caso di mancata evacuazione, e la probabilità associata a un simile evento è stimata in 1/1.000.000 anni-reattore. Gli studi più recenti, basati su stime più realistiche della frazione di radioattività rilasciata, stimano che il numero delle persone irradiate in modo severo sia molto inferiore. Basti pensare che a Chernobyl, delle 237 immediatamente ospedalizzate perché affette da sindrome acuta ne sono decedute, a oggi, 42. E' più probabile che in seguito ad un incidente un numero significativo di persone possa ricevere dosi com-



prese fra 0.1 e 1 Sv. Queste dosi non determinano sintomi acuti, ma la popolazione esposta sarebbe comunque sottoposta a stress emotivo e apprensione (gli episodi di Three Mile Island e Chernobyl hanno dimostrato che anche persone non esposte a radiazioni hanno manifestato una serie di sintomi di origine emotiva). Infine, un incidente di fusione con conseguenze esterne interesserebbe un grande numero di persone con dosi minori di 0.1 Sv (nel caso di Chernobyl in questo gruppo si contarono almeno 100.000 persone).

Gli impianti LWR di tecnologia occidentale, grazie alle loro caratteristiche strutturali e alla presenza dell'edificio di contenimento, non sono esposti a disastri del tipo verificatosi a Chernobyl. E' molto più probabile, invece, che l'evoluzione di una fusione del nocciolo possa essere quella avvenuta a Three-Mile Island. In seguito all'incidente di Chernobyl, in una situazione in cui non esisteva alcun sistema atto ad impedire la fuoriuscita di radioattività dal reattore incidentato e in cui non furono prese misure di evacuazione prima di 48 ore dopo l'incidente, la dose di radioattività media nelle 3 aree maggiormente contaminate è stata di 36 mSv. A Three-Mile Island, in presenza di un incidente di fusione del 60% del nocciolo, il sistema di contenimento funzionò a dovere, e la dose massima per una persona all'esterno dell'impianto fu in quel caso minore di 1 mSv, mentre la dose individuale per consumo di latte contaminato fu stimata inferiore a 0.2 mSv. Ancora una volta ricordiamo che esistono popolazioni esposte ad una dose naturale di diverse decine di mSv/anno senza che si osservi in esse alcun danno alla salute.

## 6.9 L'innovazione tecnologica e la sicurezza

La spinta verso la messa a punto di tecnologie radicalmente nuove in campo nucleare si è stemperato nell'ultimo decennio a causa dell'aumento dei costi di sviluppo e della contrazione delle prospettive di sbocco per le installazioni di tipo radicalmente innovativo. Ciò ha convinto i principali costruttori ad accordare priorità al miglioramento - talvolta anche sostanziale - delle configurazioni impiantistiche mature e alla loro evoluzione attraverso cambiamenti ispirati all'esperienza acquisita. Le principali eccezioni al calo di interesse per le configurazioni impiantistiche innovative riguardano i reattori di piccola e media potenza, per i quali sono possibili nuovi importanti sbocchi, soprattutto in considerazione dei vantaggi apportati dalla semplificazione e dalla modularità. In questo campo anche l'Italia ha formulato proposte tecniche di rilievo, con speciale riferimento al reattore modulare MARS progettato presso l'Università di Roma.

Considerazioni analoghe possono essere espresse per la tecnologia dei reattori veloci autofertilizzanti a metallo liquido, verso la quale si sta registrando

un calo di interesse dettato principalmente dall'abbondanza e dal basso costo del combustibile nucleare. Le esperienze condotte e i prototipi realizzati hanno tuttavia consentito a diversi paesi di padroneggiare anche questa tecnologia innovativa che, pur non rivestendo interesse economico nell'immediato, è disponibile per gli sviluppi di medio e lungo termine. L'esperienza condotta a livello mondiale in quarant'anni di sviluppo della tecnologia dei reattori nucleari occidentali ha dimostrato ampiamente la loro elevatissima sicurezza.

Pur essendo gli impianti nucleari in esercizio nei paesi occidentali sufficientemente sicuri, le specifiche di progetto che si sono diffuse nell'ultimo decennio a livello internazionale consentono oggi di realizzare impianti capaci di impedire qualsiasi contaminazione esterna anche nelle peggiori condizioni incidentali. I nuovi criteri di sicurezza elaborati per i reattori dell'ultima generazione sono stabiliti sulla base di un approccio su tre livelli:

- la riduzione della frequenza di accadimento e della severità degli incidenti attraverso l'aumento dei margini di progetto e la semplificazione dell'impianto;
- l'introduzione di sistemi atti a prevenire il danneggiamento del nocciolo anche in caso di incidente;
- l'adozione di sistemi di contenimento in grado di impedire ogni fuoriuscita di radioattività anche in caso di danneggiamento del nocciolo.

I nuovi requisiti di sicurezza riducono a un evento ogni 100mila anni la probabilità di danneggiamento del nocciolo, e a un evento ogni milione di anni la probabilità che un ipotetico individuo residente alla recinzione della centrale possa assumere una dose pari a quella annuale dovuta al fondo ambientale. Questi requisiti equivalgono ad affermare il principio che il rischio di danno di origine nucleare per un individuo della popolazione deve essere inferiore all'1% del rischio derivante da tutte le altre attività industriali: nessun'altra attività industriale, per quanto rischiosa, è stata mai assoggettata a restrizioni analoghe.

### **6.10 Il rischio comparato ad altre fonti d'energia**

La generazione di energia elettrica comporta rischi associati alle fasi di estrazione del combustibile, al trasporto, alla generazione di potenza e allo smaltimento delle scorie, qualunque sia la tecnologia di generazione usata. Una stima comparativa dei rischi associati al carbone e alla fonte nucleare è stata condotta nei primi anni Settanta e successivamente aggiornata da un gruppo

di ricercatori del Brookhaven National Laboratory. I risultati evidenziano che per il carbone la morbilità e la mortalità sono determinate principalmente dalla fase di estrazione e dall'inquinamento, mentre subito dopo viene il trasporto. Se il carbone è estratto dal sottosuolo e trasportato su rotaia, il ciclo del combustibile produce 279 infortuni e malattie e 18,1 decessi per gigawatt-anno. In contrapposizione, il ciclo del combustibile nucleare, con uranio estratto dal sottosuolo, produce 17,3 infortuni e malattie e 1 decesso per gigawatt-anno.

Una approfondita valutazione comparativa del rischio associato alle diverse fonti di produzione elettrica con specifico riferimento alla situazione italiana è stata condotta nell'ambito della Conferenza nazionale sull'energia del 1987 dal gruppo di lavoro "Ambiente e Sanità" presieduto dal prof. Umberto Veronesi, tenendo conto delle risposte contenute nei 79 questionari pervenuti alla commissione con riferimento a nove fattori rilevanti: l'emissione di anidride carbonica (causa presunta dell'effetto serra), l'emissione di ossidi di zolfo (causa di acidificazione dell'ambiente e di affezioni polmonari), l'emissione di ossidi di azoto (acidificazione dell'ambiente, perturbazione dell'ozonofera, formazione di nitrosamine cancerogene), l'emissione di polveri (impatto ambientale, affezioni polmonari, cancerogenesi), l'emissione di monossido di carbonio (effetto tossico immediato), l'emissione di sostanze genotossiche (cancerogene e mutagene), gli effetti dello smaltimento delle scorie e gli effetti di eventuali incidenti. Il lavoro del gruppo di Veronesi è improntato a un'analisi qualitativa e quantitativa dei diversi effetti con riferimento a un impianto della potenza di 1 GWe alimentato con le diverse fonti possibili.

Una centrale a carbone da 1 GWe consuma annualmente circa 2 milioni di tonnellate di carbone, equivalenti a circa 2 milioni di metri cubi. L'impatto sanitario inizia dalla fase di estrazione del carbone: gli incidenti in miniera sono responsabili su base statistica di decessi che vanno da qualche frazione a qualche unità all'anno. Sono inoltre valutabili in una decina all'anno i casi mortali di antracosi contratta in miniera. Il trasporto del carbone alla centrale, effettuato ipoteticamente per ferrovia, richiede la movimentazione di 1.000 carri al giorno, con infortuni e decessi fra i lavoratori (da zero a quattro all'anno) e fra la popolazione (da zero a due all'anno). A seconda del tipo di intervento sull'abbattimento delle emissioni, nel funzionamento dell'impianto ogni anno si producono da 6 a 7,4 milioni di tonnellate di  $\text{CO}_2$ , da 1.000 a 2.000 t di CO, da 5.400 a 119.000 t di  $\text{SO}_x$ , da 8.500 a 27.000 t di  $\text{NO}_x$ , da 1.000 a 4.170 t di particolati e da 0,02 a 0,06 mSv di radiazioni.

Un impianto termoelettrico da 1 GWe a olio combustibile richiede 1.5 Mt/anno di combustibile, alla cui movimentazione si può associare statistica-

mente un rilascio in mare di 750 tonnellate di greggio, di cui 500 per operazioni di routine e 250 per incidenti. A seconda delle tecnologie adottate, il funzionamento dell'impianto genera ogni anno da 4.2 a 6.1 Mt di CO<sub>2</sub>, da 630 a 720 t di CO, da 4.500 a 80.000 t di SO<sub>x</sub>, da 4.000 a 25.000 t di NO<sub>x</sub>, da 30 a 5.400 t di particolati e in media 0,00004 mSv di radioattività. Per un impianto a gas da 1 GWe gli effetti sull'ambiente sono molto più contenuti. Ogni anno esso produce da 3 a 4.4 Mt di CO<sub>2</sub>, 510 t di CO, 20 t di SO<sub>x</sub>, da 8.000 a 22.000 t di NO<sub>x</sub>, da 135 a 520 t di particolati e da una notevole quantità di radon.

Allo sfruttamento dell'energia geotermica è sempre associata la liberazione nell'ambiente di gas incondensabili contenenti elevati tenori di arsenico e mercurio.

Le fonti eolica, idroelettrica, fotovoltaica e solare termica non presentano fenomeni di inquinamento paragonabili a quelli degli impianti termoelettrici e nucleari. Non devono tuttavia essere sottovalutati gli impatti sul territorio e sull'ambiente. Questi si manifestano, nel caso dell'idroelettrico - a parte la fase iniziale delle operazioni di cantiere - con grosse alterazioni dell'assetto idrogeologico e climatico del sito, con la necessità di realizzare grandi bacini di accumulo, con la sottrazione di risorse idriche ad altri usi e con la drastica riduzione di portata dei corsi d'acqua; nel caso dell'eolico con l'occupazione del suolo e con il forte rumore emesso dalle pale; nel caso del solare termico e fotovoltaico con l'occupazione del suolo attraverso i captatori. Nel caso dell'idroelettrico, inoltre, se è nullo l'impatto sulla salute in condizioni di esercizio, la probabilità di incidenti catastrofici (rottura o tracimazione delle dighe) è la più alta fra quelle calcolate nel campo dell'elettroproduzione.

Per un impianto nucleare equivalente l'unico impatto ambientale durante l'esercizio consiste nell'emissione di 0,02-0,06 mSv/anno di radiazioni, fatto che non presenta aspetti degni di rilievo sotto il profilo sanitario, visto che la dose media annua cui tutti noi siamo esposti è di circa 2 mSv (e che vi sono zone del mondo ove tale dose è anche 50 volte superiore, senza che si siano osservati alterazioni sanitarie di alcuna natura per la popolazione di quelle zone). I potenziali problemi di impatto sull'ambiente e sulla salute della popolazione sono in questo caso associati ai rilasci accidentali dovuti a possibili anomalie di funzionamento dell'impianto, e inoltre alle fasi di trattamento del combustibile e di smaltimento delle scorie. Il disastro di Chernobyl ha dimostrato che simili inconvenienti possono avere conseguenze molto gravi, ma il precedente incidente occorso alla centrale di Three-Mile Island ha altresì dimostrato che in un impianto di tecnologia occidentale è possibile impedire o limitare sostanzialmente il rilascio di radioattività nell'ambiente anche in caso di incidente grave.

## 6.11 Energia nucleare e i gas serra

All'interno del sistema energetico dei paesi industriali, l'energia nucleare è quella che fornisce - e può ulteriormente fornire - il maggior contributo alla riduzione dell'emissione di gas serra. Secondo i dati recentemente diffusi dall'OECD-NEA, l'energia elettronucleare, nell'intero ciclo di utilizzazione (estrazione e trasformazione delle risorse, costruzione ed esercizio degli impianti), registra un'emissione di gas serra compresa fra 2.5 e 5.7 grammi di carbonio equivalente per kilowattora prodotto, contro i 105-366 g/kWh delle fonti fossili e i 2.5-76 g/kWh delle fonti rinnovabili.

I 440 reattori nucleari attualmente in funzione nel mondo consentono di evitare l'immissione in atmosfera di 1.2 miliardi di tonnellate di CO<sub>2</sub> all'anno. Tale quantitativo è quello che si immetterebbe nell'atmosfera sostituendo gli impianti nucleari con centrali termoelettriche che incorporino le migliori tecnologie di controllo delle emissioni attualmente disponibili. Esso rappresenta il 10% delle attuali emissioni complessive di CO<sub>2</sub> del sistema energetico e il 17% delle emissioni di CO<sub>2</sub> del sistema elettrico.

L'esperienza condotta dai paesi che hanno fatto estensivo ricorso al nucleare per la produzione di energia elettrica dimostra che i vantaggi ambientali sono ben quantificabili. Uno studio recente condotto dal Commissariato francese per l'energia atomica (CEA) dimostra che la mancata realizzazione del programma nucleare francese si sarebbe tradotta con orizzonte 2000 in un forte incremento delle emissioni di SO<sub>2</sub> (+0,5 Mt/anno, ovvero +30% rispetto ai livelli attuali), NO<sub>x</sub> (+0,7 Mt/anno, ovvero +40%) e CO<sub>2</sub> (+340 Mt/anno, ovvero +90%). In Francia il livello di emissione di CO<sub>2</sub> era nel '73 di 530 Mt/anno, mentre oggi è ridotto a 387 Mt/anno.

Dal momento che nei paesi industriali la capacità idroelettrica è ormai integralmente sfruttata, e dal momento che le altre fonti rinnovabili (solare, eolico) hanno e conserveranno in futuro un ruolo marginale nella copertura del fabbisogno (si vedano in proposito le previsioni del programma europeo ALTENER), l'eventuale sostituzione dell'energia nucleare dovrebbe forzatamente avvenire aumentando il ricorso alle fonti fossili, circostanza che determinerebbe un aumento delle emissioni di gas serra incompatibile con l'applicazione del protocollo di Kyoto.

## 7. Conclusioni

Le sfide prioritarie nel settore energetico sono quelle della sicurezza, dell'accessibilità alle fonti energetiche da parte di porzioni sempre più ampie della

popolazione mondiale, e della riduzione di emissioni dannose a fronte di una domanda energetica sempre maggiore in concomitanza con una auspicabile crescita economica.

La questione della sicurezza ci interessa poco in questo documento, ma non per questo deve essere sottovalutata: essa, anzi, è di importanza fondamentale. I problemi geopolitici ad essa associati sono una conseguenza della necessità di mantenere l'accesso al petrolio da cui dipende quasi totalmente il sistema dei trasporti mondiale e, presto, saranno una conseguenza anche della necessità di mantenere l'accesso al gas naturale.

Anche la questione dell'accessibilità alle fonti energetiche anche a quei 2 miliardi della popolazione mondiale che non ha accesso alla corrente elettrica esula dagli scopi di questo documento. Tuttavia, l'estensione di quote di energia a porzioni sempre più ampie di popolazione mondiale, necessaria per mantenere stabilità e pace e garantire benessere, avrà l'effetto di accrescere l'importanza della terza questione: quella ambientale.

Le principali preoccupazioni legate alla salvaguardia dell'ambiente dipendono, infatti, dall'uso dell'energia. E' pertanto necessario lo sviluppo di tecnologie pulite, efficienti ed economiche, ma anche, e soprattutto, di politiche energetiche che, orientate in questo senso, si poggino su solide basi scientifiche.

In particolare, non bisogna farsi molte illusioni sulla possibilità di ridurre significativamente la dipendenza dai combustibili fossili: per i prossimi decenni essi continueranno a fornire il 75%, o forse più, dell'energia necessaria e, in particolare, continuerà ad aumentare la domanda di gas naturale, soprattutto in concomitanza con l'aumento di domanda di elettricità.

A questo proposito, sembra essere quasi inevitabile l'ammodernamento degli impianti esistenti e la costruzione di nuove centrali se si desidera garantire sia un minore inquinamento sia un migliore rendimento; sarebbe pertanto fondamentale avviare presso la popolazione una adeguata campagna di informazione corretta e trasparente per evitare che il processo di ammodernamento possa essere ostacolato dalla formazione di gruppi di opinione più o meno spontanei ma, spesso, purtroppo, espressioni di immotivate preoccupazioni emergenti da ignoranza, disinformazione e strumentalizzazione.

La moderna tecnologia offre interessanti prospettive per affrontare al meglio la questione ambientale (ad esempio, le centrali a ciclo combinato e quelle a cogenerazione di elettricità e calore; o, nel lungo periodo, la possibilità di usare materiali superconduttori nelle linee di trasmissione).

A prescindere dalle controverse posizioni scientifiche sulle questioni legate al contributo antropogenico all'effetto serra, alla possibilità che interventi umani possano significativamente influire sui processi climatici e, infine, alla necessità di ridurre le emissioni di anidride carbonica, va detto che per raggiun-

gere gli obiettivi di emissione di anidride carbonica previsti dalle recenti decisioni politiche, è necessario aumentare di un ordine di grandezza l'apporto energetico da fonti che non emettono gas-serra. E ciò significa, se si vuole essere coerenti, di rivedere la posizione globale rispetto alla fonte nucleare. Certamente non vi sono soluzioni magiche al problema, che stiamo affrontando in questo capitolo, di poter mantenere, attraverso l'accesso all'energia, il livello di benessere salvaguardando allo stesso tempo l'ambiente. Alcuni suggerimenti potrebbero comprendere: investire in tecnologia rispettosa dell'ambiente, migliorare l'efficienza, ammodernare le infrastrutture esistenti, non trascurare nessuna fonte, non privilegiare nessuna fonte, rimettersi ai pareri delle competenze scientifiche, informare in modo trasparente e attendibile i cittadini dei rischi e dei costi conseguenti non solo al fare ma anche al non-fare.

## BIBLIOGRAFIA

- S.F. Baldwin, *Renewable energy: progress and prospects*, Physics Today, April 2002, p. 62.
- S.G. Benka, *The energy challenge*, Physics Today, April 2002, p. 38.
- J.L. Bobin, H. Nifenecker e C. Stéphan: *L'énergie dans le monde: bilan et perspectives*, Société française de physique, EDP Sciences, 2001.
- S. Dreffreys, *Hubbert's peak: the impending world oil shortage*, Princeton University Press, 2001.
- G. De Rita, *I consumi di energia elettrica in Italia*, in *Storia dell'industria elettrica in Italia*, a cura di Giovanni Zanetti, Laterza, 1994, vol. 5, p. 411.
- G. Fochi, *Il Sole-24 Ore*, 13.5.2001, p. 10.
- A. Girelli, *La Chimica e l'Industria* **84**, 31 (maggio 2002).
- M.K. Hubbert, *The world's evolving energy system*, Am. J. Phys. **49**, 1007 (1981).
- J.L. Hubisz, *Where's the oil?*, Phys. Teacher **40**, 319 (2002).
- G.H. Marcus and A.E. Levin, *New designs for the nuclear renaissance*, Physics Today, April 2002, p. 54.
- E.J. Moniz and M.A. Kenderdine, *Meeting energy challenges: technology and policy*, Physics Today, April 2002, p. 40.
- J.M. Ogden, *Hydrogen: the fuel of the future?*, Physics Today, April 2002, p. 69.
- I. Pasquon, *La Chimica e l'Industria* **84**, 9 (marzo 2002).
- Spadaro, J.V., Langlois, L. and Hamilton, B., *Greenhouse Gas Emissions of Electricity Generation Chains: Assessing the Difference*, IAEA Bulletin, 42/2/2000, Vienna, Austria, 2000.
- F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria* **83**, 9 (settembre 2001).
- F. Trifirò, *La Chimica e l'Industria* **84**, 7 (marzo 2002).
- Watson, R.T., Chair of the IPCC, *Presentation to the Sixth Conference of the Parties to the UNFCCC*, 19 July 2001 (<http://www.ipcc.ch/press/COP6.5>).
- AMA, American Medical Association: *Medical Perspective on Nuclear Power*, Rapporto del Comitato consultivo nominato dal Council on Scientific Affairs, 1992.
- Atti della Conferenza nazionale sull'energia, novembre 1987.
- Centre of Geopolitics of Energy and Raw Materials, *Scenarios of Nuclear Power Growth in the 21st Century*, ISBN 2-9518078-0-5, Paris, France, 2002.
- Comitato Scientifico, A.N.P.A., "Scienza e ambiente — conoscenze scientifiche e priorità ambientali", Documenti, 1/2002, pp. 126-128.
- Fuel from biomass*, in Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 3<sup>o</sup> ed., 1980, vol. 11, p. 334.



C.N.R.-Commissione per la diffusione della cultura scientifica, Accademia Nazionale delle Scienze (detta dei XL), Fondazione "Adriano Olivetti", Unione dei Giornalisti Italiani Scientifici, "Biocombustibili tra realtà e illusioni", Roma, 14 gennaio 2002.

DEFRA (Department for Environment, Food and Rural Affairs), *Auction Success for UK Emissions Trading Scheme*, News Release, <http://www.defra.gov.uk/news/2002/020313c.htm>, London, 13 March 2002.

Gruppo di Supporto Tecnico-Scientifico Bioenergia, Ministero delle Politiche Agricole e Forestali, "Rapporto sullo stato della bioenergia in Italia al 2001", Roma, aprile 2002.

IAEA (International Atomic Energy Agency), *Nuclear Power for Greenhouse Gas Mitigation under the Kyoto Protocol: The Clean Development Mechanism (CDM)*, Vienna, Austria, November 2000.

IAEA (International Atomic Energy Agency), *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2020, Reference Data*, Series No. 1, Vienna, Austria, July 2001.

IEA (International Energy Agency), *Nuclear Power: Sustainability, Climate Change and Competition*, Paris, France, 1998.

IEA (International Energy Agency), *World Energy Outlook 2000*, Paris, France, 2000.

IEA (International Energy Agency), *World Energy Outlook: Assessing Today's Supplies to Fuel Tomorrow's Growth – 2001 Insights*, Paris, France, 2001.

IEA (International Energy Agency), *Nuclear Power in the OECD*, Paris, France, 2001.

IEA (International Energy Agency), *International Emission Trading: From Concept to Reality*, Paris, France, 2001.

III Seminario del Programma Nazionale Biocombustibili PROBIO, organizzato dal Gruppo di Supporto Tecnico-Scientifico Bioenergia del Ministero delle Politiche Agricole e Forestali e dalla Scuola Superiore Sant'Anna di Studi Universitari e di Perfezionamento, Pisa, 22 aprile 2002.

IPCC Third Assessment Report, *Climate Change 2001: the Synthesis Report*, Cambridge University Press, 2001. (see also: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*; *Climate Change 2001: Impacts, Adaptation and Vulnerability*; *Climate Change 2001: Mitigation*). Si veda anche <http://www.unfccc.int> for the legal texts of the UNFCCC and the Kyoto Protocol.

Issues in the Negotiating Process – Kyoto Protocol Mechanisms: Joint Implementation, *The Clean Development Mechanism and Emissions Trading*, 25 July 2001, <http://www.unfccc.de/issues/mechanisms>.

OECD Environment Directorate and IEA (International Energy Agency), *Designing the Clean Development Mechanism: Operational and Institutional Issues*, Paper for

the 2000 Forum on Climate Change, COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2000)2, 25 May 2000.

OECD Environment Directorate and IEA (International Energy Agency), *Options for Project Emission Baselines*, OECD/IEA Information Paper COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2000)8, 1 June 2001. 52

OECD Environment Directorate and IEA (International Energy Agency), *Kyoto Mechanisms, Monitoring and Compliance*, COM/ENV/EPOC /IEA/SLT(2001)9, 2001.

OECD/NEA (Nuclear Energy Agency) and IEA (International Energy Agency), *Projected Cost of Generating Electricity: Update 1998*, Paris, France, 1998.

OECD/NEA (Nuclear Energy Agency), *Nuclear Power and Climate Change*, Paris, France, 1998.

OECD/NEA (Nuclear Energy Agency), *Nuclear Energy Data*, Paris, France, 2001.

OECD/NEA (Nuclear Energy Agency), *Nuclear Energy in a Sustainable Development Perspective*, Paris, France, 2001.

OECD/NEA (Nuclear Energy Agency), *Nuclear Energy and the Kyoto Protocol*, Paris, 2002

*Summary for Policy Makers: A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, approved by IPCC Member governments in Shanghai in January 2001.

UNEP (United Nations Environment Programme), *Climate Change Information Kit*, New York, October 2001.

WEC (World Energy Council), *Energy for Tomorrow's World – Acting Now!*, WEC Statement 2000, London, United Kingdom, 2000.

# Sul contributo antropogenico ai cambiamenti climatici

## 1. Premessa

Sono ormai dieci anni che, con la Convenzione sui Cambiamenti Climatici presentata alla Conferenza di Rio del 1992, si è cercato di dare una risposta alle crescenti preoccupazioni che le attività umane potessero essere la causa delle apparenti alterazioni del clima riscontrabili a livello planetario. La scelta della Convenzione fu quella di impegnare per primi i Paesi industrializzati a stabilizzare volontariamente le proprie emissioni di gas ad effetto serra, al fine di dare tempo ai sistemi naturali di adattarsi ai cambiamenti climatici in atto. All'epoca, come poi si è ripetuto recentemente per le posizioni critiche assunte da alcune nazioni industrializzate sul Protocollo di Kyoto, la mancanza di supporto scientifico giustificativo fu una delle ragioni che portarono all'esclusione di impegni di tipo legalmente vincolante dal testo della Convenzione.

Cercare di analizzare ora lo stato delle conoscenze scientifiche sui cambiamenti climatici non serve solo a stabilire le conseguenze della ratifica di un trattato internazionale, rispettato o meno, ma può tornare utile anche a valutare le modalità di controllo di tali cambiamenti e le conseguenze e gli impatti che il mancato controllo potrebbero avere.

Occorre pertanto cercare di mettere in risalto quali aspetti della complessa problematica legata ai cambiamenti climatici possano dirsi relativamente condivisi dalla comunità scientifica internazionale e quali siano invece le aree di incertezza non ancora risolte o controverse. In particolare è necessario distinguere tra i fatti, le ipotesi, le assunzioni, le simulazioni e le semplici congetture.

## 2. Fonti delle conoscenze

Le conoscenze più aggiornate sullo stato della scienza del clima sono contenute in tre sorgenti: il Terzo Rapporto di Valutazione (TAR: Third Assessment Report) dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) che è un'organismo delle Nazioni Unite, il rapporto del 2001 della *National Academy of Sciences* (NAS) statunitense, e il rapporto *Climate Science and Policy: making the connection* dell'*European Science and Environment Forum* (ESEF) che contiene un'analisi critica dei primi due.

Il TAR dell'IPCC contiene, in oltre 2500 pagine, i rapporti dei tre gruppi di lavoro dell'organismo dell'ONU, poi riassunti in un rapporto sintetico indirizzato ai responsabili politici. I rapporti dell'IPCC contengono molte conclusioni, le principali delle quali sono le due seguenti: (i) il riscaldamento globale

osservato negli ultimi 50 anni è attribuibile per lo più alle attività umane, e (ii) si prevede un ulteriore significativo riscaldamento nel corso del secolo a venire. Questi sono i punti-chiave delle conclusioni dei lavori dell'IPCC, e ogni altra conclusione - sull'innalzamento del livello dei mari, sull'impatto sui sistemi naturali e umani, etc. - consegue dalle prime due. Queste conclusioni, disseminate in ordine sparso da molti organi di informazione hanno costituito oggetto di dibattito politico, senza l'accortezza di mantenere distinzione tra fatti e congetture.

Bisogna anche tenere presente che l'IPCC non è un organismo puramente scientifico, come spesso viene presentato. Di esso fanno parte, sì, molti esperti di climatologia, ma, oltre ad economisti e sociologi, anche rappresentanti governativi, rendendo così le procedure di stesura dei rapporti di quell'organismo una sorta di via di mezzo tra l'analisi critica della totalità delle risultanze scientifiche e la negoziazione politica tra i vari governi. In particolare, è necessario non trascurare il fatto che - come recita proprio la prima affermazione contenuta nei principi che dovrebbero governare il lavoro dell'IPCC approvati a Vienna nel 1998 - "nel prendere decisioni, nella stesura e approvazione dei propri rapporti, l'IPCC e i suoi gruppi di lavoro adotteranno ogni sforzo per raggiungere consenso". Ma una scienza basata sul consenso ad ogni costo più che ridurre le incertezze dà solo l'illusione di una certezza. Il consenso scientifico non si conquista attraverso procedure di negoziazione, ma si acquisisce esclusivamente fondandosi sui fatti. Se essi sono, per qualche ragione, poco noti o di dubbio esito, non vi è nulla che possa contribuire al raggiungimento di un consenso diverso da quello dell'accettazione di quei dubbi o di quell'ignoranza e, conseguentemente, diverso da quello di auspicare nuovi studi e nuove ricerche che possano aggiungere conoscenze e sbiadire i dubbi.

Il rapporto NAS statunitense nacque come risposta alle seguenti due istanze poste dalla Casa Bianca all'Accademia: (i) assistenza nell'identificare le aree della scienza del clima ove vi fossero le maggiori certezze e le maggiori incertezze, e (ii) accertare se e ove vi fossero sostanziali differenze tra i rapporti originali dei gruppi di lavoro dell'IPCC e i rapporti riassuntivi destinati ai responsabili politici. Il NAS, nel rispondere a quest'ultima domanda, ha affermato che "i rapporti riassuntivi destinati ai responsabili politici pongono meno enfasi sulle incertezze presenti nelle affermazioni dei rapporti originali" ed ha espresso preoccupazione che "senza la comprensione delle fonti e dell'entità di quelle incertezze, i responsabili politici potrebbero fallire nelle decisioni necessarie per affrontare il problema del riscaldamento globale".

Gli studi sopra citati, soprattutto il TAR e il Rapporto della NAS, segnano una vera e propria svolta nella scienza del clima, non solo per quanto riguarda

la disponibilità di una metodologia che finalmente consenta di confrontare i risultati delle simulazioni dei vari modelli, ma anche perché contengono informazioni di fondamentale importanza per impostare un buon processo informativo per i responsabili politici.

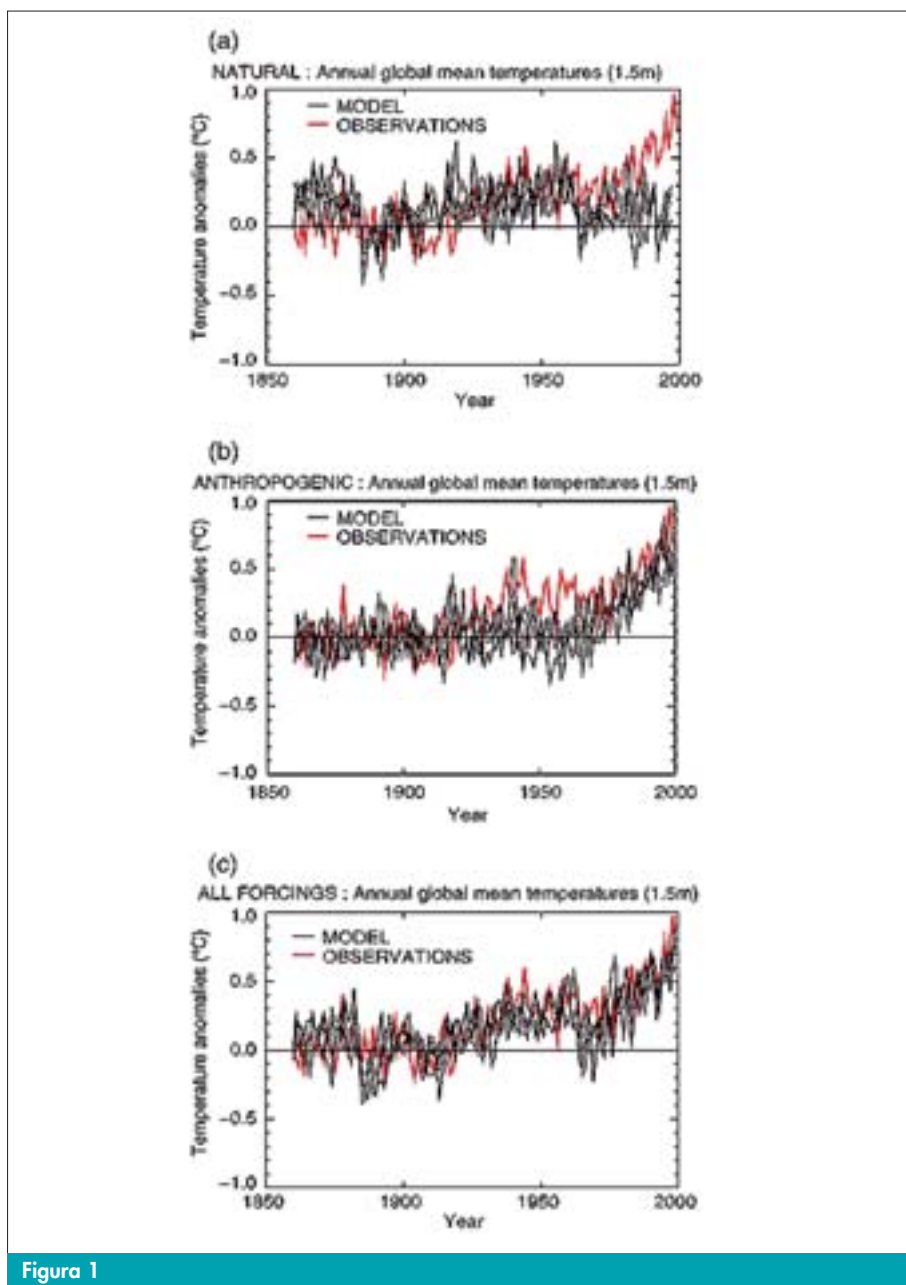
### 3. Stato delle conoscenze

#### 3.1 Contributo antropogenico al riscaldamento globale

Il contributo del *Working Group I* al Terzo Rapporto di Valutazione (TAR) rafforza le conclusioni del Secondo Rapporto di Valutazione (SAR) sul riscaldamento in atto del pianeta e sull'origine umana di questo fenomeno e di altri ad esso correlati, come la diminuzione della copertura nevosa e dell'estensione dei ghiacciai. In particolare, durante questo secolo la temperatura media sulla superficie terrestre è aumentata di circa 0.6°C. Il riscaldamento registrato nel corso del XX secolo nell'emisfero settentrionale è stato superiore a quello di qualsiasi altro secolo negli ultimi 1000 anni e gli anni '90 sono stati il decennio più caldo.

Se il Secondo Rapporto di Valutazione affermava che "l'insieme delle valutazioni suggerisce una discernibile influenza umana sul sistema climatico", il Terzo conclude invece in modo più perentorio che "ci sono nuove e più forti prove che la maggior parte del riscaldamento osservato negli ultimi 50 anni sia dovuto ad attività umane".

L'affermazione secondo cui "la maggior parte del riscaldamento osservato è attribuibile alle attività umane" si fonda sul confronto tra la temperatura media superficiale osservata a partire dal 1861 e simulazioni al computer che coprono lo stesso periodo. Queste simulazioni hanno cercato di riprodurre i dati di temperatura dal 1861 al 2000 includendo (a) le sole variabili naturali (limitandosi però solo alle variabilità solari e alle eruzioni vulcaniche), (b) le sole variabili antropogeniche (gas-serra e aerosol), e (c) entrambi i tipi di variabili (si veda la figura 1).



Con le sole variabili naturali (figura 1a) i modelli hanno fornito un discreto accordo coi dati per la prima metà del secolo ed un accordo scadente durante la successiva metà; usando le sole variabili antropogeniche l'accordo è stato scadente per la prima metà del secolo e discreto nella seconda metà (figura 1b); infine, inserendo entrambi i tipi di variabili, l'accordo è stato discreto lungo tutto il periodo considerato (figura 1c). Siccome i calcoli modellistici con le sole variabili naturali prevederebbero una diminuzione di temperatura durante gli ultimi 50 anni, mentre quelli con entrambi i tipi di variabili offrono un discreto accordo coi dati, l'IPCC ha concluso che sono state le attività umane le responsabili del riscaldamento globale osservato. Esistono alcune punti su cui esiste un generale accordo da parte della comunità scientifica mondiale, in particolare:

- Viene riconosciuto il riscaldamento dell'atmosfera registrato nel XX secolo (tra  $+0.4$  e  $+0.8^{\circ}\text{C}$ ), con una particolare accentuazione negli ultimi venti anni, anche se tale *trend* non è omogeneo su tutto il globo e risulta concentrato negli anni tra il 1910 e il 1945, e poi tra il 1975 ed oggi, e anche se non è in linea con l'andamento delle temperature nella troposfera negli ultimi 20 anni a causa di fenomeni non ancora perfettamente noti; viene inoltre riconosciuto che tale riscaldamento si è verificato in presenza di variabilità naturali difficilmente calcolabili a causa della dispersione spaziale dei relativi dati, della scala temporale per la quale occorre calcolare i valori di temperatura, della necessità di avvalersi di dati indiretti, etc.
- Si concorda circa l'aumento fatto registrare dalla concentrazione di gas-serra con particolare riferimento a quello registrato negli ultimi 50 anni (anni in cui erano disponibili sistemi di misura ad alta precisione). Tale aumento di concentrazione è stato confermato dalle misure fatte nei carotaggi di strati di ghiaccio che hanno registrato valori di circa 190 ppmv dell'epoca glaciale contro i 280 ppmv misurabili all'inizio dell'era industriale ed i 370 ppmv di oggi.

Pur essendovi generale accordo sui dati relativi al riscaldamento globale e sul fatto che i gas-serra antropogenici contribuiscano ad esso, il fatto che il dichiarato riscaldamento globale di  $0.6^{\circ}\text{C}$  occorso durante il XX secolo è in realtà avvenuto solo nei periodi 1910-1945 e 1975-2000 e che nessun aumento si è verificato tra il 1945 e il 1975, fa sì che un analogo accordo non sussiste sul fatto che i gas-serra antropogenici siano di quel riscaldamento il fattore dominante.

I modelli climatici più complessi tentano di simulare il clima globale mediante un approccio modellistico ai processi fisici che nell'atmosfera e negli ocea-

ni influenzano il clima (ad esempio, le modalità di trasferimento di calore). Ma essi vennero sviluppati quali strumenti per studiare le relazioni tra le varie componenti del sistema climatico, e non per essere usati, come ha fatto l'IPCC, per simulare il clima nei precedenti e nei successivi 100 anni. Un tale uso avrebbe presupposto che i risultati ottenuti da questi modelli fossero basati su una descrizione completa del sistema climatico che partisse (i) da accurati dati sulle variabili naturali e antropogeniche, e (ii) da una accurata descrizione matematica dei processi nel sistema climatico: ma entrambi questi fattori sono affetti da pesanti incertezze.

La NAS è consapevole di queste incertezze e osserva che "i modelli climatici sono imperfetti. La loro abilità a simulare la realtà è limitata da incertezze nella loro formulazione, dalle limitate capacità di calcolo e dalla difficoltà di interpretare le risposte da essi fornite e che esibiscono quasi tanta complessità quanta ne esibisce la stessa Natura".

E infatti, come Freeman J. Dyson ha fatto osservare alla conferenza del centenario dell'American Physical Society (1999), è singolare che la maggior parte dei modelli non sono in grado di predire né El Niño - uno dei più significativi fenomeni del clima planetario - né lo strato nuvoloso persistente sopra grandi aree oceaniche.

Modelli che sembrano voler includere ogni variabile e, quindi, rappresentare, apparentemente in modo fedele, il mondo reale, trascinano con sé le inevitabili incertezze associate ad ogni singola variabile. In proposito, il rapporto ESEF, forse troppo perentoriamente, così conclude: "*When all the available information is considered, the IPCC simulation of surface temperature appears to be more a fortuitous case of curve fitting than a demonstration of human influence on the global climate*".

### 3.2 "Previsioni" sul riscaldamento globale

La seconda principale affermazione del TAR riguarda le previsioni per il futuro: "Se le emissioni di gas-serra continueranno ad aumentare secondo gli scenari di emissione contenuti nel Rapporto Speciale sugli Scenari di Emissione (SRES) dell'IPCC, nel 2100 la temperatura media globale dell'aria sulla superficie terrestre potrebbe subire un aumento da 1.4 a 5.8 °C".

Questo aumento è superiore a quello previsto nel Secondo Rapporto di Valutazione (SAR), compreso tra 1 e 3.5 °C, principalmente perché negli scenari di emissione del TAR sono state ridotte, rispetto agli scenari del SAR, le emissioni di biossido di zolfo, che influenzano il clima in termini opposti a quelli della CO<sub>2</sub> e degli altri gas-serra, dal momento che questo gas dà origine in atmosfera alla formazione di particelle di solfati che esercitano un effetto



schermante rispetto alla radiazione solare. Il tasso di riscaldamento previsto è molto più elevato di quello osservato nel XX secolo e sarebbe molto probabilmente senza precedenti negli ultimi 1000 anni.

Le previsioni climatiche contenute nel Terzo Rapporto di Valutazione sono state ottenute facendo uso di modelli climatici semplificati che, a loro volta, assumono come dato di base le concentrazioni future di gas serra ed aerosol fornite dagli scenari di emissione elaborati dall'IPCC nell'SRES. Sulla base delle indicazioni di questi modelli, il TAR afferma che l'influenza dell'uomo continuerà a cambiare la composizione dell'atmosfera durante il XXI secolo. La NAS ha un atteggiamento critico nei confronti delle previsioni dell'IPCC. La *National Academy of Sciences* statunitense riconosce l'esistenza di notevoli incertezze sul previsto aumento della temperatura media globale nel 2100 rispetto al 1990. Le incertezze di tali dati sono imputabili principalmente a:

- Le ipotesi fatte sulla concentrazione futura delle presunte cause di tale riscaldamento, cioè principalmente dei gas-serra e degli aerosol, per una incidenza sul risultato finale che la NAS valuta essere dell'ordine del 40%;
- La sensibilità dei vari modelli climatici nei confronti di fattori (i cosiddetti *feedbacks*) come il vapore acqueo, la riflessione della radiazione solare da parte di neve, ghiaccio, nubi, etc., che risultano di importanza prevalente nel calcolo delle proiezioni, al punto che la NAS ne valuta l'incidenza per il restante 60%.

Una delle conseguenze di tali incertezze potrebbe essere alla base delle discrepanze che si sono registrate tra le temperature misurate negli ultimi dieci anni e i dati, più elevati, calcolati dai modelli per lo stesso periodo: la NAS rimprovera che la natura di tali discrepanze non sia stata sufficientemente analizzata dall'IPCC. Il contributo più grande all'incertezza delle previsioni climatiche è comunque riferibile agli aerosol sia per quanto riguarda i dati di produzione e di distribuzione, sia che si tratti di aerosol derivanti da attività umane o da cause naturali (come le eruzioni vulcaniche). Particolarmente difficili da simulare sono poi gli effetti che gli aerosol provocano sui processi di formazione e sulle proprietà delle formazioni nuvolose, in quanto essi si comportano come nuclei di condensazione delle nubi e ne causano un aumento della vita media. La critica della NAS alle previsioni dell'IPCC non è ingiustificata. Nel formulare le proprie previsioni, l'IPCC ha adottato la seguente procedura:

- per simulare i risultati di modelli climatici complessi (che sono rappresentazioni tridimensionali di atmosfera e oceani) ha usato un modello climatico

- semplice (un modello bidimensionale, mediato sulla latitudine);
- il modello ha usato, come dati di ingresso, 35 distinti scenari di emissioni future di gas-serra e di solfati, così come riportati dall'IPCC nell'SRES (Rapporto Speciale sugli Scenari di Emissioni). Questi scenari assumono che nei prossimi 100 anni nessuna azione venga intrapresa per limitare le emissioni di gas-serra; siccome non vi sono proiezioni utilizzabili sui cambiamenti futuri delle variabili naturali, gli scenari hanno incluso solo le variabili antropogeniche;
- per ogni scenario, i calcoli del modello climatico semplice vengono eseguiti diverse volte, con vari aggiustamenti, per simulare i risultati di svariati modelli complessi;
- alla fine si è ottenuta per il 2100, con tutti gli scenari, una previsione di aumento di temperatura: 1.4 °C la stima minima e 5.8 °C quella massima.

Quest'ampio intervallo di temperature è dovuto a due fattori: (i) ampie differenze tra gli scenari di emissione e (ii) ampie differenze tra i modelli climatici. Ad esempio, per la CO<sub>2</sub>, che ha lunghi tempi di permanenza nell'atmosfera (dell'ordine del secolo), le emissioni cumulative sono più importanti di quelle relative al singolo anno: ebbene, gli scenari di emissioni nel TAR prevedono emissioni cumulative che, per il prossimo secolo, sono comprese entro l'intervallo - alquanto ampio, in verità - di 800-2500 miliardi di tonnellate; per i solfati, che hanno tempi brevi di permanenza (dell'ordine di un mese), le emissioni annuali sono più importanti di quelle cumulative: in questo caso, l'intervallo di incertezza coperto dagli scenari è tra 10 e 100 milioni di tonnellate.

Anche se le emissioni degli scenari SRES sono riferite ad ipotesi di sviluppo trasparenti per quanto riguarda la popolazione, le tecnologie e lo sviluppo economico, conviene comunque riflettere sul commento - anche se perentorio - del rapporto dell'ESEF, secondo cui "l'anno 2100 si presenta tanto differente dall'anno 2000 quanto il 2000 lo è dal 1900. Le emissioni del 2100 sono non solo ignote, ma inconoscibili, dal momento che non è noto quale futuro ci si deve attendere per la popolazione globale, per la tecnologia e, quindi, per l'efficienza energetica e le sorgenti d'energia".

Le differenze tra i modelli climatici sono altrettanto ampie di quelle tra i vari scenari di emissione. Un modo per confrontare i vari modelli consiste nel servirsi della loro "sensibilità climatica", cioè dell'incremento medio di temperatura che essi prevedono per un raddoppio di concentrazione atmosferica di CO<sub>2</sub>: ebbene, tipicamente la sensibilità climatica copre un intervallo compreso tra 1.7 e 4.2 °C.

Wigley e Raper hanno condotto un'analisi di sensibilità della previsione di

incremento della temperatura, utilizzando gli scenari SRES, un modello climatico semplificato, e assumendo che vi sia una probabilità del 10% che la sensibilità climatica sia al di fuori dell'intervallo 1.5-4.5 °C: le loro conclusioni sono che il livello di confidenza<sup>1</sup> sia del 90% per un incremento tra 1.7 e 4.9 °C, con un valore mediano di 3.1 °C.

Uno studio di Webster ha quantificato (si veda la figura 2) nel 95% il livello

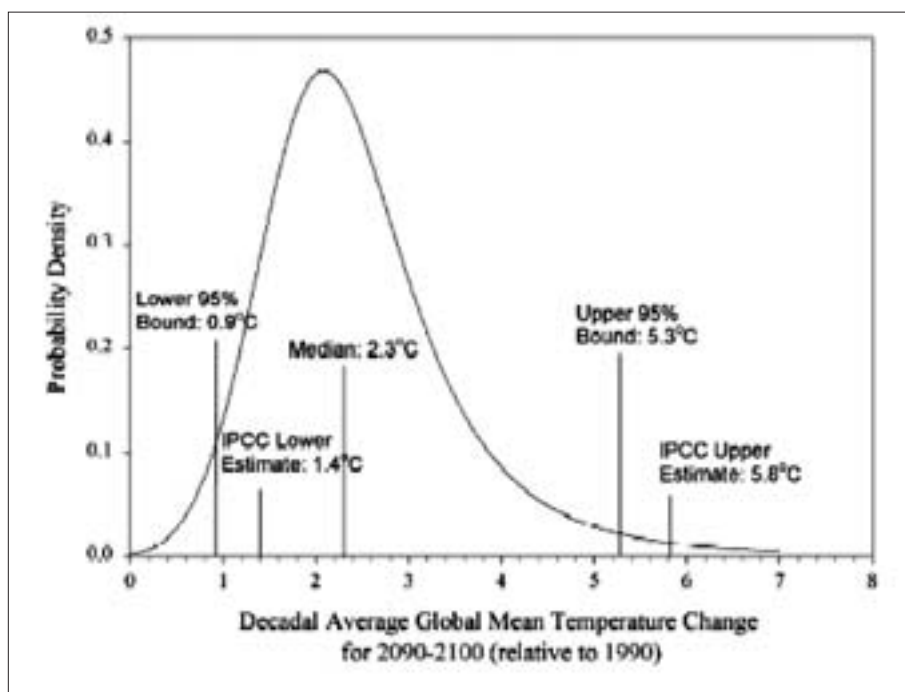


Figura 2

di confidenza per un incremento tra 0.9 e 5.3 °C, con un valore mediano di 2.3 °C, attraverso un'analisi di incertezza basata su una distribuzione di probabilità congiunta per una serie di variabili climatiche fondamentali, basata sui dati storici di queste variabili. Un approccio di tipo probabilistico, come diremo sotto, risulta forse più corretto nel valutare il rischio cui si sottopongono le popolazioni e gli ecosistemi ed è maggiormente utilizzabile per la scelta di politiche di contenimento delle emissioni o di adattamento.

<sup>1</sup> Si definisce livello di confidenza nella stima di un parametro il livello di rischio che si intende accettare di considerare falsa un'ipotesi vera e di considerare vera un'ipotesi falsa.

L'IPCC si preoccupa di avvertire che gli scenari non sono né stime né proiezioni ma solo "immagini del futuro". Un avvertimento, questo, che non viene però recepito nel momento in cui i risultati degli scenari vengono usati come dati di ingresso per eseguire calcoli che, se pur modellistici e con le limitazioni dette, avrebbero lo scopo di fornire valori numerici sulle previsioni di futuri aumenti di temperatura globale.

La NAS, che considera valide le ipotesi sugli scenari di emissione e sulla sensibilità del sistema climatico che sono alla base delle previsioni di incremento della temperatura contenute nel TAR, osserva che tali ipotesi sono sostanzialmente in linea con le informazioni disponibili in letteratura. Ma avverte anche che i *trend* effettivi di incremento delle concentrazioni di anidride carbonica e di metano nell'atmosfera negli ultimi 10 anni sono inferiori a quelli previsti dagli scenari IPCC. Nel commentare sulle previsioni avanzate nel TAR, la NAS ha così concluso: "A causa delle considerevoli incertezze nella attuale comprensione di come il sistema climatico cambia naturalmente e di come esso reagisce alle emissioni dei gas-serra e degli aerosol, gli attuali valori sull'entità del futuro riscaldamento globale devono essere considerate stime provvisorie e soggette a possibili aggiustamenti, sia in aumento che in diminuzione".

### 3.3 Altre "previsioni"

Con le incertezze sottolineate sui dati a proposito di contributo antropogenico al riscaldamento globale e di evoluzione di questo per il prossimo secolo, rimane aperta la questione dell'attendibilità di ogni previsione conseguente da quei dati. Per completezza, elenchiamo le principali di queste "previsioni" contenuto nel TAR.

La precipitazione media globale aumenterebbe nel corso del XXI secolo. Nella seconda metà del secolo sarebbe probabile un aumento di precipitazione nell'emisfero Nord alle alte e medie latitudini ed in Antartide in inverno. Alle basse latitudini l'aumento o la diminuzione dovrebbe dipendere dall'area considerata; sembra comunque molto probabile un aumento della variabilità da anno ad anno, specialmente lì dove si prevede un aumento della precipitazione.

Sarebbero molto probabili temperature massime più alte e un maggior numero di giorni caldi su quasi tutta la superficie terrestre; altrettanto molto probabili le temperature minime più alte e meno giorni freddi su quasi tutta la superficie terrestre; ancora molto probabile sarebbe una diminuzione della gamma giornaliera di temperature ed un aumento dell'indice di calore<sup>2</sup> sulla maggior parte della superficie terrestre; in parecchie aree sarebbe molto pro-

babile anche un maggior numero di eventi estremi di precipitazione; sarebbe probabile un aumento dell'aridità estiva e del rischio di siccità in gran parte delle regioni continentali delle medie latitudini; infine, in alcune aree, sarebbe probabile un aumento dell'intensità dei venti e delle precipitazioni associate ai cicloni tropicali.

La maggior parte dei modelli prevede un indebolimento della circolazione termoalina<sup>3</sup> negli oceani; nessun modello prevede l'arresto di questa circolazione prima del 2100, mentre questo arresto sarebbe possibile dopo il 2100 se il riscaldamento fosse abbastanza forte e duraturo.

Si prevede una diminuzione ulteriore nell'estensione dei ghiacci di mare e della copertura nevosa dell'emisfero Nord, dei ghiacciai di montagna e delle calotte polari durante il corso del XXI secolo.

Considerando i vari scenari, le previsioni indicano un aumento del livello del mare da 0.09 a 0.88 m durante il periodo 1990-2100, dovuto prevalentemente all'espansione termica degli oceani e alla perdita di massa dei ghiacciai e delle calotte polari.

Secondo il TAR, gli effetti delle emissioni dei gas serra sul clima sono duraturi e si sentiranno per molti secoli. La stabilizzazione delle concentrazioni permetterà di ridurre il tasso di riscaldamento rispetto a quello che si avrebbe in assenza di stabilizzazione: a più basse concentrazioni di stabilizzazione corrisponderà un inferiore cambiamento di temperatura.

L'aumento della temperatura media globale e del livello del mare per espansione termica continueranno per centinaia di anni anche dopo la stabilizzazione delle concentrazioni, mentre i ghiacci reagiranno ancora per migliaia di anni dopo la stabilizzazione.

#### 4. L'approccio probabilistico e di scenario

Nel precedente elenco di "previsioni" non può passare inosservata la vaghezza con la quale ogni "previsione" viene enunciata. Nonostante l'IPCC abbia compiuto un grosso sforzo, nel Terzo Rapporto di Valutazione, per

<sup>2</sup> L'indice di calore (heat index) è stato introdotto per rappresentare il livello di pericolosità potenziale relativa alla coppia di grandezze correlate temperatura dell'aria/umidità relativa, in particolare nel periodo estivo. Si calcola attraverso una formula alquanto complessa, che deriva da un'analisi attraverso regressioni multiple che prendono in esame i seguenti parametri: 1) pressione di vapore, 2) velocità effettiva del vento, 3) dimensioni del soggetto umano, 4) temperatura interna del corpo umano, 5) Tasso di sudorazione umana.

<sup>3</sup> La circolazione marina profonda è chiamata termoalina poiché temperatura e salinità sono le due variabili che controllano la densità e le sue variazioni verticali e orizzontali.

assegnare un livello di confidenza alle conclusioni relative ai *trend* climatici osservati e ai cambiamenti previsti, numerosi osservatori hanno messo in evidenza l'assenza di indicazioni del genere per la previsione di incremento delle temperature all'orizzonte 2100. Ciò rende impossibile, ad esempio, il confronto tra le previsioni di questo rapporto e quelle contenute nel rapporto precedente.

L'assenza di indicazioni del genere è legata alla metodologia stessa adottata dall'IPCC che, come detto, ha associato un valore di sensibilità climatica – ossia l'aumento di temperatura corrispondente ad un raddoppio della concentrazione di gas-serra all'equilibrio - variabile tra 1.7 e 4.2 °C a ciascuno dei 35 scenari selezionati dallo SRES. L'impossibilità di assegnare livelli di probabilità affidabili ai *trend* socioeconomici che sono alla base degli scenari SRES impedisce la definizione di un livello di incertezza delle previsioni.

Un'altra critica che è stata fatta al lavoro svolto dall'IPCC riguarda la scarsa attenzione che il *team* di esperti ha rivolto alla giustificazione di scenari che prevedevano negli scorsi 10 anni ratei di incremento dei due gas maggiormente imputati dell'effetto serra (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) ben al di sopra di quanto poi si è verificato; in altri termini si rimprovera il fatto che, al fine di prevedere con maggiore affidabilità i cambiamenti climatici futuri, non si ponga la dovuta attenzione nell'interpretare le fluttuazioni già verificatesi nel breve periodo, che potrebbero fortemente influenzare i risultati per il lungo termine.

Quando si deve trattare con un problema caratterizzato da forti margini di incertezze si possono adottare sostanzialmente due approcci: l'analisi delle incertezze con metodologie probabilistiche o l'analisi di scenario.

Anche i rapporti più recenti IPCC si stanno sempre più orientando verso una maggiore individuazione delle incertezze e l'uso, ancora come opzionale, di strumenti di tipo probabilistico. Tuttavia l'IPCC ha storicamente basato la maggior parte delle proprie valutazioni sull'approccio di scenario, anzi di scenari raccolti in uno speciale rapporto nel quale sono descritti con le principali ipotesi che li caratterizzano (come la crescita demografica ed economica nazionale e mondiale, l'uso del territorio e delle risorse naturali, l'evoluzione tecnologica, le scelte energetiche, etc.). L'impostazione è tale che tutti gli scenari sono considerati ugualmente validi e rigorosamente privi di ogni stima qualitativa o quantitativa di probabilità.

Uno dei vantaggi di tale approccio è quello di poter valutare differenti combinazioni di ipotesi e verificare se siano in grado di produrre risultati simili o differenti. Un altro vantaggio, più politico, è quello di poter raggiungere più facilmente il consenso dei vari esperti internazionali dell'IPCC, che, essendo portatori di differenti ipotesi al riguardo, per esempio, dell'impiego di energie di fonte fossile per il prossimo futuro, riescono più facilmente a concor-

dare l'aggiunta di un nuovo scenario piuttosto che il valore di probabilità ad esso associato.

Tale approccio ha però degli inconvenienti non trascurabili. Innanzitutto si assiste, pure in presenza di un positivo accumulo di conoscenze, ad un progressivo aumento dell'intervallo di variabilità dei risultati, come le proiezioni della temperatura media globale. In secondo luogo si lascia ai decisori politici e al pubblico il compito di valutare se il rischio associato ai cambiamenti climatici sia grande o piccolo. E' invece compito degli scienziati pronunciarsi anche sulle incertezze, non solo identificandole ma anche quantizzandole in termini probabilistici per dare al pubblico e ai responsabili le informazioni più utili per l'adozione di adeguate politiche.

## 5. Conclusioni

In conclusione, secondo la NAS, a causa delle considerevoli incertezze inerenti il livello di variabilità del clima e del comportamento difficilmente valutabile dei vari agenti forzanti (particolarmente gli aerosol), un legame di causa-effetto tra l'accumulo di gas serra e i cambiamenti climatici del XX secolo non può ancora essere stabilito in maniera incontrovertibile. Anche il fatto secondo cui l'ampiezza del riscaldamento misurato sia grande a confronto delle variabilità naturali del clima (come risulta dalle applicazioni dei modelli di calcolo) può essere considerato un buon indizio circa l'esistenza di una probabile correlazione, ma non una prova di una correlazione diretta, in quanto larghe incertezze continuano a sussistere sulle capacità del modello di calcolo di simulare correttamente la temperatura su una scala temporale tanto ampia.

D'altra parte, anche il TAR riconosce che non è possibile escludere la presenza di altri fattori in grado di spiegare l'andamento della temperatura e mette in evidenza le incertezze che ancora rimangono in tale tipo di studi, e principalmente:

- il profilo verticale della temperatura nella troposfera che risulta differente da quello calcolato;
- discrepanze che esistono tra i dati misurati e calcolati;
- scarsità di dati sulla variabilità della radiazione solare e delle eruzioni vulcaniche.

L'informazione sui livelli di incertezza connessi con ciascuna conclusione scientifica è un elemento fondamentale delle richieste dei responsabili politi-

ci, abituati a prendere decisioni, in questo campo come in molti altri, in condizioni di incertezza. Il *Summary for Policymakers* del I Gruppo di Lavoro dell'IPCC cerca di venire incontro a questa esigenza con l'uso di termini (ad es., *likely, very likely, unlikely*), che dovrebbero comunicare i livelli di incertezza; ma il testo approvato non corrisponde spesso a queste indicazioni. Tuttavia, avverte la NAS, il *Summary for Policymakers* dell'IPCC riflette un'impostazione che tende a dare una minore enfasi ai problemi di comunicazione delle incertezze e più risalto alle aree di maggiore preoccupazione associate con i cambiamenti climatici indotti dall'uomo. Sembra quindi opportuno, come è stato suggerito da più parti, che in futuro ogni rapporto dell'IPCC contenga un elenco delle conclusioni più consolidate e delle incertezze più significative (NAS, 2001; ESEF, 2001).

Attraverso le informazioni qui sintetizzate sullo stato dell'arte della ricerca climatica, fatto a partire dalle conclusioni del TAR, risulta evidente come, nonostante i notevoli passi avanti compiuti tra il Secondo e il Terzo Rapporto di Valutazione dell'IPCC, permangano significative incertezze su informazioni di particolare importanza per i responsabili politici come il livello di probabilità delle previsioni di evoluzione della temperatura e delle precipitazioni, o la distribuzione regionale degli impatti dei cambiamenti climatici.

La problematica dei cambiamenti climatici è assai complessa e richiede la conoscenza di molte variabili delle quali solo alcune sono note con un sufficiente livello di confidenza. E' per tale motivo che un approccio probabilistico che valuti anche il grado di affidabilità dei risultati appare particolarmente promettente al fine di fornire un'informazione più completa per il pubblico e al fine di supportare le analisi di rischio che devono stare alla base delle decisioni politiche.

Occorre in eguale misura cercare di ridurre le incertezze che permangono sulle conoscenze di parecchi parametri importanti, come quelli che riguardano il comportamento degli aerosol, con lo scopo di rendere le già citate analisi di rischio ancor più significative e permettere così l'adozione di strategie di controllo più mirate. Un discorso analogo si può fare per il problema della valutazione e monitoraggio degli impatti che i cambiamenti climatici hanno già avuto o potranno avere a livello nazionale, che hanno bisogno di una collocazione più organica e meno frammentata al pari di quanto, da tempo, si sta facendo in altri paesi industrializzati.



**BIBLIOGRAFIA**

- Dyson F.J., *The Science and Politics of Climate*, *Physics and Society* **29**, 1 (2000)
- ESEF, *Climate Science and Policy: Making the Connection*. A report by the European Science and Environment Forum, 2001
- Forest C.E. et al., in: MIT, Joint Program on the Science and Policy of Global Change: *How to Think About Human Influence on Climate* (2000)
- IPCC, *Third Assessment Report*, 2001
- Lucarini V, *La scienza del clima*,. *Equilibri*, **3** 2001
- NAS, *Climate Change Science: an Analysis of Some Key Questions*, 2001
- Webster M. et al., in: MIT, Joint Program on the Science and Policy of Global Change: *Uncertainty Analysis of Global Climate Change Projections* (2001)
- Webster M. et al., in: MIT, Joint Program on the Science and Policy of Global Change. *Uncertainty in Emissions Projections for Climate Models* (2001)
- Wigley T. and Raper S., *Science* **293**, 451 (2001)

