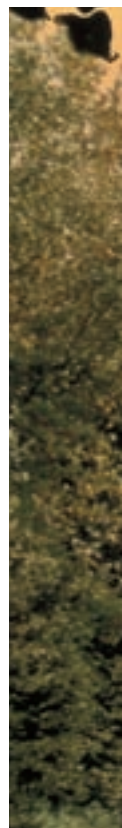


### 3. I costi esterni dei gas serra

E' noto che il clima del pianeta viene controllato in gran parte dalla composizione dell'atmosfera e, in particolare, dalla concentrazione dei cosiddetti gas serra, che sono trasparenti alla radiazione solare incidente ma opachi alla radiazione ad onda lunga emessa dalla terra.



Il principale gas serra è il vapore d'acqua ( $H_2O$ ), i cui livelli in atmosfera sono determinati dall'equilibrio naturale tra evaporazione e precipitazioni e non sono direttamente influenzati da attività umane. Seguono in ordine di importanza l'anidride carbonica ( $CO_2$ ), il metano ( $CH_4$ ), l'ozono ( $O_3$ ) e altri composti presenti naturalmente in tracce che, insieme al vapore d'acqua, fanno sì che l'atmosfera produca un effetto serra naturale di  $34^\circ C$  (se non ci fosse l'atmosfera la temperatura media del pianeta sarebbe pari a  $-19^\circ C$ , mentre in realtà è di  $+15^\circ C$ ).

Ai gas serra naturali si aggiungono quelli di origine antropica, che in parte sono gli stessi di quelli naturali e in parte sono gas artificiali, come i composti alogenati (clorofluorocarburi, idroclorofluorocarburi, idrofluorocarburi); essi provocano un effetto serra aggiuntivo

rispetto a quello naturale. La comunità scientifica internazionale ha valutato la capacità di ciascuno di essi di contribuire all'effetto serra aggiuntivo, rapportandola a quella del più importante gas serra, che è la  $CO_2$  e che viene prodotta da tutti i processi di combustione. Le emissioni antropiche di gas serra possono, quindi, essere valutate in termini di  $CO_2$  equivalente secondo i coefficienti di conversione di seguito elencati (GWP, *Global Warming Potential*):

• Anidride carbonica ( $CO_2$ )	1
• Metano ( $CH_4$ )	21
• Protossido d'azoto ( $N_2O$ )	310
• Idrofluorocarburi (HFC)	140÷11.700 (in media 1.600)
• Perfluorocarburi (PFC)	6.500÷9.200 (in media 7.000)
• Esafluoruro di zolfo ( $SF_6$ )	23.900



Gli impatti, accertati e possibili, dei cambiamenti climatici di responsabilità umana formano l'oggetto di una vasta letteratura internazionale e in particolare delle sistematiche ricerche, ormai più che decennali, condotte dall'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), l'organismo costituito ad hoc nel 1988 dalle Nazioni Unite.

I risultati delle ricerche dell'IPCC sono riconosciuti come il riferimento internazionale più autorevole, e su di essi è fondato il complesso processo di negoziazione che ha preso avvio nel 1992 con la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici.

Il progetto ExternE dell'UE ha integrato il patrimonio conoscitivo prodotto dall'IPCC, sviluppando e perfezionando le metodologie di valutazione monetaria dei danni ambientali, sociali e sanitari provocati dai cambiamenti

climatici di origine antropica. I settori prioritari d'impatto considerati nell'ambito di ExternE sono:

- la salute umana;
- la crescita del livello medio dei mari;
- l'agricoltura;
- la disponibilità d'acqua;
- gli ecosistemi e la biodiversità;
- gli eventi meteorologici estremi.

Per una descrizione dettagliata dei danni esaminati e dei criteri di valutazione monetaria, rimandiamo ai nostri precedenti Rapporti; date le notevoli incertezze della materia, sono stati sistematicamente adottati criteri ed assunzioni conservativi, tendenti cioè a sottostimare l'entità dei danni, alcuni dei quali peraltro non sono stati valutati in termini monetari ma unicamente descritti in termini fisici.



Nel suo *Third Assessment Report*, attualmente in corso di pubblicazione, l'IPCC afferma che esistono nuove e più forti evidenze sull'origine antropica del riscaldamento globale osservato negli ultimi 50 anni, che la composizione dell'atmosfera continuerà a modificarsi nel XXI secolo provocando cambiamenti climatici che si protrarranno per molti secoli, e che questi cambiamenti saranno tanto più marcati quanto più alto sarà il valore a cui si riuscirà a stabilizzare la concentrazione dei gas serra in atmosfera. I modelli messi a punto e continuamente perfezionati dall'IPCC

mostrano che una stabilizzazione entro il 2100 della concentrazione di CO<sub>2</sub> ad un livello non superiore a 550 parti per milione (il doppio del livello preindustriale) conterrebbe l'aumento medio della temperatura terrestre entro i 2 °C; si tratta però di un traguardo ben difficile da realizzare in quanto rende necessaria a partire dal 2025/2030 una “svolta tecnologica” senza precedenti per rispondere alla domanda mondiale di energia, riducendo drasticamente il ricorso ai combustibili fossili. Di seguito sono brevemente descritte le modalità con cui è stata effettuata la quanti-

**TABELLA 8**  
**Fattori di emissione di CO<sub>2</sub> di alcuni**  
**combustibili e carburanti (tCO<sub>2</sub>/tep)**

Carbone da vapore	3,955
Lignite	4,147
Petrolio greggio	3,035
Olio combustibile denso	3,202
Gasolio	3,066
Jet kerosene (carboturbo)	2,960
Benzine	2,868
GPL	2,610
Gas naturale	2,320

Fonte: elaborazione ANPA secondo metodologia IPCC (2001).

ficazione delle emissioni di gas serra dovute in Italia ai mezzi di trasporto nel 1999 e vengono forniti i principali risultati. Per la CO<sub>2</sub> tale quantificazione è stata effettuata a partire dai consumi di combustibile in base ai fattori di emissione, espressi in tonnellate per tonnellata equivalente di petrolio (tep) di combustibile, forniti dalla Tabella 8.

Le emissioni degli altri gas serra di cui sono responsabili i trasporti, cioè il metano CH<sub>4</sub> e il protossido di azoto N<sub>2</sub>O, non sono invece stechiometricamente legate alle quantità di combustibile consumato ma dipendono dalle

modalità di combustione e vanno quindi valutate caso per caso secondo opportune metodologie, tra le quali in questo studio sono state adottate quelle raccomandate dall'Agenzia Europea dell'Ambiente.

TABELLA 9

**Trasporto su strada. Volumi di traffico,  
emissioni assolute ed emissioni specifiche di CO<sub>2</sub> nel 1999**
**(a) nel complesso, (b) in ambito urbano, (c) in ambito extraurbano**

	Volumi di traffico			Emissioni assolute			Emissioni specifiche
	(a) (10° pkm-tkm)	(b)	(c)	(a) (kt)	(b)	(c)	(g/pkm-tkm) (a)
<b>STRADA</b>				<b>109.574</b>	<b>37.812</b>	<b>71.762</b>	
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>791</b>	<b>227</b>	<b>564</b>	<b>75.503</b>	<b>30.259</b>	<b>45.244</b>	<b>95</b>
Uso privato	697	204	493	72.454	28.998	43.457	104
Autovetture	638	166	473	68.407	26.331	42.076	107
benzina	450	131	18	48.958	21.291	27.667	109
diesel	148	22	126	15.362	3.417	11.945	104
GPL	41	12	29	4.086	1.623	2.463	100
Motocicli/ciclomotori	59	39	20	4.048	2.667	1.381	69
motocicli	25	15	10	1.885	1.153	732	76
ciclomotori	34	24	10	2.162	1.514	649	64
Uso collettivo - Bus e pullman	93	22	71	3.049	1.262	1.787	33
Autobus urbani	11	10	1	782	729	53	72
Pullman	83	12	70	2.267	532	1.734	27
<b>Trasporto merci</b>	<b>247</b>	<b>32</b>	<b>215</b>	<b>34.071</b>	<b>7.553</b>	<b>26.518</b>	<b>138</b>
Veicoli leggeri	14	4	11	9.807	3.574	6.233	691
Veicoli pesanti	233	29	204	24.265	3.979	20.285	104

Fonte: elaborazioni Amici della Terra su dati CORINAIR.



### 3.1. Emissioni di gas serra.

#### STRADA

La Tabella 9 fornisce le emissioni di CO<sub>2</sub> dovute all'esercizio dei veicoli stradali. Essa è stata ricavata utilizzando i risultati dell'inventario CORINAIR, riagggregandoli secondo le categorie di veicoli di nostro interesse e distinguendo tra ambito urbano ed ambito extraurbano. Rapportando i valori assoluti delle emissioni con quelli dei volumi di traffico visti in precedenza, sono state inoltre calcolate le emissioni specifiche, riferite cioè all'unità di traffico (passaggero x chilometro e tonnellata x chilometro); si tratta di un indicatore significativo, che esprime la maggiore o minore attitudine di una categoria veicolare a contribuire al contenimento dell'effetto serra e consente il confronto con le altre modalità di trasporto.

Analoghe tabelle, che per brevità non vengono esposte, sono state elaborate per le emissioni di CH<sub>4</sub> e di N<sub>2</sub>O; da esse si evince che il contributo di questi due gas, misurato in termini di CO<sub>2</sub> equivalente e rapportato alle emissioni di CO<sub>2</sub>, è differente per le varie categorie di veicoli ma per l'intera modalità stradale ammonta complessivamente a circa il 3%.

#### *3.1.1. Le emissioni di gas serra dovute al condizionamento d'aria delle autovetture*

Secondo una stima dell'ENEA, nel 1999 oltre il 10% del parco circolante era costituito da autovetture climatizzate e tale percentuale salirà al 50% entro il 2010. Gli impianti di

condizionamento sono responsabili di emissioni addizionali di gas serra per due motivi:

- l'aumento del consumo di carburante dovuto al funzionamento dell'impianto, che con le attuali tecnologie è dell'ordine di 2,5 litri/100 km nei percorsi urbani e di 1 litro/100 km in quelli extraurbani (sia per le vetture diesel che per quelle a benzina);
- le perdite di fluido frigorifero (CFC, HCFC, 134a) sia di esercizio che occasionali, cioè durante i rabbocchi, le riparazioni e la rottamazione.

In base al Protocollo di Montreal e ai successivi emendamenti, i fluidi frigoriferi delle famiglie CFC e HCFC attualmente utilizzati, nocivi per l'ozono stratosferico, dovranno essere eliminati entro il 2008 e sostituiti dai nuovi fluidi non clorurati HFC, tra cui il 134a. Questi ultimi non sono gas nocivi per l'ozono ma sono pur sempre dei potenti gas serra. L'ENEA ha valutato che mediamente un'autovettura climatizzata disperde nell'atmosfera, tra perdite di esercizio e rilasci occasionali, circa 0,3 kg di fluido frigorifero all'anno, che corrispondono, con l'attuale mix di fluidi frigoriferi, a poco meno di 1 tonnellata di CO<sub>2</sub> equivalente. La progressiva sostituzione dei CFC e HCFC con il fluido 134a migliorerà la situazione, in quanto quest'ultimo è un gas serra un po' meno potente; inoltre, sono da attendersi notevoli miglioramenti alla tenuta degli impianti, in grado di ridurre sensibilmente le perdite di esercizio.

Tuttavia, l'impatto energetico e ambientale degli impianti di climatizzazione realizzati con l'attuale tecnologia resta motivo di forte

preoccupazione e rischia di annullare o ridurre i miglioramenti di efficienza e di prestazioni ambientali che l'evoluzione delle tecnologie motoristiche fanno prevedere. E' quindi necessario e urgente introdurre sul mercato impianti di climatizzazione innovativi, capaci di garantire il comfort all'utente con soluzioni che minimizzino i consumi addizionali e le fughe di gas ad effetto serra. La ricerca, che tuttavia procede a rilento perché le case produttrici non sono stimolate da adeguate normative, riguarda sia l'introduzione di fluidi ad effetto serra ridotto o nullo sia soluzioni non convenzionali che non richiedono fluidi di lavoro, come gli impianti ad assorbimento di vapore da zeoliti o gli impianti a celle Peltier. Si prevede che la ricerca su impianti di condizionamento "puliti" subirà una decisa accelerazione con l'introduzione sul mercato di autovetture innovative come le auto ibride e quelle a idrogeno.

### **3.2. Emissioni di gas serra.**

#### **ROTAIA**

La procedura di calcolo delle emissioni di gas serra imputabili ai veicoli su rotaia ha tenuto conto delle due diverse forme di energia utilizzate per la trazione (elettricità e gasolio, quest'ultimo essendo il carburante dei locomotori diesel impiegati dalla Ferrovie dello Stato e dalle Ferrovie concesse essenzialmente - ma non esclusivamente - sulle linee non elettrificate).

Per quanto riguarda le emissioni di CO<sub>2</sub> imputabili alla trazione elettrica, la procedura

adottata, assumendo che tutta l'energia utilizzata per la trazione sia stata prelevata dalla rete pubblica, ha valutato accuratamente le emissioni di CO<sub>2</sub> associate ad ogni kWh disponibile sulla rete e prelevato dall'utente in alta tensione. Tale valutazione, effettuata sulla base di dati dichiarati dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN), dall'ENEL e dagli altri produttori che nel 1999 hanno ceduto energia alla rete pubblica, ha portato al risultato di 489 grammi di CO<sub>2</sub>/kWh. A questo valore è stato aggiunto il contributo degli altri due gas serra (CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O) emessi dalle centrali termoelettriche, valutabile in circa 20 grammi di CO<sub>2</sub> equivalente/kWh. E' da notare che il valore delle emissioni per kWh disponibile in rete è notevolmente inferiore al valore tipico della produzione termoelettrica nazionale (710 g di CO<sub>2</sub>/kWh), in quanto sulla rete viene riversata anche l'energia prodotta dagli impianti idroelettrici, caratterizzata da emissioni nulle, e quella di importazione, anch'essa convenzionalmente non considerata responsabile di emissioni di gas serra.

Le emissioni imputabili alla trazione diesel sono state calcolate a partire dai consumi di gasolio utilizzando il relativo fattore di emissione, pari a 3,066 tCO<sub>2</sub>/tep (Tabella 8). Anche in questo caso, è stato aggiunto il contributo di CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O che, secondo le indicazioni dell'Agenzia Europea dell'Ambiente, è tutt'altro che indifferente: 0,388 t CO<sub>2</sub> eq./tep (il 12% delle emissioni di CO<sub>2</sub>).

La Tabella 10 riporta le emissioni specifiche e assolute di CO<sub>2</sub> per l'intera modalità su rotaia, calcolate secondo le procedure descritte. Per brevità non vengono esposti i risultati relativi agli altri gas serra, del cui

**TABELLA 10**  
**Trasporto su rotaia. Volumi di traffico,**  
**emissioni assolute e specifiche di CO<sub>2</sub> nel 1999**

Rotaia	Volumi di traffico (10°pkm-tkm)	Energia elettrica		(tep)	Gasolio CO <sub>2</sub> (kt)	Emissioni assolute (kt)	Emissioni specifiche (gCO <sub>2</sub> /pkm-tkm)
		(GWh)	CO <sub>2</sub> (kt)				
<b>Passeggeri</b>	<b>49,203</b>	<b>3.263</b>	<b>1.594</b>	<b>109.646</b>	<b>336</b>	<b>1.931</b>	<b>39,2</b>
FS	40,971	2.886	1.410	84.483	259	1.669	40,7
Ferrovie concesse	2,878	119	58	25.163	77	135	47,0
Tranvie	1,163	76	37	-	-	37	31,9
Metropolitane	4,191	182	89	-	-	89	21,2
<b>Merchi (FS)</b>	<b>24,439</b>	<b>1.881</b>	<b>919</b>	<b>33.630</b>	<b>103</b>	<b>1.022</b>	<b>41,8</b>
<b>TOTALE</b>			<b>2.513</b>		<b>439</b>	<b>2.953</b>	

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

contributo si è tenuto conto in fase di valutazione monetaria. Osserviamo che il valore delle emissioni specifiche del trasporto merci (41,8 g CO<sub>2</sub>/tkm) risulta maggiore rispetto a quello stimato nei precedenti Rapporti (26,3) non certo a causa di una diminuita efficienza ma solo a causa del diverso criterio utilizzato per ripartire i consumi di energia tra trasporto passeggeri e trasporto merci.

### 3.3 Emissioni di gas serra. AEREO

La Tabella 11 fornisce le emissioni di CO<sub>2</sub> per il trasporto aereo commerciale, tanto in termini assoluti che specifici, separatamente per passeggeri e merci. Le emissioni assolute di CO<sub>2</sub> sono state valutate a partire dai consumi di carburante, utilizzando il fattore di emissione del carboturbo (jet kerosene), pari a 2,960 tCO<sub>2</sub>/tep (Tabella 8).

La tendenza alla forte crescita del trasporto aereo in tutto il mondo, nel 1999, e la com-



TABELLA 11

**Trasporto aereo commerciale. Volumi di traffico, emissioni assolute e specifiche di CO<sub>2</sub> nel 1999**

<b>Aereo</b>	<b>Volume di traffico</b> (10° pkm-tkm)	<b>Consumo di carboturbo</b> (ktep)	<b>Emissioni assolute di CO<sub>2</sub></b> (kt)	<b>Emissioni specifiche di CO<sub>2</sub></b> (gCO <sub>2</sub> /pkm-tkm)
Passeggeri	54,908	2.963	8.770	160
Merci	1,362	294	870	639
<b>TOTALE</b>	-	<b>3.257</b>	<b>9.640</b>	-

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

pietà dei fenomeni che avvengono lungo le rotte in conseguenza delle emissioni degli aerei hanno indotto l'IPCC a costituire un apposito gruppo di studio, che ha recentemente pubblicato in un rapporto (*"Aviation and Global Atmosphere"*, 1999) i primi risultati delle sue ricerche, condotte in collaborazione con i più autorevoli enti scientifici internazionali. Si tratta dell'insieme di informazioni più completo e aggiornato sull'argomento, che analizza il ruolo esplicito da tutte le sostanze emesse dagli aerei nel modificare le proprietà chimiche e fisiche dell'atmosfera e in particolare nel contribuire all'effetto serra. Dopo la CO<sub>2</sub>, il ruolo più importante spetta agli NO<sub>x</sub> che si comportano come precursori dell'ozono, la cui efficacia come gas serra è massima proprio intorno ai 12.000 metri, cioè alla quota di

crociera dei voli internazionali. Allo stesso tempo gli NO<sub>x</sub> provocano una riduzione delle concentrazioni di metano, favorendo in questo caso una riduzione dell'effetto serra. Purtroppo la complessità della materia non consente di effettuare delle valutazioni in termini di CO<sub>2</sub> equivalente; nel caso del trasporto aereo, sono state quindi quantificate solo le emissioni di CO<sub>2</sub>, la cui efficacia ai fini dell'effetto serra è indipendente dalla quota, dalla stagione, dalla zona geografica e da qualunque altra condizione dell'atmosfera al momento del rilascio. Le conseguenti valutazioni in termini monetari sono quindi certamente calcolate per difetto.

**TABELLA 12**  
**Strada, rotaia, aereo.**  
**Evoluzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> (kt)**

	1995	1997	1999	Variazione 1999/1995 (%)
Strada	103.573	105.438	109.574	+ 5,8
Rotaia	3.034	3.071	2.953	- 2,7
Aereo	7.047	7.922	9.640	+ 36,8
<b>TOTALE</b>	<b>113.654</b>	<b>116.431</b>	<b>122.167</b>	<b>+ 7,5</b>

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

### 3.4. Emissioni di gas serra. STRADA, ROTAIA E AEREO a confronto

La Tabella 12 mostra l'evoluzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> imputabili alla mobilità dei veicoli per le tre modalità esaminate, nel periodo 1995-1999.

La diminuzione delle emissioni imputabili alla rotaia è da ascrivere in parte alla leggera contrazione dei volumi di traffico e in parte alla diminuzione delle emissioni dovute alla trazione elettrica in virtù di un crescente uso del gas da parte dell'ENEL. Per contro, la strada è responsabile di un forte incremento di emissioni (6 milioni di tonnellate, pari al 5,8%) e così pure l'aereo (oltre 2,5 milioni di tonnellate, pari al 38,6%); complessivamente, l'esercizio dei mezzi di trasporto delle tre

modalità ha comportato, tra il 1995 e il 1999, un aumento delle emissioni di CO<sub>2</sub> pari a 8,5 milioni di tonnellate (+7,5%). Questa tendenza, che dopo il 1999 non si è modificata, dimostra che il settore dei trasporti è quello che renderà problematico per l'Italia il rispetto degli impegni internazionali in materia di contenimento delle emissioni, già negoziati o in fase di negoziazione.

### 3.5. La valutazione monetaria

La Tabella 13 riporta in forma sintetica i risultati della valutazione monetaria dei costi esterni dei gas serra nel 1999. La valutazione è stata effettuata secondo i criteri già adottati per il 1997, e prende in considerazione i tre

**TABELLA 13**  
**Strada, rotaia, aereo. Emissioni di CO<sub>2</sub>**  
**e costi esterni dei gas serra (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) nel 1999**

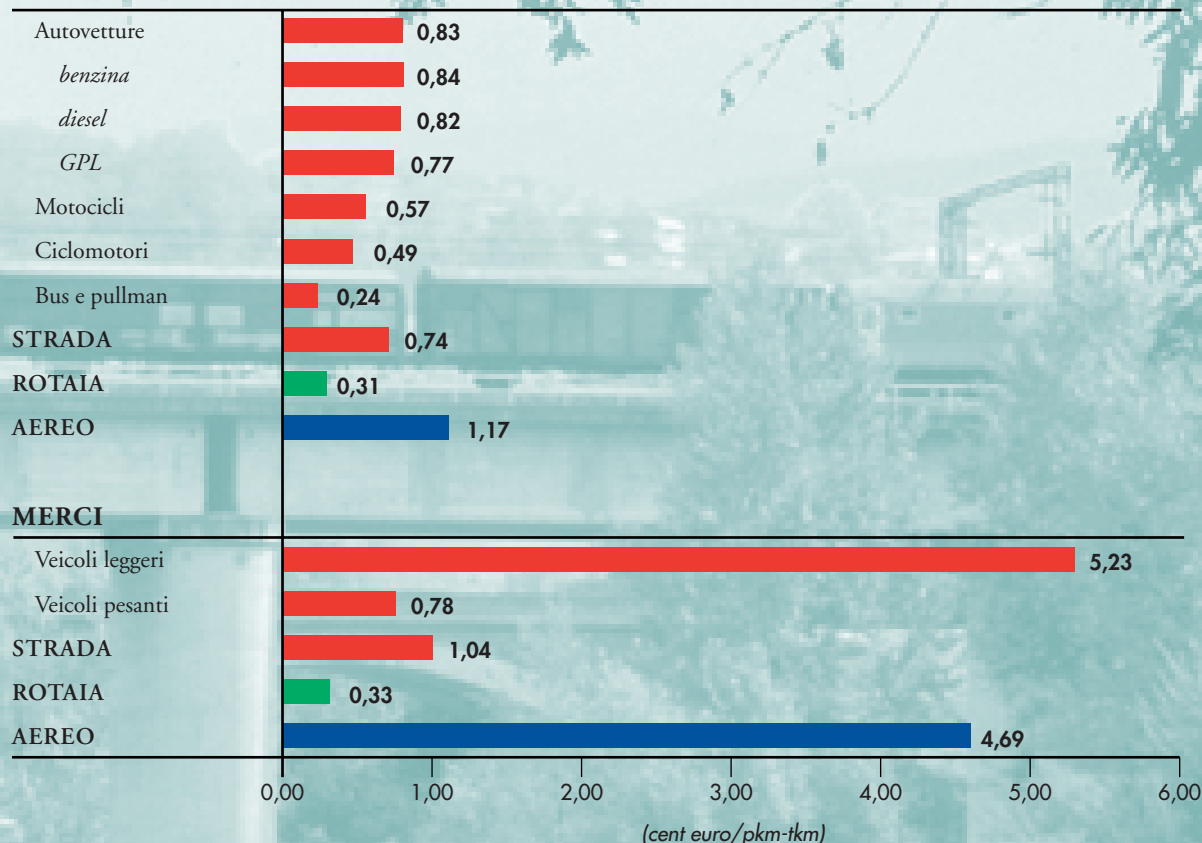
	Emissioni di CO <sub>2</sub> (kt)	Costi esterni (10 <sup>6</sup> euro)	(%)
<b>STRADA</b>	<b>109.574</b>	<b>8.412</b>	<b>89,9</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>75.503</b>	<b>5.846</b>	<b>62,5</b>
Uso privato	72.454	5.618	60,1
Autovetture	68.407	5.311	56,8
benzina	48.958	3.788	40,5
diesel	15.362	1.210	12,9
GPL	4.086	313	3,4
Motocicli	1.885	143	1,5
Ciclomotori	2.162	164	1,8
Uso collettivo - Bus e pullman	3.049	228	2,4
<b>Trasporto merci</b>	<b>34.071</b>	<b>2.566</b>	<b>27,4</b>
Veicoli leggeri	9.807	743	7,9
Veicoli pesanti	24.265	1.823	19,5
<b>ROTAIA</b>	<b>2.953</b>	<b>234</b>	<b>2,5</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>1.931</b>	<b>154</b>	<b>1,6</b>
<b>Trasporto merci</b>	<b>1.022</b>	<b>81</b>	<b>0,9</b>
<b>AEREO*</b>	<b>9.640</b>	<b>708</b>	<b>7,6</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>8.770</b>	<b>644</b>	<b>6,9</b>
<b>Trasporto merci</b>	<b>870</b>	<b>64</b>	<b>0,7</b>
<b>TOTALE GENERALE</b>	<b>122.167</b>	<b>9.355</b>	<b>100,0</b>

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

\* I costi esterni per l'aereo tengono conto unicamente delle emissioni di CO<sub>2</sub>

**FIGURA 1**  
**Costi esterni specifici dei gas serra**

**PASSEGGERI**



Fonte: elaborazione Amici della Terra.

gas serra CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O; fa eccezione la modalità aerea, per la quale, come si è detto, è stata considerata solo la CO<sub>2</sub> e per la quale i costi esterni sono quindi sicuramente sotto-stimati. La Tabella riporta comunque, per riferimento, le emissioni di CO<sub>2</sub>, cioè del gas serra che provoca i costi maggiori.

Un confronto più accurato tra le modalità può essere effettuato osservando la Figura 1 che mostra, per le varie categorie di veicoli, i costi esterni in termini specifici, cioè rapportati ai rispettivi volumi di traffico. Per quanto riguarda il trasporto passeggeri, i mezzi

pubblici su rotaia e su gomma si qualificano come i più vantaggiosi; l'aereo è il mezzo che impone alla collettività i maggiori costi, seguito dalle autovetture. Nel trasporto merci, la modalità più conveniente è la rotaia, seguita dai veicoli merci pesanti su strada; la distribuzione delle merci coi veicoli leggeri ed ancor più il trasporto via aerea si confermano invece le modalità di gran lunga più svantaggiose.

## 4. I costi esterni dell'inquinamento atmosferico

La valutazione dei costi esterni dell'inquinamento atmosferico dovuto alle varie modalità di trasporto si è basata su un'ampia rassegna degli studi disponibili nella letteratura internazionale e italiana.

In particolare, la valutazione relativa ai trasporti stradali e su rotaia è stata effettuata sulla base dei risultati dei casi studio esaminati dai gruppi di ricerca europei nell'ambito del progetto ExternE. Ciò ha consentito di selezionare le stime scientificamente più affidabili sul piano metodologico, su quello della rappresentatività a livello nazionale e della trasferibilità al contesto italiano, e, soprattutto, del grado di copertura dei principali inquinanti atmosferici. Nonostante le numerose incertezze che perdurano sugli effetti di molti inquinanti e la carenza di studi epidemiologici di scala adeguata, la rassegna effettuata ha consentito di individuare i costi esterni medi nazionali (per tonnellata di inquinante emesso) per le fonti mobili terrestri (mezzi su strada e locomotori diesel), distinti tra traffico urbano e traffico extraurbano, e per le fonti

stazionarie (centrali termoelettriche per la produzione dell'energia necessaria alla trazione). Per quanto riguarda la mobilità aerea, sono stati adottati costi esterni distinti per le fasi di atterraggio-rullaggio-decollo (cicli LTO) e per quelle di crociera.

Gli inquinanti considerati, coerentemente con le ricerche più autorevoli e con il progetto ExternE, sono l'anidride solforosa ( $\text{SO}_2$ ), gli ossidi d'azoto ( $\text{NO}_x$ ), le polveri con diametro inferiore a 10 micron ( $\text{PM}_{10}$ ), l'ossido di carbonio (CO) e i composti organici volatili (COV).

Le emissioni di  $\text{SO}_2$  si generano dalla combustione dello zolfo presente nei combustibili. L'anidride solforosa è altamente solubile in acqua; nell'atmosfera si ossida ad acido solforico ed è quindi responsabile dei processi di acidificazione e della formazione delle piogge







acide, che hanno effetti negativi sugli ecosistemi, sui monumenti e sugli edifici. Gli effetti della  $\text{SO}_2$  sulla salute umana si manifestano sotto forma di numerose patologie dell'apparato respiratorio.

L'elevato tenore di azoto presente nell'aria provoca, con le alte temperature raggiunte durante la combustione, la formazione di ossidi di azoto  $\text{NO}_x$ ; il più pericoloso è il biossido di azoto ( $\text{NO}_2$ ), caratterizzato da una forte tossicità (è anch'esso causa di patologie dell'apparato respiratorio) e dalla capacità di favorire la formazione di ozono troposferico e di smog fotochimico, entrambi a loro volta responsabili di gravi danni alla salute. Gli ossidi di azoto, combinandosi con le molecole d'acqua presenti nell'aria, formano acido nitrico e contribuiscono anch'essi alle piogge acide.

Con il termine di polveri (o particolato) viene identificato l'insieme di tutte le particelle che, a causa delle piccole dimensioni, restano in sospensione nell'aria; esse rappresentano un insieme estremamente eterogeneo di sostanze emesse durante la combustione dei combustibili solidi e liquidi e risultanti da tutta una serie di reazioni fisiche e chimiche. Il particolato  $\text{PM}_{10}$  è uno degli inquinanti più insidiosi per la salute umana; tra gli inquinanti emessi dal traffico è la prima causa di mortalità e può anche avere effetti cancerogeni.

L'ossido di carbonio  $\text{CO}$  si forma essenzialmente quando la combustione del carbonio è incompleta e non si ha ossigeno sufficiente per la formazione di  $\text{CO}_2$ ; le emissioni di  $\text{CO}$  sono elevate nei motori a benzina e ridotte in quelli diesel proprio a causa del diverso rapporto aria-combustibile che caratterizza le

due tecnologie. Gli effetti sanitari dell'ossido di carbonio consistono nella riduzione della capacità del sangue di trasportare ossigeno e sono soprattutto a carico dell'apparato cardiovascolare e del sistema nervoso; la loro entità dipende in modo complesso dalle concentrazioni e dalla durata dell'esposizione.

I composti organici volatili (COV) sono un insieme di composti del carbonio emessi nei processi di combustione sia in fase gassosa che in fase particolata; dal punto di vista tossicologico, i più importanti sono gli idrocarburi aromatici, tra i quali il benzene, che ha accertato potere cancerogeno, e gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA), classificati come probabilmente cancerogeni. E' opportuno precisare che, a seconda delle fonti inquinanti e delle metodologie di misura, la letteratura e la normativa prendono in esame i composti organici volatili (COV) o, in alternativa, gli idrocarburi incombusti (HC). In entrambi i casi si tratta di un insieme di numerosi composti del carbonio, alcuni dalla molecola molto complessa, sui quali le conoscenze non sono ancora complete. In linea di massima, gli HC sono i costituenti principali dei COV, ma non tutti ne fanno parte. L'idrocarburo più leggero, il metano ( $\text{CH}_4$ ), viene spesso considerato a parte data la sua notevole importanza come gas serra; in questo caso le normative fanno riferimento ai composti organici volatili non metanici (COVNM).

## **4.1 Emissioni inquinanti in atmosfera.**

### **STRADA**

La valutazione in termini fisici delle emissioni inquinanti da trasporto su strada è stata elaborata sulla base dell'inventario CORINAIR. La metodologia CORINAIR è stata promossa e sviluppata dalla DG-XI della Comunità Europea nell'ambito del più vasto programma CORINE (*Coordination of Information on the Environment*), avviato nel 1985 con l'obiettivo di armonizzare la raccolta e l'organizzazione delle informazioni sullo stato dell'ambiente e delle risorse naturali nella Comunità e di sviluppare un sistema informativo geografico come supporto alla formulazione e all'implementazione della politica comunitaria in materia ambientale. La parte del programma relativa alla raccolta e all'organizzazione delle informazioni sulle emissioni in atmosfera costituisce il programma CORINAIR.

L'inventario CORINAIR prende in esame 11 gruppi di attività (macrosettori); uno di questi è appunto il trasporto su strada. La stima delle emissioni del macrosettore trasporto su strada si basa su una metodologia specifica, e alquanto sofisticata, detta COPERT (*Computer Programme for calculating Emissions from Road Traffic*). Per una descrizione dettagliata della metodologia COPERT, che viene continuamente perfezionata e aggiornata dall'Agenzia Europea dell'Ambiente, rimandiamo ai nostri precedenti Rapporti. Il COPERT suddivide i veicoli in un centinaio di categorie (distinte per tecnologia, anzianità, cilindrata) e, sulla base di numerose assunzioni, per ciascuna di esse stima le emissioni annue. Le assunzioni riguardano la percorrenza annua e la sua ripar-

tizzazione tra percorsi urbani, extraurbani e autostradali, le velocità medie, le condizioni climatiche, le pendenze dei percorsi, i carichi; esse vengono annualmente aggiornate dall'ANPA in base alle informazioni disponibili e a consultazioni con esperti e operatori del settore.

La metodologia COPERT fornisce, al massimo livello di disaggregazione, la stima delle emissioni dei tre gas serra, dei cinque inquinanti principali e di ammoniaca, di sette metalli pesanti; fornisce inoltre la stima dei consumi di carburante, consentendone la quadratura in base ai dati del Bilancio Energetico Nazionale. Per le nostre valutazioni, i dati di uscita del COPERT 1999 sono stati riaggregati al livello di nostro interesse; limitatamente ai cinque inquinanti principali, i risultati sono esposti nella Tabella 14, che ha costituito la base per tutte le successive elaborazioni. Le emissioni di SO<sub>2</sub> sono state valutate in base al contenuto di zolfo nei carburanti distribuiti in Italia nel 1999: rispettivamente 0,04% in peso nelle benzine (con piombo e senza piombo) e 0,05% nel gasolio.

I modelli impiegati nel COPERT presentano tuttavia alcuni limiti, tra i quali è opportuno segnalare: la sottostima delle emissioni delle auto catalizzate più vecchie (in quanto i modelli non tengono conto della perdita di efficacia del catalizzatore con l'invecchiamento); la mancata stima delle emissioni delle auto a metano, il cui parco peraltro aveva nel 1999 una consistenza non significativa; una stima imperfetta delle emissioni delle auto alimentate a GPL che, contrariamente alle altre tipologie di vetture, non vengono disaggregate in funzione della cilindrata; la sottostima delle emissioni di PM<sub>10</sub>, in quanto i modelli attribuiscono emissioni nulle di questo tipo di inquinante ai motori a benzina e a GPL. Queste imperfezioni del COPERT portano generalmen-

te a valori delle emissioni inferiori al loro valore effettivo, e, conseguentemente, ad una valutazione per difetto dei relativi costi esterni.

Per colmare la lacuna relativa al PM<sub>10</sub> sono stati adottati, per tutti i veicoli alimentati a benzina (autovetture, veicoli merci leggeri, motocicli e ciclomotori) e a GPL (autovetture), opportuni fattori di emissione, desunti con criteri conservativi dagli studi del progetto ExternE. La Tabella 14 tiene conto di questa integrazione.

#### *4.1.1 Emissioni inquinanti: i metalli pesanti*

Alla categoria dei metalli pesanti appartengono circa 70 elementi con densità superiore a 5 grammi/cm<sup>3</sup>, ma quelli rilevanti da un punto di vista ambientale sono una ventina. Essi sono presenti nell'aria, nell'acqua, nelle rocce e nei suoli, nella biosfera; il loro ciclo nell'ambiente avviene attraverso processi fisico-chimici e biologici anche molto complessi e non del tutto conosciuti. Molte attività umane interagiscono con i cicli dei metalli pesanti nell'ambiente alterandone i flussi e le concentrazioni naturali. Tra queste, i trasporti stradali sono ben noti come fonte principale, anche se in via di diminuzione, del più studiato tra i metalli pesanti: il piombo.

La eliminazione della benzina super, alla quale il piombo viene additivato per le sue proprietà antidetonanti e per la funzione lubrificante che esso esercita sulle sedi delle valvole di scarico, risolverà definitivamente il problema delle emissioni di questo pericoloso inquinante. Nel 1999, i trasporti stradali sono ancora stati responsabili, a livello nazionale, del rilascio in atmosfera di oltre 1.000 tonnellate di piombo e le concentrazioni in atmosfera

**TABELLA 14**  
**Trasporto su strada.**  
**Emissioni inquinanti nel 1999 (tonnellate)**

(a) nel complesso, (b) in ambito urbano

	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>	
	(a)	(b)	(a)	(b)
<b>STRADA</b>	<b>30.217</b>	<b>10.007</b>	<b>748.119</b>	<b>196.932</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>19.449</b>	<b>7.635</b>	<b>445.984</b>	<b>125.606</b>
Uso privato	18.479	7.234	409.297	108.592
<i>Autovetture</i>	17.437	6.547	404.836	106.527
non catalizzate, benzina	5.546	2.556	246.216	63.636
catalizzate, benzina	7.003	2.903	54.555	20.996
diesel	4.888	1.087	58.389	11.851
GPL	-	-	45.676	10.044
<i>Motocicli e ciclomotori</i>	1.042	687	4.461	2.065
motocicli	485	297	3.615	1.473
ciclomotori	557	390	846	592
Uso collettivo	970	401	36.687	17.014
<i>Autobus urbani</i>	249	232	10.723	10.160
<i>Pullman</i>	721	169	25.964	6.854
<b>Trasporto merci</b>	<b>10.768</b>	<b>2.372</b>	<b>302.135</b>	<b>71.326</b>
Veicoli leggeri	3.050	1.106	56.215	23.902
Veicoli pesanti	7.718	1.266	245.920	47.424

Fonte: elaborazione Amici della Terra su dati inventario CORINAIR, ExternE.



PM <sub>10</sub>		CO		COVNM	
(a)	(b)	(a)	(b)	(a)	(b)
<b>46.771</b>	<b>13.536</b>	<b>4.140.681</b>	<b>2.776.285</b>	<b>802.677</b>	<b>553.089</b>
<b>20.292</b>	<b>6.364</b>	<b>3.946.305</b>	<b>2.686.772</b>	<b>748.682</b>	<b>532.950</b>
18.552	5.532	3.936.813	2.681.562	744.387	530.868
18.146	5.256	3.028.497	2.098.968	454.193	322.705
1.765	642	1.933.290	1.375.660	361.664	253.514
2.283	663	860.477	642.711	62.970	52.597
14.020	3.923	43.866	15.148	9.517	3.904
77	28	190.863	65.450	20.043	12.691
406	276	908.316	582.594	290.194	208.163
209	132	494.297	292.780	40.381	30.904
197	144	414.019	289.814	249.813	177.259
1.740	832	9.492	5.210	4.295	2.082
465	445	3.369	3.222	1.000	970
1.275	387	6.123	1.988	3.295	1.112
<b>26.479</b>	<b>7.171</b>	<b>194.376</b>	<b>89.513</b>	<b>53.995</b>	<b>20.139</b>
9.828	3.446	114.516	71.483	14.787	9.883
16.651	3.725	79.860	18.030	39.208	10.256



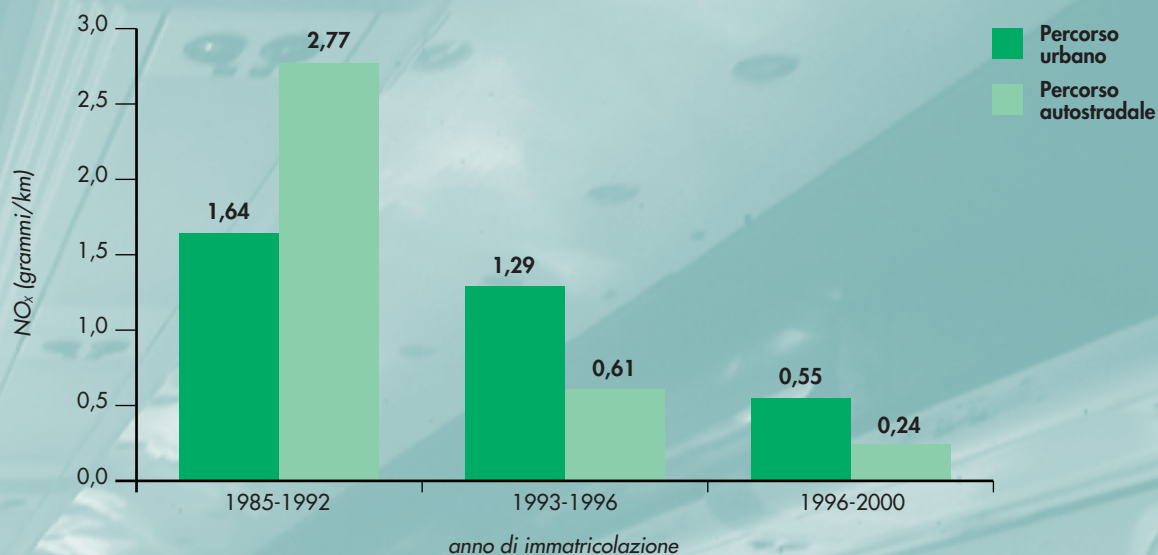
misurate in alcuni centri urbani sono risultate oltre 10 volte superiori a quelle in aree rurali. L'Agenzia Europea dell'Ambiente ha stabilito di monitorare, oltre alle emissioni di piombo, quelle di altri sei metalli pesanti presenti negli scarichi dei veicoli stradali: rame, cadmio, nickel, selenio, zinco e cromo. Tutti questi metalli, inalati, ingeriti, o in certi casi assorbiti attraverso la pelle, possono avere gravi effetti sulla salute umana, inducendo patologie sul sistema nervoso e su organi quali polmoni, fegato e reni. L'ultima "Relazione sullo stato dell'ambiente" del Ministero dell'Ambiente, nella sezione dedicata all'inquinamento dei suoli da metalli pesanti, riporta i risultati di una ricerca sulla concentrazione di piombo e cadmio lungo le nostre autostrade; secondo questa ricerca, solo a distanze dall'asse stradale superiori a 100 metri le concentrazioni di questi metalli nel suolo sono risultate normali, evidenziando il rischio di contaminazione per le colture agricole situate a distanze inferiori.

#### ***4.1.2. Emissioni inquinanti: la marmitta catalitica***

Il convertitore catalitico (detto "marmitta catalitica") è il dispositivo che, applicato allo scarico delle autovetture alimentate a benzina, ha lo scopo di abbattere le emissioni inquinanti di ossido di carbonio (CO), composti organici volatili (COV) e ossidi di azoto (NO e NO<sub>2</sub>, indicati come NO<sub>x</sub>), favorendo la reazione di ossidazione di CO e COV e, al contrario, la reazione di riduzione degli NO<sub>x</sub>; i prodotti di queste reazioni sono vapor d'acqua, anidride carbonica e azoto, non nocivi per la salute. Il dispositivo contiene un elemento in ceramica, con strut-

tura a nido d'ape, rivestito di una pellicola sottile di materiale catalitico attivo, formato da una miscela di metalli nobili: platino, palladio, rodio. Le autovetture dotate di marmitta catalitica devono utilizzare benzina senza piombo, perché il piombo "avvelena" i metalli catalizzatori, impedendone il funzionamento. La marmitta catalitica è obbligatoria dal 1° gennaio 1993 per tutte le auto a benzina in tutti i Paesi dell'Unione Europea. Si tratta di un dispositivo molto efficace quando opera in condizioni ottimali, ma di efficacia fortemente ridotta al di fuori di queste condizioni. In particolare, la marmitta catalitica è inefficace al di sotto dei 300-350 °C (caso di brevi percorsi urbani) e deve lavorare in un campo molto ristretto del rapporto aria/combustibile. Quest'ultimo è il motivo per cui nelle auto più recenti l'alimentazione non è più effettuata per mezzo del carburatore (che non è in grado di garantire la costanza di tale rapporto), bensì mediante sofisticati sistemi di iniezione diretta comandati da una sonda (la "sonda lambda"), che sente direttamente la quantità di ossigeno residuo nella marmitta; il sistema di iniezione ubbidisce al segnale della sonda regolando la portata del combustibile in modo da mantenere il rapporto aria/combustibile al suo valore ottimale. Il tempo di risposta del sistema è però superiore a 1 secondo, per cui nel caso di rapide accelerazioni e decelerazioni il rapporto aria/combustibile si allontana dal valore ottimale causando un aumento delle emissioni inquinanti scaricate nell'atmosfera. Nel tempo, diversi fattori provocano una progressiva perdita di funzionalità del convertitore catalitico. La sinterizzazione termica e l'avvelenamento sono le principali. La sinterizzazione altro non è che un processo di ricristallizzazione dei metalli nobili causato dalle forti temperature che

**FIGURA 2**  
**Auto a benzina di cilindrata inferiore a 1,4 litri.**  
**Fattori di emissioni di NO<sub>x</sub> (grammi/km)**

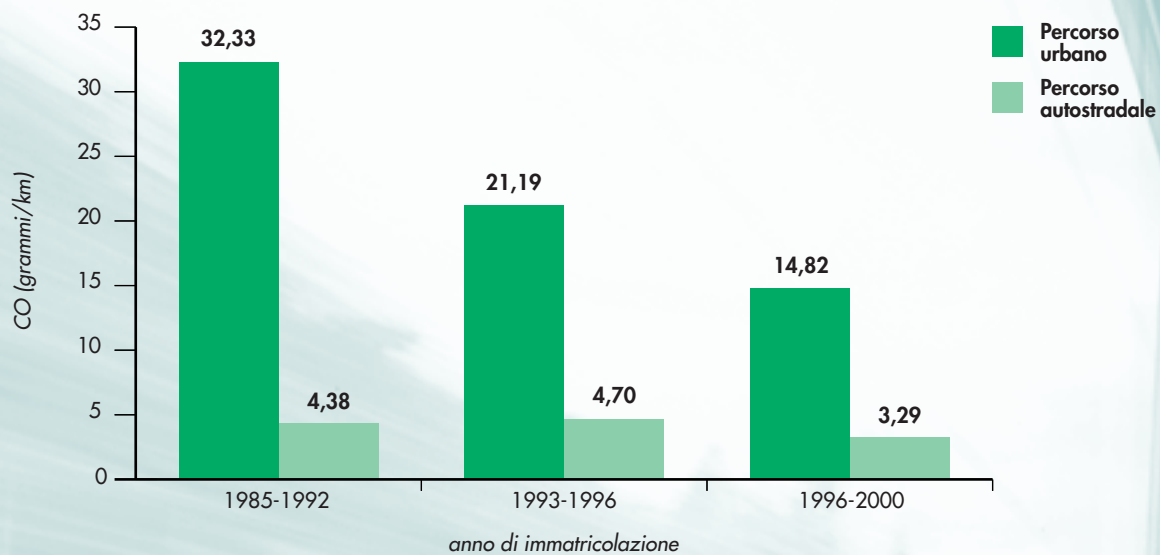


Fonte: modello COPERT dell'Agenzia Europea dell'ambiente.

il convertitore raggiunge in condizioni di carico elevato. L'avvelenamento è dovuto all'inevitabile presenza, nei gas che attraversano il convertitore, di sostanze che reagiscono con la sua parte attiva o che semplicemente la vanno lentamente a ricoprire; tali sostanze sono contenute ad esempio nell'olio lubrificante (fosforo e zinco) o nella benzina o nella stessa aria prelevata dall'ambiente esterno. In definitiva, l'efficienza è massima solo quando la marmitta catalitica è nuova e in condizioni di guida stazionarie, tipicamente su percorsi autostradali. E' difficile stabilire quanto può durare la marmitta catalitica; è certo che la sua vita è tanto più lunga quanto migliore è la manutenzione del motore e quanto più la vettura è utilizzata per lunghi viaggi. La direttiva UE 98/69 richiede che i limiti di emissione prescritti per i veicoli immatricolati a partire dal 2001 siano rispettati per 80.000 km.

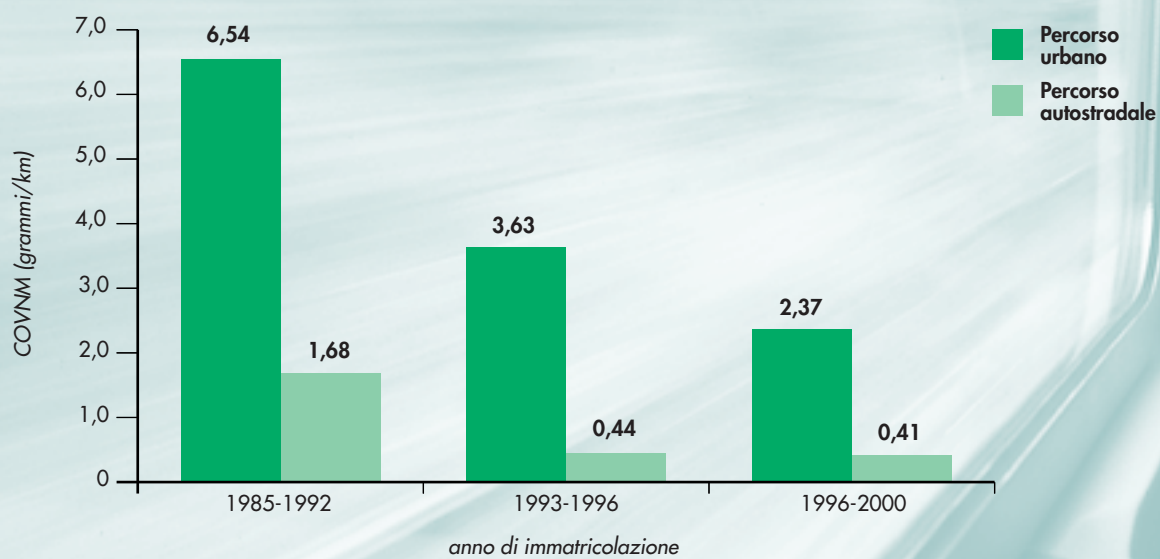
La Figura 2, la Figura 3 e la Figura 4, elaborate utilizzando il *software* COPERT, mostrano la diversa efficacia della catalizzazione per i tre inquinanti NO<sub>x</sub>, CO e COVNM su percorsi urbani e autostradali. Le auto immatricolate fino al 1992 sono prive di marmitta catalitica, quelle immatricolate tra il 1993 e il 1996 sono dotate di marmitta catalitica della prima generazione (Direttiva 91/441/EEC – EURO I), quelle immatricolate tra il 1997 e il 2000 sono dotate di marmitta catalitica della seconda generazione (Direttiva 94/12/EEC – EURO II). A partire dal 2001, è entrata in vigore la normativa EURO III, leggermente più severa. Si può osservare che l'effetto della catalizzazione è generalmente molto buono nei percorsi autostradali (con eccezione del CO), mentre nei percorsi urbani l'efficacia è minore per i motivi descritti in precedenza.

**FIGURA 3**  
**Auto a benzina di cilindrata inferiore a 1,4 litri.**  
**Fattori di emissioni di CO (grammi/km)**



Fonte: modello COPERT dell'Agenzia Europea dell'ambiente.

**FIGURA 4**  
**Auto a benzina di cilindrata inferiore a 1,4 litri.**  
**Fattori di emissioni di COVNM (grammi/km)**



Fonte: modello COPERT dell'Agenzia Europea dell'ambiente.

A livello nazionale, l'effetto dell'introduzione della marmitta catalitica è evidenziato nella Tabella 15, che mette a confronto le emissioni di  $\text{NO}_x$ , CO e COVNM imputabili all'intero parco di autovetture negli anni 1995, 1997 e 1999. Nonostante l'aumento del parco, per tutti e tre gli inquinanti si registra una progressiva diminuzione, che in piccola parte è dovuta anche al leggero aumento della quota di auto diesel, responsabili di queste emissioni in misura limitata (e, al contrario, responsabili di oltre il 75% delle emissioni di particolato). I valori forniti dalla Tabella sono il risultato di una recente revisione del *software* COPERT effettuata dall'ANPA, che ha introdotto alcuni perfezionamenti e ricalcolato e corretto i valori delle emissioni anche per gli anni precedenti.

Osserviamo che il *software* COPERT tiene conto dell'efficacia della marmitta catalitica nelle sue reali condizioni di impiego, ma non è ancora stato predisposto per considerare la sua perdita di efficacia con l'invecchiamento. Poiché le prime auto catalizzate (risalenti al 1993) nell'anno di riferimento di questo Rapporto (1999) avevano già un chilometraggio di circa 70.000 km, i valori delle emissioni inquinanti calcolati dal COPERT sono sicuramente per difetto.

La Tabella riporta anche le emissioni di gas serra del parco autovetture negli stessi anni. L'aumento delle emissioni di  $\text{CO}_2$  è legato all'incremento del parco e delle percorrenze complessive. L'evoluzione delle emissioni di metano ( $\text{CH}_4$ ) e di protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ) è dovuta proprio alla crescente diffusione della marmitta catalitica, la quale, mentre da un lato riduce le emissioni di metano (al pari di altri composti organici), favorisce la forma-

zione di protossido di azoto che ha un potere di riscaldamento globale 310 volte superiore a quello della  $\text{CO}_2$ . Si tratta di un effetto indesiderato della marmitta catalitica, che aggrava la già preoccupante situazione del settore dei trasporti nei confronti del problema dei cambiamenti climatici.

### **I punti deboli della marmitta catalitica**

- La marmitta catalitica è efficace solo a caldo. In un'auto utilizzata giornalmente per numerosi brevi tragitti intervallati da soste, essa non raggiunge mai la temperatura di lavoro ed è quindi quasi totalmente inefficace. Anche a caldo, l'efficacia si riduce in presenza di frequenti accelerazioni e decelerazioni.
- Oltre alle reazioni desiderate (ossidazione di CO e COV e riduzione degli  $\text{NO}_x$ ), la marmitta catalitica favorisce alcune reazioni indesiderate che portano alla formazione di acido solfidrico (a causa dello zolfo presente nella benzina), di ammoniaca e di protossido di azoto ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Quest'ultimo, presente anche nei gas di scarico delle auto non catalizzate e dei motori diesel, è un potente gas serra.
- Nonostante le quantità di platino, palladio e rodio impiegate in una marmitta catalitica siano minime (3 o 4 grammi in tutto) e che questi metalli non vengano virtualmente consumati durante il funzionamento, studi condotti in Germania, Spagna e Svezia hanno da tempo dimostrato che una minima parte di essi viene rilasciata nell'ambiente in seguito a processi di degradazione sia termica che meccanica. Recentemente sono stati pubblicati i risultati di una ricerca condotta dal CNR e

TABELLA 15

**Evoluzione del parco autovetture e delle relative emissioni inquinanti e di gas serra**

	1995	1997	1999	Variazione 1999/1995 (%)
Parco circolante (migliaia)	30.096	30.986	31.773	+ 5,6
Quota auto a benzina non catalizzate (%)	71	60	48	
Quota auto a benzina catalizzate (%)	15	25	35	
Quota auto diesel (%)	10	11	13	
Quota auto GPL (%)	4	4	4	
Emissioni di NO <sub>x</sub> (t)	557.369	497.304	404.836	- 27,4
Emissioni di CO (t)	4.374.852	3.796.590	3.028.497	- 30,8
Emissioni di COVNM (t)	709.511	603.476	454.194	- 36,0
Emissioni di CO <sub>2</sub> (t)	65.113.281	65.925.646	68.406.738	+ 5,1
Emissioni di CH <sub>4</sub> (tonn equivalenti di CO <sub>2</sub> ) (*)	695.016	676.872	599.550	- 13,7
Emissioni di N <sub>2</sub> O (tonn equivalenti di CO <sub>2</sub> ) (*)	1.500.710	1.801.410	2.338.950	+ 55,9

(\*) Il metano (CH<sub>4</sub>) e il protossido di azoto (N<sub>2</sub>O) nella tabella sono convertiti in termini di CO<sub>2</sub> equivalente in relazione al loro potere di riscaldamento globale (GWP) che è rispettivamente 21 e 310 volte superiore a quello della CO<sub>2</sub>

Fonte: Inventario CORINAIR, anni vari.



dall'Università Ca' Foscari di Venezia, che hanno fornito l'evidenza scientifica della dispersione di piccole tracce di questi elementi anche a grande distanza dalle fonti di emissione (arco alpino centro-orientale e addirittura Antartide e Groenlandia). Il fenomeno rappresenta, quindi, un problema ambientale di scala globale e non deve essere trascurato data l'estrema tossicità di questi metalli. Essi possono andare dispersi in modo improprio nell'ambiente anche in caso di rottamazione abusiva dell'autovettura o di incidente.

- La perdita di efficacia per invecchiamento della marmitta catalitica può essere rilevata e quantificata con precisione solo effettuando l'analisi dei gas di scarico. Non appaiono sufficienti a questo scopo i controlli periodici attualmente previsti (in molti Comuni le auto catalizzate sono esonerate dal "bollino blu"), né l'installazione dei dispositivi diagnostici di bordo (OBD) di cui alla direttiva UE 98/69, che si limitano ad informare l'utente del mal funzionamento e possono a loro volta guastarsi o essere manomessi.

## **4.2. Emissioni inquinanti in atmosfera.**

### **ROTAIA**

La valutazione in termini fisici delle emissioni inquinanti da trasporto su rotaia è stata effettuata separatamente per i veicoli a trazione elettrica (emissioni delle centrali termoelettriche, sorgenti fisse in ambiente extraurbano) e per quelli a gasolio (emissioni dei locomotori

diesel, sorgenti mobili che possono interessare sia l'ambiente extraurbano che quello urbano). La distinzione è necessaria tanto a causa delle diverse procedure di stima da adottare nei due casi, quanto ai fini delle successive valutazioni in termini monetari, in quanto uno stesso inquinante è caratterizzato da diversi valori di danno a seconda della tipologia della sorgente che lo emette.

Le emissioni legate alla trazione elettrica sono state valutate moltiplicando i consumi di elettricità per le emissioni unitarie, cioè associate ad ogni unità di energia (kWh) disponibile sulla rete pubblica e prelevato in alta tensione; queste ultime sono state desunte da dati forniti dall'ENEL e da terzi produttori. Le emissioni dovute ai locomotori diesel sono state valutate in base ai consumi di gasolio e ad opportuni fattori di emissione (per la valutazione dell' $\text{SO}_2$  si è assunto il tenore di zolfo nel gasolio pari allo 0,05% in peso, come da normativa). La Tabella 16 fornisce, separatamente per il trasporto passeggeri e per quello merci, i valori assoluti delle emissioni di ciascuno dei cinque inquinanti; per le Ferrovie dello Stato l'attribuzione delle emissioni al trasporto passeggeri e a quello merci è diretta conseguenza dell'attribuzione dei consumi di energia (proporzionalità alle tonnellate chilometro lorde rimorchiate).



TABELLA 16

**Trasporto su rotaia - Emissioni inquinanti nel 1999 (tonnellate)**

(1) imputabili alla trazione elettrica, (2) imputabili alla trazione diesel

	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>	
	(1)	(2)	(1)	(2)
<b>Passeggeri</b>	<b>6.533</b>	<b>107</b>	<b>2.329</b>	<b>6.450</b>
FS	5.778	83	2.059	4.970
Ferrovie concesse	238	25	85	1.480
Tranvie	152		54	
Metropolitane	365		130	
<b>Merchi (FS)</b>	<b>3.766</b>	<b>33</b>	<b>1.342</b>	<b>1.978</b>
Totale passeggeri (1)+(2)	6.641		8.778	
Totale merci (1)+(2)	3.799		3.321	
<b>TOTALE GENERALE</b>	<b>10.440</b>		<b>12.099</b>	

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

### 4.3 Emissioni inquinanti in atmosfera.

#### AEREO

Nel caso del trasporto aereo sono state valutate separatamente, per ciascun inquinante, le emissioni associate ai cicli LTO e quelle imputabili alla fase di crociera. La valutazione è stata effettuata prendendo a base i rispettivi consumi di carburante ed adottando i fattori di emissione tipici dell'aereo MD80, assunto come aereo rappresentativo delle flotte che

nel 1999 hanno utilizzato i nostri aeroporti; i fattori di emissione, maggiori per i cicli LTO che per la fase di crociera, riflettono le diverse condizioni che influiscono sulla combustione nelle varie fasi del volo. Il fattore di emissione dell'SO<sub>2</sub>, assunto pari a 6 grammi/kg di carburante, corrisponde al tenore di zolfo (0,3% in peso) che ancora oggi, a differenza di tutti gli altri carburanti, è consentito per il carburante turbo (kerosene per aviazione).

La distinzione tra emissioni nei cicli LTO ed emissioni in fase di crociera è necessaria ai fini

PM <sub>10</sub>		CO		COVNM	
(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
259	537	221	2.150	44	1.075
229	414	196	1.657	39	828
9	123	8	493	2	247
6		5		1	
14		12		2	
149	165	128	659	26	330
	796		2.371		1.119
	314		787		355
	1.110		3.158		1.474

delle valutazioni monetarie, in quanto i danni provocati dagli inquinanti sono legati alla quota della sorgente: i risultati delle stime sono indicati nella Tabella 17. La ripartizione tra trasporto passeggeri e trasporto merci corrisponde alla assunzione, adottata per i consumi di energia, relativa alla equivalenza tra 1 tkm e 4 pkm.



TABELLA 17

**Trasporto aereo commerciale - Emissioni inquinanti nel 1999 (tonnellate)**

(1) imputabili ai cicli LTO, (2) imputabili alla fase di crociera

	SO <sub>2</sub>		NO <sub>x</sub>	
	(1)	(2)	(1)	(2)
<b>Passeggeri</b>	<b>2.899</b>	<b>14.362</b>	<b>5.702</b>	<b>23.937</b>
<b>Merci</b>	<b>288</b>	<b>1.425</b>	<b>566</b>	<b>2.376</b>
<b>Totale passeggeri (1)+(2)</b>	<b>17.261</b>		<b>29.639</b>	
<b>Totale merci (1)+(2)</b>	<b>1.713</b>		<b>2.942</b>	
<b>TOTALE GENERALE</b>	<b>18.975</b>		<b>32.580</b>	

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

**4.4. Inquinamento.****STRADA, ROTAIA E AEREO  
a confronto**

I dati contenuti nelle Tabelle 14, 15 e 16 rispettivamente per la modalità stradale, su rotaia e aerea consentono interessanti considerazioni sulla compatibilità ambientale dei vari veicoli e modi di trasporto. Essi possono infatti essere rapportati ai rispettivi volumi di traffico per ricavare le emissioni in termini specifici, cioè riferite al pkm o alla tkm. Nella Tabella 18 le emissioni specifiche dei cinque inquinanti per autovetture, autobus e pullman, treni FS e aerei.

Si tratta di un confronto sommario in quanto ottenuto rapportando, per ciascuna categoria di veicoli, le emissioni totali annue, ovunque generate, ai volumi di traffico com-

pletivamente realizzati nell'anno in qualunque ambito; dal confronto comunque emerge la migliore prestazione della ferrovia rispetto alle autovetture ed anche ai mezzi pubblici su gomma, con l'eccezione dell'SO<sub>2</sub>, inquinante per il quale la ferrovia risulta penalizzata dalle forti emissioni delle centrali termoelettriche, raramente dotate di impianti di desolforazione anche se bruciano combustibili a tenore di zolfo relativamente elevato. Confronti più significativi possono essere effettuati calcolando le emissioni specifiche con riferimento a determinati ambiti e tenendo conto della differente dannosità delle emissioni in funzione della densità della popolazione esposta, delle condizioni di dispersione e in generale dei meccanismi attraverso i quali si producono gli effetti dannosi; ad esempio, per gli aerei occorre consi-

PM <sub>10</sub>		CO		COVNM	
(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
193	239	3.093	5.745	870	2.154
19	24	307	570	86	214
433		8.837		3.024	
43		877		300	
476		9.715		3.324	

derare che, mentre le emissioni di SO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> sono responsabili della formazione di piogge acide indipendentemente dalla quota (con l'aggravante che gli NO<sub>x</sub> emessi in crociera si comportano come precursori dell'ozono), gli altri inquinanti esplicano effetti dannosi solo se emessi a bassa quota (cicli LTO), per cui gli effetti delle emissioni generate in fase di crociera sono in pratica trascurabili.

#### 4.5. La valutazione monetaria

La valutazione in termini monetari dei danni associati all'inquinamento atmosferico ha fatto ampio riferimento ai risultati dei numerosi studi effettuati nell'ambito del progetto ExternE. Pur trattandosi, nel nostro caso, di

una valutazione su scala nazionale, e quindi necessariamente di tipo *top-down*, alle emissioni dei vari inquinanti sono stati attribuiti valori di danno diversificati in funzione del tipo e della localizzazione delle sorgenti di emissione. Essendo di gran lunga predominanti gli effetti dannosi sulla salute umana, un elemento essenziale è costituito dalla densità della popolazione esposta; nel caso dei trasporti stradali è quindi essenziale la distinzione tra ambito urbano ed extraurbano, nonché l'ulteriore specificazione del primo in città di piccole e medie dimensioni (popolazione compresa tra 20.000 e 250.000 abitanti) e città di grandi dimensioni (con più di 250.000 abitanti). La metodologia COPERT fornisce, per ciascuna categoria di veicoli, l'ammontare delle emissioni imputabili all'ambito urbano nel suo complesso; la sud-



**TABELLA 18**  
**Emissioni specifiche di inquinanti**  
**per alcune categorie di veicoli (mg/pkm)**

	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	CO	COVNM
Autovetture	27	634	28	4.743	711
Bus e pullman	10	393	19	102	46
Treni FS	143	172	16	45	21
Aerei	314	540	8	161	55

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

divisione di queste emissioni tra ambito urbano di città medio-piccole e ambito urbano di grandi città è stata fatta sulla base della rispettiva popolazione: in Italia circa due terzi della popolazione urbana (cioè della popolazione complessiva delle città di oltre 20.000 abitanti) vive in città medio-piccole e circa un terzo nelle grandi città. Valori di danno inferiori sono stati attribuiti alle emissioni stradali di ambito extraurbano e a quelle aeroportuali (cicli LTO), e valori ancora inferiori a quelle delle centrali termoelettriche (in quest'ultimo caso si è potuto fare riferimento allo studio specifico realizzato della Fondazione Eni Enrico Mattei come contributo italiano al progetto ExternE).

I valori adottati fanno riferimento alla esistenza, ormai accertata, di una relazione statisticamente significativa tra il tasso di

mortalità e morbidità e i livelli di inquinamento atmosferico. Ai fini delle valutazioni monetarie, viene fatta distinzione tra mortalità acuta (quando il decesso riguarda individui a rischio e avviene in tempi brevi) e mortalità cronica (che invece comprende i decessi che avvengono a distanza di anni a seguito di malattie cardio-respiratorie o di tumori conseguenti all'inquinamento); in entrambi i casi, gli studi di ExternE hanno stimato il numero di anni di vita statisticamente perduti, che risulta mediamente pari a 0,75 per la mortalità acuta (colpisce prevalentemente la popolazione anziana) e a 11 per la mortalità cronica. Il valore adottato da ExternE per un anno di vita perduto è di 116.202 euro, risultante da una media ponderata di valori differenziati per tipo di causa di morte e coerente con il valore della

vita statistica suggerito da ExternE come risultato di una rassegna ragionata degli studi più autorevoli (oltre 3.615.000 euro). Anche per i vari casi di morbidità acuta e cronica ExternE suggerisce alcuni valori monetari.

La valutazione monetaria mette in luce che l'inquinante che determina la quota prevalente dei costi esterni è il  $PM_{10}$  (tumori, effetti sull'apparato respiratorio e su quello cardiovascolare), seguito dagli  $NO_x$  che agiscono essenzialmente per via indiretta, cioè tramite inquinanti secondari, come i nitrati e l'ozono (la cui formazione è favorita dalla contemporanea presenza di COV). L'entrata in vigore delle normative che hanno imposto la progressiva riduzione del tenore di zolfo nei carburanti ha invece determinato una drastica riduzione degli effetti sanitari delle emissioni di  $SO_2$ , dimostrando l'efficacia dei provvedimenti che agiscono "a monte" dei problemi.

La Tabella 19 fornisce un riepilogo dei costi esterni imputabili all'inquinamento atmosferico e per completezza riporta anche i valori assoluti delle emissioni dei due inquinanti più dannosi ( $PM_{10}$  e  $NO_x$ ). Si nota che il traffico stradale, nonostante la tendenza a un lieve miglioramento dovuto all'introduzione di normative più severe su motori e carburanti, è sempre di gran lunga il maggiore responsabile di questa esternalità che, tra quelle esaminate, è la più pesante. In Italia non esistono stime ufficiali sulla mortalità e sulla morbidità legate all'inquinamento da trasporti; tuttavia negli ultimi anni alcuni studi hanno cominciato ad affrontare l'argomento.

Una considerazione semplificata può essere effettuata confrontando i costi esterni dell'in-

quinamento atmosferico con quelli degli incidenti, entrambi valutati in accordo ai valori monetari indicati da ExternE. Tenendo presente che in entrambi i casi la componente principale è rappresentata dalla mortalità e che nel caso dell'inquinamento il numero di anni di vita mediamente perduti dalle persone colpite (sia da mortalità acuta che cronica) è molto inferiore agli anni di vita perduti dalle vittime degli incidenti, si deduce che il numero di decessi imputabili all'inquinamento è superiore a quello dovuto all'incidentalità. Una conferma a ciò si avrebbe peraltro dagli studi condotti dalla Organizzazione Mondiale della Sanità, che hanno analizzato gli effetti di mortalità e morbidità da  $PM_{10}$  in otto città italiane e in tre Paesi europei (Austria, Francia e Svizzera). Utilizzando una metodologia analoga e integrando i dati sulle emissioni di  $PM_{10}$  con quelli relativi al particolato derivante dall'abrasione del manto stradale, dei pneumatici e da altre fonti veicolari, l'INFRAS nel suo ultimo studio sulle esternalità dei trasporti in 17 Paesi europei (i 15 dell'Unione, Svizzera e Norvegia) valuta un numero complessivo di morti da inquinamento di oltre 115.000, di cui 17.400 in Italia.

La Figura 5 mostra i costi esterni specifici dell'inquinamento per le varie modalità e categorie di veicoli. Nell'ambito del trasporto passeggeri, rotaia e aereo si dimostrano migliori della strada nel suo complesso; ma all'interno della modalità stradale i vari veicoli sono caratterizzati da prestazioni notevolmente differenti tra loro. La migliore prestazione è quella delle auto catalizzate (a pari merito con la rotaia), la peggiore quella delle auto diesel, a causa della fortissima emissione di particola-

TABELLA 19

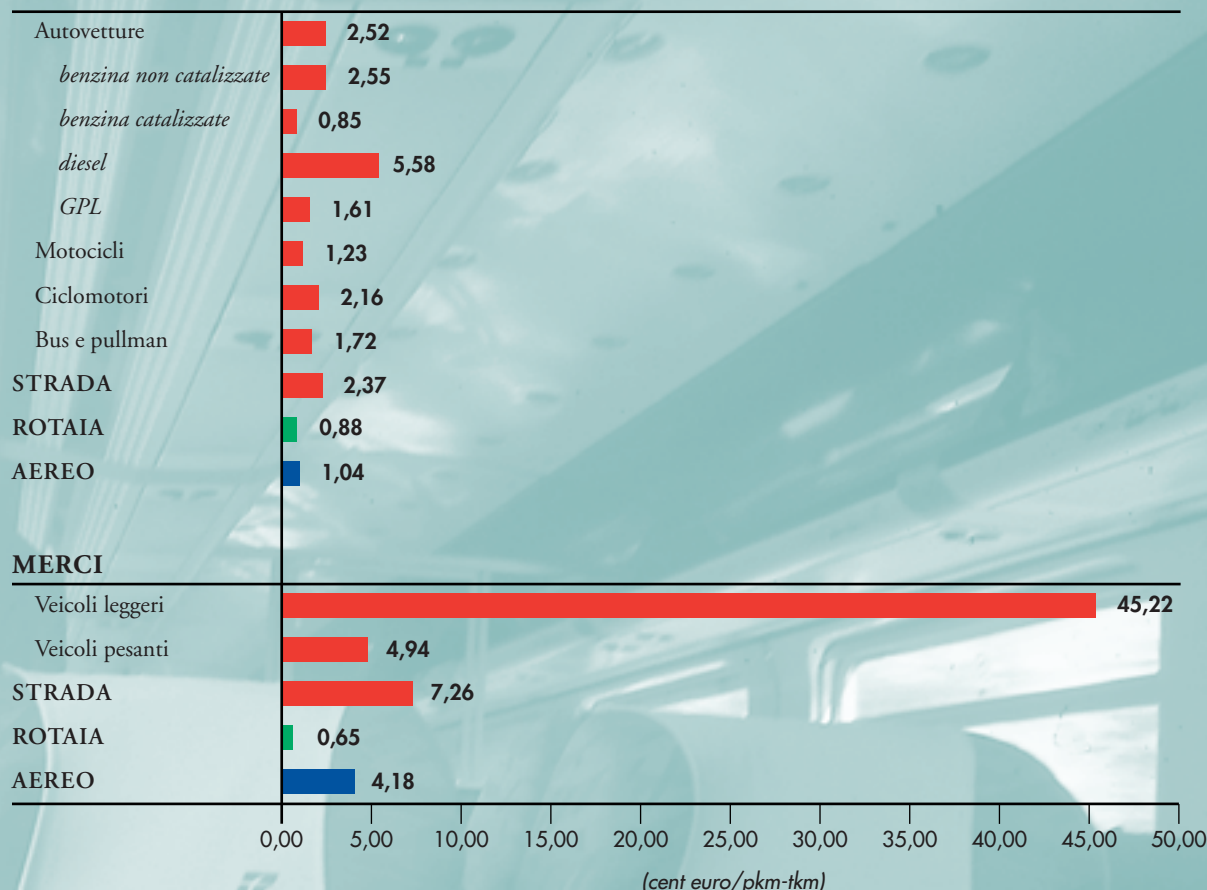
**Strada, rotaia, aereo. Emissioni di PM<sub>10</sub> e di NO<sub>x</sub> e costi esterni dell'inquinamento atmosferico (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, COVNM) nel 1999**

	Emissioni PM <sub>10</sub> (t)	Emissioni NO <sub>x</sub> (t)	Costi esterni (10 <sup>6</sup> euro)	(%)
<b>STRADA</b>	<b>46.771</b>	<b>748.119</b>	<b>36.628</b>	<b>96,8</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>20.292</b>	<b>445.984</b>	<b>18.704</b>	<b>49,4</b>
Uso privato	18.552	409.297	17.100	45,2
<i>Autovetture</i>	18.146	404.836	16.064	42,4
non catalizzate, benzina	1.765	246.216	4.969	13,1
catalizzate, benzina	2.283	54.555	2.168	5,7
diesel	14.020	58.389	8.272	21,9
GPL	77	45.676	654	1,7
<i>Motocicli</i>	209	3.615	306	0,8
<i>Ciclomotori</i>	197	846	730	1,9
Uso collettivo - Bus e pullman	1.740	36.687	1.604	4,2
<b>Trasporto merci</b>	<b>26.479</b>	<b>302.135</b>	<b>17.924</b>	<b>47,4</b>
Veicoli leggeri	9.828	56.215	6.423	17,0
Veicoli pesanti	16.651	245.920	11.501	30,4
<b>ROTAIA</b>	<b>1.110</b>	<b>12.099</b>	<b>590</b>	<b>1,6</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>796</b>	<b>8.778</b>	<b>432</b>	<b>1,1</b>
<b>Trasporto merci</b>	<b>314</b>	<b>3.321</b>	<b>158</b>	<b>0,4</b>
<b>AEREO</b>	<b>476</b>	<b>32.580</b>	<b>630</b>	<b>1,7</b>
<b>Trasporto passeggeri</b>	<b>433</b>	<b>29.639</b>	<b>573</b>	<b>1,5</b>
<b>Trasporto merci</b>	<b>43</b>	<b>2.942</b>	<b>57</b>	<b>0,2</b>
<b>TOTALE GENERALE</b>	<b>48.356</b>	<b>792.798</b>	<b>37.848</b>	<b>100,0</b>

Fonte: elaborazione Amici della Terra.

**FIGURA 5**  
**Costi esterni specifici dell'inquinamento atmosferico**

**PASSEGGERI**



Fonte: elaborazione Amici della Terra.

to; autobus e pullman impongono costi per pkm doppi rispetto alle auto catalizzate ma più di tre volte inferiori a quelli delle auto diesel. I ciclomotori sono più dannosi dei mezzi pubblici. E' presumibile che negli anni futuri si avrà la tendenza a un notevole miglioramento, dovuto sia alla graduale sostituzione delle auto a benzina non catalizzate, sia al prevalere delle auto diesel di nuova generazione (le cosiddette ecodiesel); anche la graduale scomparsa dei ciclomotori a due tempi avrà un ruolo non indifferente.

Nell'ambito del trasporto merci il divario tra strada e rotaia è molto più evidente. Il motivo è sempre da ascrivere alle forti emissioni di particolato (ma anche di  $\text{NO}_x$ ) dei motori diesel e allo scarso fattore di occupazione medio dei veicoli leggeri usati per la distribuzione delle merci, dovuto alla nota irrazionalità che caratterizza questa attività. Il valore del costo esterno per tkm imposto dai veicoli leggeri è scandalosamente elevato e dimostra la necessità di provvedimenti radicali e risolutivi.