



APAT

Agenzia per la protezione
dell'ambiente e per i servizi tecnici

Analisi dei fattori di emissione di CO₂ dal settore dei trasporti

**Metodo di Riferimento IPCC,
modello COPERT ed analisi sperimentali**

Informazioni legali

L'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici 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.

APAT - Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici
Via Vitaliano Brancati, 48 - 00144 Roma
www.apat.it

© APAT, Rapporti 28/2003

ISBN 88-448-0089-6

Riproduzione autorizzata citando la fonte

Elaborazione grafica

APAT

Grafica di copertina: Franco Iozzoli

Foto: Paolo Orlandi

Coordinamento tipografico

APAT

Impaginazione e stampa

I.G.E.R. srl - Viale C. T. Odiscalchi, 67/A - 00147 Roma

Stampato su carta TCF

Finito di stampare aprile 2003

Autori

Mario CONTALDI, Michele ILACQUA

Indice

PREMESSA	1
INTRODUZIONE	3
1. LA STIMA DELLE EMISSIONI DI GAS SERRA	5
1.1 Considerazioni generali	5
1.2 Fattori di emissione nel settore dei trasporti	6
2 METODO DI RIFERIMENTO CON I FATTORI DI EMISSIONE IPCC	7
2.1 Introduzione	7
2.2 Metodo di riferimento con dati del Bilancio Energetico Nazionale	7
2.3 Procedura seguita per il calcolo delle emissioni di CO ₂	8
3 APPROCCIO SETTORIALE CON LA METODOLOGIA COPERT	9
3.1 Descrizione della metodologia	9
3.2 Confronto dei fattori di emissione COPERT con i fattori IPCC-OECD	10
4. RISULTATI SPERIMENTALI ED ANALISI CRITICA DELLE METODOLOGIE	13
4.1 Analisi sperimentali	13
4.2 Verifica analitica della metodologia COPERT	14
4.3 Considerazioni preliminari sui fattori di emissione dei carburanti	16
4.4 Relazione tra qualità dei combustibili ed emissioni di CO ₂	17
5. CONFRONTO CON I FATTORI DI EMISSIONE IPCC – OECD	19
5.1 Aggiornamento fattori di emissione	19
5.2 Serie storica dei fattori di emissione	20
6. CONCLUSIONI	23
7. BIBLIOGRAFIA	25
Allegato 1: Fattori di emissione dei carburanti (fonte IPCC, Linee Guida per gli inventari delle emissioni di gas ad effetto serra)	27
Allegato 2: Approccio di riferimento: emissioni di CO₂ dal settore dei trasporti, anno 1998	29
Allegato 3: Emissioni di CO₂ dal settore dei trasporti su strada, anno 1998, stimate dal programma COPERT III	31

Premessa

L'attività di preparazione degli inventari nazionali dei gas serra ha assunto un ruolo centrale nell'ambito della Convenzione quadro sui cambiamenti climatici (1992) e del Protocollo di Kyoto (1997) in particolare. Le informazioni del censimento nazionale delle emissioni, che in Italia viene realizzato dall'APAT, sono infatti utilizzate come base per la valutazione dell'attuazione degli impegni di riduzione delle emissioni di gas serra. Per questo motivo i singoli Paesi sono tenuti a qualificare i propri sistemi di preparazione dell'inventario nazionale dei gas serra anche tramite l'introduzione di un sistema di "quality assurance".

Gli oneri connessi al rispetto degli obiettivi di riduzione¹ sono di tale entità che aggiustamenti anche piccoli dei valori dei fattori di emissione possono essere di importanza cruciale. Questo rapporto illustra il processo di revisione dei fattori di emissione di CO₂ dal settore trasporti sulla base dei risultati sperimentali di analisi dei carburanti realizzati nell'ambito di una collaborazione APAT – Stazione Sperimentale per i Combustibili; tale revisione consente di eliminare alcune discrepanze tra i due approcci – quello semplificato e quello settoriale – correntemente utilizzati per stimare dette emissioni.

I fattori di emissione rivisti con riferimento alle analisi condotte su benzina, gasolio e GPL nel periodo settembre 2000 – agosto 2001 sono più alti rispetto a quelli utilizzati nella serie storica 1990 – 1999 soprattutto per la benzina, il che ha posto il problema della rivalutazione dell'intera serie storica delle emissioni di CO₂, senza la quale si sarebbe avuto un aumento indebito – e ingiustamente penalizzante – delle emissioni di CO₂ a partire dal 2000. Le variazioni nel settore trasporti a causa della revisione dei fattori di emissione sono dell'ordine dell'1,8%, mentre la variazione nelle emissioni complessive è di circa lo 0,4%, quantità piccole in assoluto che confermano la solidità tecnico-scientifica delle stime fatte, ma non trascurabili viste le percentuali di riduzione in gioco.

Mario C. Cirillo
Responsabile Unità Interdipartimentale
Censimento delle fonti di emissione

¹ Tra il 2008 e il 2012 l'Italia deve ridurre del 6,5% le emissioni di gas serra rispetto al 1990.

Introduzione

Lo scopo di questo lavoro è quello di verificare i fattori di emissione di CO₂ relativi al settore energetico ed in particolare del settore dei trasporti, il cui consumo energetico riferito all'anno 1999 è di 1692 TJ (26,8 % dei consumi energetici nazionali), mentre la quantità di CO₂ emessa nello stesso anno sempre per il settore trasporti ammonta a 121.2 Mt (28,2% delle emissioni nazionali di CO₂). I risultati di un lavoro sperimentale di analisi dei carburanti della Stazione sperimentale combustibili sono messi a confronto con le indicazioni della metodologia di riferimento per il calcolo delle emissioni della CO₂ elaborata dall'Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC, 1996 revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) e della metodologia implementata nel programma COPERT III (COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport) dell'Agenzia europea dell'ambiente.

SUMMARY

The aim of this work is the verification of CO₂ emission factors of the Italian energy system and specifically of the transportation sector, that consumed 1692 TJ in 1999 (26,8% of total national energy consumption), and produced 121.2 Mt of CO₂ (28,2 % of total national CO₂ emissions) in the same year. The results of analysis of fuel samples performed by "Stazione Sperimentale Combustibili" are checked against the emission factors used in the Reference Approach of the Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC, 1996 revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories) and the emission factors considered in the COPERT III programme, of EEA (European Environment Agency).

1. La stima delle emissioni di gas serra

(a cura di M. Contaldi)

1.1 Considerazioni generali

Le emissioni di gas ad effetto serra possono essere di origine antropogenica o naturale. Le emissioni di origine naturale sono in particolare dovute alle attività vulcaniche, agli incendi forestali di origine naturale ed altri eventi non influenzati dalle attività umane.

Le emissioni di origine antropogenica si riferiscono, invece, a tutte quelle attività influenzate dall'uomo, in particolare alle emissioni di origine energetica, ovvero derivanti dall'uso dei combustibili, a quelle dovute ai processi industriali, all'agricoltura, alle foreste gestite ed al trattamento dei rifiuti. Le emissioni di anidride carbonica (CO₂) di origine energetica corrispondono a circa il 90% delle emissioni di gas ad effetto serra; in questo lavoro si valuteranno le emissioni di anidride carbonica dal sistema dei trasporti. Ovviamente, ma forse non è superfluo ricordarlo, solo le emissioni di origine antropogenica sono oggetto dei trattati internazionali in materia, quali la Convenzione Quadro sul Clima ed il Protocollo di Kyoto.

La stima di queste emissioni si effettua con cadenza annuale con metodologie approvate da organismi scientifici internazionali quali l'Intergovernmental Panel for Climate Change (IPCC-<http://www.ipcc.ch>) [3]. In particolare per le emissioni di anidride carbonica di origine energetica sono previste due diverse metodologie, il metodo cosiddetto di riferimento (*Reference Approach*) o metodo semplificato, e metodi dettagliati o settoriali.

La metodologia è descritta in dettaglio nelle linee guida per gli inventari nazionali delle emissioni di gas ad effetto serra edite da IPCC-OECD nel 1996. Queste linee guida, in tre volumi, sono state recentemente aggiornate e sono disponibili in rete al sito del segretariato della convenzione (<http://www.unfccc.de>).

Mediante il metodo di riferimento si calcolano le emissioni di anidride carbonica valutando il contenuto di carbonio dei combustibili fossili utilizzati dal sistema energetico e sottraendo quanto di questo non è emesso sotto forma di anidride carbonica per un qualsiasi motivo (perdite, usi non energetici); la quantità di carbonio così ottenuta è considerata emessa sotto forma di CO₂. La metodologia prevede che con pochi dati di partenza sui quantitativi di combustibili prodotti o importati, disponibili, nel caso dell'Italia, direttamente dal Bilancio Energetico Nazionale (BEN) [4], (a cura del Ministero dell'Industria) sia possibile giungere ad una stima approssimata delle emissioni. A tal fine sono indicati un gran numero di valori stimati a livello internazionale, da utilizzarsi nel caso non siano disponibili valutazioni più precise.

Il metodo settoriale prevede la stima dettagliata dei quantitativi di combustibili fossili effettivamente bruciati nei vari settori di utilizzo e sono in genere possibili almeno due diversi livelli di approfondimento dipendenti dal livello di disaggregazione settoriale. La decisione sul livello di approfondimento è lasciata al paese, in base ai dati disponibili. Nel caso italiano la stima è fatta con una metodologia comune europea, la metodologia CORINAIR (CORE INventory AIR emissions) [5], proposta dall'Agenzia Europea per l'Ambiente [6] ed utilizzata per la valutazione anche di altri inquinanti. Il calcolo delle emissioni effettuato con i due metodi dovrebbe portare a risultati analoghi, se fatto partendo dagli stessi dati di base.

1.2 Fattori di emissione nel settore dei trasporti

Il settore dei trasporti ha un peso percentuale rilevante sul totale dei consumi energetici, nel 1999 pari al 26,8 %, ed anche sulla CO₂ prodotta, pari al 28,2% sul totale nel medesimo anno. L'incidenza del settore è aumentata negli ultimi anni: nel 1990 rappresentava il 24,9% delle emissioni e si prevede che la tendenza continui nei prossimi anni. Le emissioni sono originate in modo preponderante, circa il 95%, dalla combustione dei carburanti per la modalità stradale.

Il calcolo delle emissioni, secondo il "reference approach" IPCC, si fonda su una serie di fattori di emissione per i diversi carburanti, basati su valori medi internazionali. Inoltre il BEN riporta esplicitamente i consumi del settore, pertanto è possibile effettuare una stima dettagliata delle emissioni utilizzando i consumi del settore ed i fattori di emissione internazionali.

Nel caso di utilizzo della metodologia CORINAIR per eseguire la stima dettagliata delle emissioni del settore dei trasporti è anche possibile utilizzare un modello di calcolo, il modello COPERT (COmputer Program to calculate Emissions from Road Transport) [7], che calcola automaticamente le emissioni di anidride carbonica sulla base di una serie di parametri relativi alle caratteristiche del combustibile. Per il consumo complessivo di combustibile del settore si fa sempre riferimento al BEN.

Nel settore dei trasporti queste due diverse metodologie di dettaglio portano a emissioni complessive diverse, pur partendo dagli stessi consumi complessivi. Il problema era già evidente nel corso della stima delle emissioni del 1994 ⁽²⁾ ma è diventato non più eludibile nel caso dell'inventario del 1997 ^(3,4) realizzato presso questa Agenzia, quando tutte le altre differenze tra le diverse metodologie di stima sono state risolte. Per dirimere la questione è stata avviata una attività di approfondimento analitico e sperimentale dei fattori di emissione con la Stazione sperimentale dei combustibili (SSC) [8] che ha portato ad alcuni interessanti risultati. Nei successivi capitoli saranno prima brevemente descritte le due metodologie analitiche ed i fattori di emissione utilizzati, quella IPCC e quella utilizzata da COPERT, e quindi analizzati criticamente i risultati alla luce di una serie di dati sperimentali sui carburanti.

² ENEA, inventario emissioni nazionali 1994 nell'ambito di: Corinair 1994 Inventory, by M. Ritter, EEA 1998, ISBN 92-9167-102-9

³ Brini S., Desiato F., Fortuna F., Gaudio D., Liburdi R. Scalambretti R., Emissioni in atmosfera e qualità dell'aria in Italia, ANPA, Serie Stato dell'Ambiente 6/1999 [1]

⁴ Saija S., Contaldi M., De Lauretis R., Ilacqua M. Liburdi R., Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale, ANPA, Serie Stato dell'ambiente 12/1999 [2]

2. Metodo di riferimento con i fattori di emissione IPCC

(a cura di M. Contaldi)

2.1 Introduzione

Le emissioni di CO₂ sono prodotte quando viene bruciato del combustibile contenente carbonio. Per ottenere una valutazione delle emissioni di CO₂ dal sistema dei trasporti il metodo proposto parte dagli usi finali del combustibile (metodologia del tipo "bottom-up"). Il Bilancio Energetico Nazionale, contiene i dati di consumo finale dei diversi settori economici, in particolare il settore dei trasporti; i fattori di emissione sono specificati in letteratura e comunque nella metodologia IPCC, pertanto la stima delle emissioni si risolverebbe in una serie di semplici operazioni matematiche.

La metodologia prevede un'ampia libertà del paese nella scelta dei fattori di emissione. I dati sono però controllati dal segretariato della Convenzione sul Clima ed eventuali differenze dei fattori di emissione dai valori indicati nelle metodologie approvate vanno giustificati.

2.2 Metodo di riferimento con dati del Bilancio Energetico Nazionale

I dati necessari sono ricavabili da diverse fonti statistiche, nel seguito indicate in modo dettagliato, la più importante delle quali è:

- il BEN (Bilancio Energetico Nazionale, edito annualmente dal Min. Industria).

Secondo la metodologia di riferimento dell'IPCC (IPCC revised Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 1996, Vol. 2), le emissioni totali annue di CO₂ dal settore dei trasporti si calcolano come segue:

1. si stima, per ogni tipo di carburante, il consumo annuo e si converte tale consumo in unità energetiche (Tcal);
2. si moltiplica, per ciascun tipo di carburante, tale consumo per il relativo fattore di emissione in modo da valutarne la quantità in massa di C emesso;
3. si converte il carbonio emesso in emissioni di CO₂ utilizzando opportuni fattori correttivi per tenere conto del carbonio non ossidato a CO_{2i};
4. si sommano le emissioni relative ai vari tipi di carburante.

Moltiplicando i consumi interni lordi di ciascun combustibile per il relativo fattore di emissione e sommando su tutti i combustibili si ottiene la valutazione delle cosiddette emissioni apparenti. Il nome "emissioni apparenti" è giustificato dal fatto che esse corrispondono alle emissioni che si avrebbero se tutto il carbonio contenuto nei combustibili usati fosse ossidato a CO₂.

Per valutare le emissioni "reali" del settore di pertinenza del paese nell'ambito della Convenzione sul Clima bisogna sottrarre alle emissioni apparenti le seguenti tre componenti:

1. le emissioni di CO₂ originate dalla combustione di biomasse, in quanto si assume che le emissioni di CO₂ dovute alla combustione di biomasse sia uguale all'assorbimento di CO₂ dovuto alla sua ricrescita (nel caso dei trasporti questo si applica, ad esempio, al biodiesel). Le emissioni di CO₂ originate dalla combustione di biomasse sono contabilizzate solo per informazione da inseri-

- re nelle Comunicazioni Nazionali in ottemperanza all'articolo 4.1(a) della Convenzione sui Cambiamenti Climatici;
2. le emissioni di CO₂ dovute ai trasporti internazionali navali ed aerei; i primi sono evidenziati nel bilancio energetico nazionale, i secondi lo erano fino al 1975, attualmente essi vengono stimati;
 3. le emissioni evitate, in quanto il carbonio contenuto nei combustibili non è stato ossidato. Esistono degli appositi fattori di default nel caso non si disponesse di stime più precise.

2.3 Procedura seguita per il calcolo delle emissioni di CO₂

Nell'allegato 1 sono indicati i fattori di emissione per ciascun tipo di carburante. Tali fattori di emissione, che tengono conto di un'eventuale combustione incompleta per mezzo del fattore di ossidazione indicato in tabella, sono estratti dal volume 3 dell'IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (1996).

In allegato 2 è riportata la tabella 1.A(a) SECTORAL BACKGROUND DATA FOR ENERGY - Fuel Combustion Activities - Sectoral Approach, sh. 3 of 4 per l'anno 1998 estratto dalla I versione dell'inventario per quell'anno. Tale tabella è utile per illustrare il procedimento adottato per il calcolo delle emissioni della CO₂, a partire dai combustibili sia primari che secondari destinati ai trasporti, e poi calcolare il quantitativo di carbonio che viene ossidato a CO₂, utilizzando i relativi fattori di emissione. I fattori di emissione riportati in allegato 2 sono leggermente diversi da quelli in allegato 1 in quanto risultati di una serie di elaborazioni ed arrotondamenti.

Le stime dei consumi contenute nell'Allegato 2 sono già al netto dei carburanti utilizzati per i bunkeraggi marittimi ed aerei e dei biocombustibili. La stima per questi ultimi e per i bunkeraggi marittimi è esplicitamente menzionata nel BEN; il carbonio contenuto nei combustibili usati; per il traffico aereo internazionale è stato stimato in modo convenzionale⁵.

⁵ Per quanto riguarda i consumi da trasporto aereo internazionale, si è considerato che tale consumo sia pari a circa due terzi del consumo nazionale di carboturbo.

3. Approccio settoriale con la metodologia COPERT

(a cura di M. Ilacqua)

In allegato 3 sono riportate le stime di emissione di gas serra da parte del traffico su strada effettuate con il programma COPERT III sulla base dei consumi di carburanti stimati dal BEN per il 1998. Queste emissioni sono state calcolate con la metodologia descritta nei seguenti paragrafi.

3.1 Descrizione della metodologia

La metodologia COPERT stima le emissioni di CO₂ sulla base del consumo di carburante, assumendo che il carbonio contenuto in esso sia portato tutto allo stato di massima ossidazione, ovvero a CO₂.

Nel caso si vogliano calcolare le emissioni complessive di anidride carbonica si utilizza il calcolo stechiometrico, supponendo che tutto il carbonio sia ossidato ad anidride carbonica, con la seguente formula:

$$E_{CO_2}^{CALC} = 44,01 \times \frac{FC}{12,01 + 1,01r_{H:C}} \quad (1)$$

dove,

$r_{H:C}$ rapporto tra numero di atomi di idrogeno e carbonio nel combustibile impiegato (~1,8 per benzina e ~2,0 per diesel).

FC Fuel consumption, consumo di combustibile, in peso

$E_{CO_2}^{CALC}$ Emissioni calcolate di CO₂, in peso con la stessa unità di misura di cui sopra

Nel caso si intendesse calcolare le emissioni di anidride carbonica all'uscita del tubo di scarico dei veicoli vanno tenuti in considerazione i quantitativi di carbonio contenuti nelle emissioni di monossido di carbonio, composti organici volatili e particolato. Si applica la formula seguente:

$$E_{CO_2}^{CALC} = 44,01 \times \frac{FC^{CALC}}{12,01 + 1,01r_{H:C}} - \frac{E^{CO}}{28,01} - \frac{E^{VOC}}{13,85} - \frac{E^{PM}}{12,01} \quad (2)$$

dove

E^{CO} = emissioni di CO in peso per mole di carburante combusto

E^{VOC} = emissioni di VOC in peso per mole di carburante combusto

E^{PM} = emissioni di particolato carbonioso per mole di carburante combusto

Da quanto precede è implicita l'assunzione che la miscela idrocarburica sia costituita esclusivamente dai componenti idrogeno e carbonio. Infatti nella formulazione (2), relativamente alla parte per il calcolo della quantità stechiometrica di anidride carbonica prodotta, sono presi in considerazione solo i pesi atomici del carbonio e dell'idrogeno.

3.2 Confronto dei fattori di emissione COPERT con i fattori IPCC-OECD

Un controllo incrociato tra i dati emissivi del trasporto su strada dell'Allegato 2 (riga b. Road transportation) e dell'Allegato 3 (somma dei totali per tipologia di carburanti) evidenzia differenze piccole ma non trascurabili tra le emissioni calcolate con il modello COPERT e quelle fatte a partire dai fattori di emissione IPCC-OECD sulla base degli stessi consumi di carburanti (differenza percentuale pari a 4% per la benzina, 3,5% per il gpl, inferiore all'1% per il gasolio). Tali differenze percentuali sono le stesse per gli inventari degli anni precedenti (1990-1996).

La valutazione comparata mostra che il modello COPERT si basa per il calcolo delle emissioni su di un rapporto medio tra idrogeno / carbonio (rapporto H/C) dei carburanti (benzina e gasolio), ritenuto dalla metodologia indipendente dal contenuto energetico o dalla densità dei carburanti e desunto dalla letteratura internazionale. In particolare i rapporti H/C consigliati dal programma, sono pari a 1,8 per le benzine, 2,0 per i gasoli e 2,58 per il gpl.

Dalle considerazioni precedenti è evidente che esiste una differenza tra i fattori di emissione utilizzati da COPERT e quelli IPCC-OECD:

- il dato IPCC-OECD stima le emissioni a partire da un determinato contenuto energetico dei carburanti e nulla dice del rapporto H/C;
- il dato BEN, normalizza le benzine ed i gasoli rispetto al loro contenuto energetico che risulta diverso da quello IPCC-OECD;
- la metodologia seguita dal modello COPERT si basa su considerazioni termochimiche di base.

L'analisi delle differenze tra i fattori di emissione suddetti è effettuata nel capitolo 4.

Con valutazioni indirette (ad esempio eq. (1)) è possibile ricavare dei rapporti H/C per i primi due approcci (IPCC⁶ e MICA) e confrontarli con quelli consigliati nel modello COPERT, con i dati di letteratura (manuali Perry-Chilton⁷ e Heywood⁸) e con i risultati sperimentali. In tabella 1 sono illustrate per ogni approccio di stima le seguenti informazioni: %C, %H, H/C, fattore emissione CO₂ derivato. Si sottolinea che nel caso del dato indicato come "fattore emissione BEN" non si tratta di una composizione del prodotto comunicata dal Ministero Industria ma di un fattore di emissione (e quindi del rapporto H/C) ricavato da una benzina che abbia il potere calorifico indicato nel BEN ed il fattore di emissione per unità di energia indicato dall'IPCC/OECD.

Anche una rapida lettura dei dati in tabella mostra l'estrema variabilità dei dati con differenze, per la benzina, fino al 5% nelle emissioni specifiche ed addirittura del 25% nel rapporto H/C. Per il gasolio i fattori di emissione sono più costanti ma i rapporti H/C variano fino al 15%. La differente composizione dei carburanti di riferimento per le diverse normative, prodotti con miscele di diversi idrocarburi, non può giustificare simili variazioni per benzina e gasolio. Le differenze tra le varie fonti sono quindi evidenti e lo è anche l'importanza di effettuare campagne sperimentali che correlassero l'analisi chimica dei carburanti nazionali (e quindi il rapporto H/C) con il loro contenuto energetico.

⁶ Op. citata, IPCC Guidelines (1996) vol. 3 pag. 1.70 1.83

⁷ Perry - Chilton, Handbook for chemical Engineers, 1988 ed.

⁸ J.B. Heywood, Internal combustion Engines Fundamentals, 1988

Tabella 1 - Confronto tra i rapporti H/C

Caratterizzazione chimico-fisica di combustibili per autotrazione				
1 settembre 2000 - 31 agosto 2001				
	Carbonio	Idrogeno	H/C	CO2
	% m/m	% m/m		fattore emissione (kg CO ₂)/(kg fuel)
BENZINA				
media valori misurati	85,7	13,9	1,9	3,14
approccio IPCC / OECD	84,50	15,30	2,16	3,10
approccio BEN	83,03	16,97	2,44	3,04
approccio COPERT	86,88	13,12	1,80	3,18
Dati di letteratura:				
	Perry C.		2,14	3,11
	Heywood		1,90	3,17
GASOLIO				
media valori misurati autotrazione	86,6	13,4	1,8	3,17
media valori misurati riscaldamento	86,6	13,3	1,8	3,17
approccio IPCC / OECD	87,53	12,47	1,70	3,21
approccio BEN	86,22	13,78	1,90	3,16
approccio COPERT	85,63	14,37	2,00	3,14
Dati di letteratura:				
	Perry C.		1,91	3,16
	Heywood		1,83	3,18
GPL				
media valori misurati autotrazione	82,5	17,5	2,5	3,02
approccio IPCC / OECD	81,38	18,62	2,73	2,98
approccio BEN	81,62	18,38	2,68	2,90
approccio COPERT	82,20	17,80	2,58	3,01
Dati di letteratura:				
	Perry C.		2,61	3,01

Fonte: elaborazioni APAT su dati IPCC, MICA, COPERT

4. Risultati sperimentali ed analisi critica delle metodologie (a cura di M. Ilacqua)

4.1 Analisi sperimentali

Tramite un contratto tra ANPA e la Stazione Sperimentale per i Combustibili (SSC) per la caratterizzazione di un campione rappresentativo dei carburanti prodotti in Italia, è stato possibile utilizzare delle analisi relative ai parametri carbonio, idrogeno, potere calorifico superiore, zolfo, di un numero di campioni rappresentativi del mercato nazionale a partire da settembre 2000.

Vediamo a questo punto di dare alcuni ragguagli tecnici sulle determinazioni sperimentali eseguite.

Per la determinazione del contenuto di carbonio e idrogeno nelle benzine, il campione di combustibile viene bruciato e successivamente viene determinata la CO_2 e H_2O prodotte, dopo separazione cromatografica e rivelazione a conducibilità termica. La metodica analitica impiegata per il carbonio ed idrogeno nel gasolio è ASTM D5291.

La ripetibilità (indice di precisione nella serie di determinazioni analitiche, espresso come deviazione dal valore medio di determinazioni ripetute quando siano state eseguite nella stessa serie, dallo stesso operatore, nello stesso laboratorio, sulla stessa strumentazione) della prova atta a determinare il contenuto percentuale in peso di carbonio (%C) è pari a 0,98% per il livello di carbonio (LC %) = 87%, ovvero per il livello %C = 87%, due prove analitiche si dicono in ripetibilità se il risultato ottenuto, si colloca all'interno dell'intervallo $(87 + 0,98/2)$ ed $(87 - 0,98/2)$. La formula che mette in relazione la ripetibilità al livello di carbonio (LC%) è per il carbonio $r = 0,0072 (\text{LC}\% + 48,48)$, mentre per l'idrogeno $r = 0,11 * \sqrt{\text{LH}\%}$, dove LH% è il livello di idrogeno. Per quanto riguarda invece la riproducibilità (indice della precisione fra le serie, espresso come deviazione dal valore medio di determinazioni ripetute in serie diverse, eseguite in tempi diversi eventualmente da operatori ed in laboratori diversi) della prova analitica per il carbonio è $R = 0,018 (\text{LC}\% + 48,48)$, mentre per l'idrogeno $R = 0,2314 * \sqrt{\text{LH}\%}$. L'arrotondamento relativamente ai parametri %H e %C è stato effettuato sulla base della norma ISO 4259, allegato G.

Per la determinazione del potere calorifico superiore (metodo ASTM D 240) per benzine e gasoli, il campione in esame viene bruciato in bomba con ossigeno, e misurata la quantità di calore sviluppata durante la combustione con formazione di prodotti allo stato gassoso, ad eccezione dell'acqua. La ripetibilità per il potere calorifico superiore è per qualsiasi livello $r = 0,13\%$; la riproducibilità $R = 0,4\%$.

Per la determinazione dello zolfo (metodo EN ISO14596) il campione viene esaminato mediante spettrometria di fluorescenza ai raggi X. Si utilizza uno standard interno per correggere eventuali interferenze della matrice.

Prendendo in esame il GPL, la determinazione del C% e H% è stata effettuata utilizzando il metodo (EN 27941); per il potere calorifico inferiore invece si è ricorso al metodo (DIN 51612). Entrambe le determinazioni per il GPL sono da calcolo basato sull'analisi strumentale gas-cromatografica eseguita su campioni rappresentativi.

Il lavoro sperimentale si è concluso alla fine del mese di agosto 2001, ed alla data di pubblicazione del presente rapporto si dispone pertanto di dati rappresentativi delle caratteristiche chimico fisiche dei carburanti immessi al consumo in Italia dal mese di settembre 2000 al mese di agosto 2001. In tabella 2 sono riportati i dati medi risultanti dalle analisi disponibili, per benzina, gasolio e gpl.

Questi dati sono sufficienti a verificare la metodologia COPERT per il calcolo delle emissioni stechiometriche di CO_2 , dato che si dispone di rilevazioni precise del rapporto H/C e di tutti gli altri composti chimici contenuti nei campioni analizzati.

Tabella 2 – Risultati analisi campioni carburanti, dati grezzi

Caratterizzazione chimico-fisica di combustibili per autotrazione						
Dati sperimentali settembre 2000 - agosto 2001						
	Carbonio % m/m	Idrogeno % m/m	H/C	Ossigeno %m/m	Zolfo EN ISO 14596 mg/kg	Pot. Cal. Inf. kcal/kg
CAMPIONI DI BENZINA						
media valori	85,7	13,9	1,9	0,4	62,73	10445,95
CAMPIONI DI GASOLIO						
media autotrazione	86,6	13,4	1,8	0,2	282,93	10251,28
media riscaldamento	86,6	13,3	1,8	0,3	1409,23	10186,76
CAMPIONI DI GPL						
media autotrazione	82,5	17,5	2,5			11020,65

Fonte: Rapporto SSC, 2001

Nota: il contenuto di ossigeno del gasolio è nullo, il valore rilevato è dovuto ad errore sperimentale, vedi paragrafo 4.3

4.2 Verifica analitica della metodologia COPERT

Come già visto nel capitolo III nella metodologia implementata in COPERT è implicita l'assunzione che la miscela idrocarburica sia costituita esclusivamente dai componenti idrogeno e carbonio. Infatti nella formulazione (1) sono presi in considerazione solo i pesi atomici del carbonio e dell'idrogeno. Nel caso invece vi sia l'introduzione di un additivo ossigenato, come nelle moderne benzine senza piombo, il suddetto calcolo va rivisto onde tenere in conto la nuova circostanza. Inoltre si prende in considerazione anche la presenza di zolfo, per quanto minima, per omogeneità con i dati sperimentali disponibili.

La nuova formulazione pertanto è derivata impostando un bilancio di massa applicato ai singoli componenti del combustibile, con la seguente formula:

$$1 = \frac{n_H (AW)_H + n_C (AW)_C + n_O (AW)_O + n_S (AW)_S}{(MW)_{fuel}} \quad (3)$$

Dove:

nH : numero di atomi di idrogeno

nC : numero di atomi di carbonio

nO : numero di atomi di ossigeno

nS : numero di atomi di zolfo

(AW) H : Peso atomico dell'idrogeno

(AW) C : Peso atomico del carbonio

(AW) O : Peso atomico dell'ossigeno

(AW) S : Peso atomico dello zolfo

(MW)fuel : Peso molecolare medio del combustibile (media ponderata pesi atomici componenti elementari)

$$\frac{1}{n_C} = \frac{\frac{n_H}{n_C} (AW)_H + \frac{n_C}{n_C} (AW)_C + \frac{n_O}{n_C} (AW)_O + \frac{n_S}{n_C} (AW)_S}{(MW)_{fuel}} \quad (4)$$

Una mole di carbonio si trasforma in una mole di CO₂, secondo la reazione seguente:



da cui $n_C = n_{O_2} = n_{CO_2}$

dove n_{CO_2} = numero di moli CO₂

poiché :

$$W_{CO_2} = n_{CO_2} (MW_{CO_2})$$

dove

MW_{CO_2} : peso molecolare anidride carbonica

si avrà

$$W_{CO_2} = n_C (MW_{CO_2}) \quad (6)$$

W_{CO_2} : Peso della anidride carbonica (g CO₂)

$$W_{CO_2} = \frac{(MW)_{CO_2}}{\frac{1}{n_C}} \quad (7)$$

Combinando la (4) con la (7) si avrà:

$$W_{CO_2} = \frac{(MW)_{CO_2}}{\frac{\frac{n_H}{n_C} (AW)_H + (AW)_C + \frac{n_O}{n_C} (AW)_O + \frac{n_S}{n_C} (AW)_S}{(MW)_{fuel}}} \quad (8)$$

Per una mole di combustibile sarà $(MW)_{fuel} = W_{fuel}$

Dove

W_{fuel} : Peso del combustibile (g fuel)

$$W_{CO_2} = \frac{(MW)_{CO_2} W_{fuel}}{\frac{n_H}{n_C} (AW)_H + (AW)_C + \frac{n_O}{n_C} (AW)_O + \frac{n_S}{n_C} (AW)_S} \quad (9)$$

ponendo

$$\frac{n_H}{n_C} = r_{H:C}; \quad \frac{n_O}{n_C} = r_{O:C}; \quad \frac{n_S}{n_C} = r_{S:C};$$

la formula di COPERT (1) corretta sarà pertanto:

$$E_{CO_2}^{CALC} = 44,01 \frac{FC}{12,01 + 1,01r_{H:C} + 16r_{O:C} + 32,06 r_{S:C}} \quad (10)$$

4.3 Considerazioni preliminari sui fattori di emissione dei carburanti

Sulla base delle considerazioni nei due paragrafi precedenti è stato possibile ricomputare i fattori di emissione dei carburanti, applicando opportuni fattori di correzione che tengono conto degli errori sperimentali nella determinazione dei contenuti di carbonio, idrogeno. Ad esempio, con riferimento ai dati di tabella 2 del § 4.1 riferiti al gasolio, sulla base dell'assenza di ossigenati nella composizione di base dei greggi lavorati, e poiché durante il processo di lavorazione non se ne formano, il contenuto di tali composti nel gasolio è sicuramente nullo.

In tabella 3 sono riportati, per diverse tipologie di carburanti descritte in seguito, i valori corretti dei contenuti di carbonio, idrogeno ed ossigeno, il nuovo rapporto H/C ed i fattori di emissione calcolati secondo diverse metodologie:

- bilancio di massa effettuato a partire dai dati sperimentali
- formula COPERT non corretta (COPERT standard), che ipotizza che il carburante sia costituito esclusivamente da atomi di H e di C (anidride carbonica in funzione del rapporto idrogeno-carbonio equaz. (1))
- formula COPERT rivista, che tiene in considerazione la presenza di zolfo e dei composti ossigenati introdotti nelle nuove formulazioni dei carburanti (COPERT new formula equaz. (10))

Come si potrà notare i fattori di emissione di CO₂ calcolati con un bilancio di massa e con la formula di COPERT opportunamente corretta ("COPERT rivista") sono ora coincidenti. Si può quindi affermare che le due diverse metodologie utilizzate sono compatibili e portano agli stessi risultati.

Per comodità di confronto in tabella 3 oltre ai valori sperimentali sono stati riportati i fattori di emissione per diverse tipologie di carburanti, in particolare per il carburante medio indicato da IPCC/OECD e, per benzina e gasolio, un fattore di emissione per i carburanti nazionali, ottenuto considerando il fattore di emissione IPCC inversamente proporzionale al potere calorifico dei carburanti.

Le residue differenze nel fattore di emissione in kg CO₂ per kg carburante tra il dato medio nazionale e quello IPCC per paesi europei, tra i vari tipi di carburante, sono contenute, rispettivamente 1,3%, 1,0% ed 1,4% per benzine, gasoli e gpl, e riconducibili a differenti composizioni chimiche.

I fattori di emissione sperimentali dei carburanti nazionali sono applicabili per gli anni 2000 e seguenti. Resta aperto il problema di quale fattore applicare per gli anni precedenti, affrontato nel successivo paragrafo "serie storica dei fattori di emissione". Se si vuole riprodurre con il modello COPERT attuale, in attesa di una sua revisione, il fattore di emissione sperimentale non resta che modificare in modo opportuno il rapporto H/C, fino a riprodurre il dato sperimentale.

Tabella 3 - Risultati analisi campioni carburanti, dati elaborati per correzione dell'errore sperimentale

Caratterizzazione chimico-fisica di combustibili per autotrazione 1 settembre 2000 - 31 agosto 2001								
	Parametri combustibili					Fattori emissione calcolati (*)		
	Carbonio % m/m	Idrogeno % m/m	Ossigeno % m/m	Zolfo % m/m	H/C	CO2 bilancio di massa kg CO2/kg	CO2 COPERT standard kg/kg	CO2 COPERT rivisto kg/kg
BENZINA								
parametri sperimentali	85,7	13,9	0,4		1,9	3,14	3,15	3,14
parametri IPCC / OECD	84,5	15,3			2,2	3,10		
par. IPCC per paesi europei	86,8	13,2			1,8	3,18		
parametri IPCC interpolati (**)	85,9	14,0			1,9	3,15		
GASOLIO								
parametri sperim. autotrazione	86,6	13,4			1,8	3,17	3,17	3,17
parametri sperim. riscaldamento	86,6	13,3		0,1	1,8	3,17	3,18	3,17
parametri IPCC / OECD	87,5	12,5			1,7	3,21		
param. IPCC paesi europei	85,7	14,3			2,0	3,14		
parametri sperimentali per il 1990	86,5	13,3		0,2	1,8	3,16		
parametri sperimentali per il 1995	86,6	13,3		0,1	1,8	3,17		
GPL								
parametri sperimentali	82,5	17,5			2,5	3,02	3,02	3,02
parametri IPCC / OECD	81,4	18,6			2,7	2,98		

(*) vedi cap. 4.2

(**) vedi cap. 5

Fonte: elaborazioni APAT su dati SSC, COPERT

4.4 Relazione tra qualità dei combustibili ed emissioni di CO₂

La qualità dei combustibili è strettamente correlata alle tecnologie di costruzione dei veicoli da trasporto; il connubio delle due, porta globalmente ad avere un contenimento delle emissioni inquinanti in atmosfera. Nel caso della CO₂, per ridurre le emissioni, i costruttori di veicoli a motore dovranno costruire sistemi in grado di migliorare l'economia del combustibile (agendo anche sulle dimensioni del veicolo e/o sulla riduzione del peso). Un'opzione è quella di incrementare l'utilizzo di motori con iniezione diretta e tecnologia di combustione magra (operata in eccesso d'aria). Tuttavia per realizzare la suddetta applicazione sono necessari sistemi De-NOx che siano in grado di funzionare in ambienti con eccesso d'aria e molto efficienti, dal momento che per aumentare l'efficienza termica bisogna settare il motore a funzionare in eccesso d'aria con conseguente più alta produzione di NOx. I catalizzatori De-NOx ad alta efficienza sono molto sensibili allo zolfo. Da qui la necessità di avere combustibili sul mercato con tenori di zolfo che dovranno arrivare sotto i 50 mg/kg (D.P.C.M. 23-11-2000 n.434) a partire dal 2005.

Attualmente nella nostra campagna analitica abbiamo potuto constatare, per quanto riguarda le benzine, che nel 41 % dei campioni analizzati lo zolfo è presente in quantità < 50mg/kg e nella totalità dei campioni si attesta sempre sotto i 150 mg/kg. Per i gasoli invece il 98% dei campioni ha un tenore di zolfo < a 350 mg/kg. Quindi le raffinerie italiane si stanno all-

neando con un certo margine di anticipo alle normative vigenti in materia di qualità dei combustibili, specialmente per le benzine.

I composti ossigenati sono aggiunti, nella formulazione delle benzine nazionali, come additivi che innalzano il numero di ottano ai valori previsti dalle normative vigenti (RON, numero ottano di ricerca = 95), in risposta all'abbassamento del tenore di composti aromatici (causa di emissioni pericolose di benzene). Si noti che nella sperimentazione oggetto del nostro studio non è stata effettuata la misurazione diretta dei composti ossigenati, la cui quantità è stata dedotta perciò dalla %C ed %H presente nei campioni, a meno di errori sperimentali quantificabili nella misura di 0,2-0,3 % peso (somma peso carbonio + peso idrogeno, fonte: comunicazioni personali dott. Tittarelli SSC). Infatti il contratto da noi stipulato con la SSC non li prevede. Sulla base anche delle determinazioni analitiche effettuate dalla SSC per conto APAT (Gruppo di lavoro legge 413/97) ai depositi fiscali sulle benzine esitate sul mercato italiano si può affermare che: l'ossigenato maggiormente presente nelle benzine è MTBE (metilterbutil-etero), e che il 40 % circa dei campioni di benzina analizzati nella campagna analitica oggetto della nostra sperimentazione ha manifestato sia pur indirettamente, una presenza di composti ossigenati superiore all'1% peso, il 16 % dei campioni supera il 5% peso di composti ossigenati. Infine, per quelle benzine con alta % di composti ossigenati ($\approx 12\%$ p) si è constatato che il potere calorifico inferiore è diminuito sensibilmente (fino a 10150 kcal/kg) rispetto a quelle senza presenza di ossigeno. Il potere calorifico dei combustibili è un altro parametro che può influenzare le emissioni di CO₂. Più il suo valore è alto per unità di massa di combustibile e per una data efficienza termica del motore, più bassi saranno i consumi di carburante, a parità di percorrenza.

5. Confronto con i fattori di emissione IPCC - OECD

(a cura di M. Contaldi)

5.1 Aggiornamento fattori di emissione

Sulla base delle determinazioni precedenti sono stati ricomputati i fattori di emissione nelle diverse unità di misura, da impiegarsi nelle determinazioni degli inventari 1999 – 2000. Nella tabella 4, oltre ai risultati sperimentali, sono riportati i dati IPCC – OECD ed i dati utilizzati fino ad oggi per gli inventari (benzina e gasolio 1990-1998).

Come già ricordato nel precedente paragrafo i fattori di emissione della tabella 4 aggiornano quelli riportati in Allegato 1 a partire dall'inventario del 2000.

Per ogni carburante si segnalano differenze apprezzabili. Il dato che più colpisce è quello relativo alla benzina, che aumenta considerevolmente il fattore di emissione e diminuisce in proporzione inversa il contenuto energetico. Il contenuto energetico è simile a quello considerato per i combustibili europei, il fattore di emissione invece è più elevato. Tale fatto è certamente dovuto all'introduzione diffusa di ossigenati nella riformulazione delle benzine, per compensare la riduzione del contenuto di idrocarburi aromatici, al fine anche di mantenere la qualità ottanica [RON (numero di ottano ricerca) = 95, MON (numero di ottano motore) = 85] richiesta dalla normativa vigente (D.P.C.M. 23-11-2000 n.434) sulle specifiche ecologiche della benzina. Il potere calorifico degli ossigenati introdotti è inferiore alla classe degli aromatici sostituiti mentre il contenuto di carbonio per unità energetica è molto più alto.

Nel caso del gasolio le differenze non sono rilevanti, come già segnalato nel capitolo 3. Si segnala invece il fatto che il fattore di emissione per unità di energia è ormai vicinissimo a quello della benzina e risulta superiore di appena lo 0,9%.

Con riferimento al dato del GPL occorre sottolineare che il dato sperimentale è rappresentativo del solo combustibile prodotto in Italia, che è circa la metà dei consumi complessivi nel 1999. Questo combustibile è una miscela di propano e butano in proporzioni variabili e pertanto il fattore di emissione può oscillare da un minimo di 63 fino a 66 kg CO₂/Mj. Non si dispone attualmente di analisi rappresentative del combustibile importato, pertanto in questo caso continuerà ad essere utilizzato il fattore di emissione IPCC-OECD.

Tabella 4 - Fattori di emissione aggiornati

Fattori di emissione CO ₂								
	Fattori di emissione stechiometrici				Fattori di emissione inventario 1999 (1)			pci tep / t
	t C / TJ	t CO ₂ / TJ	t CO ₂ / tep	t CO ₂ / t	t CO ₂ / TJ	t CO ₂ / t	t CO ₂ / tep	
Confronto fattori emissione internazionali - prove su campioni nazionali								
Benzina - IPCC / OECD	18,90	69,25	2,90	3,10	68,56	3,07	2,87	1,07
Benzina - IPCC-europa	19,92	73,00	3,05	3,18	72,27	3,15	3,02	1,04
Benz. BEN, fat. emis. Interpolato (2)	19,58	71,75	3,00	3,15	71,03	3,12	2,97	1,05
Benzina, 1990-'99 (2)	18,90	69,25	2,90	3,04	68,56	3,01	2,87	1,05
Benzina, medie sperim.li	19,61	71,86	3,01	3,14	71,14	3,11	2,98	1,04
Gasolio - IPCC / OECD	20,20	74,01	3,10	3,21	73,27	3,17	3,07	1,04
Gasolio - IPCC-europa	20,20	74,00	3,10	3,14	73,26	3,11	3,07	1,01
Gasolio, 1990-'99 (2)	20,20	74,01	3,10	3,16	73,27	3,13	3,07	1,02
Gasolio auto, media sper.	20,17	73,89	3,09	3,17	73,15	3,14	3,06	1,03
Gasolio risc., media sper.	20,32	74,44	3,11	3,17	73,69	3,14	3,08	1,02
GPL - IPCC / OECD	17,20	63,02	2,64	2,98	62,39	2,95	2,61	1,13
gpl, 1990-'99 (2)	17,20	63,02	2,64	2,90	62,39	2,87	2,61	1,10
gpl, media sperimentale	17,90	65,59	2,74	3,02	64,94	2,99	2,72	1,10

1) coefficiente di ossidazione, per tener conto della combustione incompleta (vedi anche All.1)

2) cfr. § 5.2

Fonte: elaborazioni APAT su dati IPCC, MICA, SSC

5.2 Serie storica dei fattori di emissione

I dati sperimentali consentono di aggiornare i fattori di emissione per l'anno 2000, ma non danno indicazioni dirette sui fattori da utilizzare per la serie storica dei dati dal 1990 al 1999.

Le informazioni disponibili a questo proposito sono le seguenti:

a partire dal gennaio 2000 sono distribuiti in Italia carburanti "riformulati" rispetto agli anni precedenti, vista l'entrata in vigore della nuova direttiva 98/69/EC che fissa limiti precisi per il contenuto dei diversi composti in benzine e gasoli, con l'obiettivo generale di ottenere carburanti più omogenei e più "puliti";

- i dati analitici si riferiscono a questi nuovi carburanti e sono pertanto sicuramente non applicabili "tal quali" agli anni precedenti;
- la transizione è stata graduale, si è sommata all'introduzione generalizzata della benzina senza piombo a partire dal 1993 ed alla riduzione del contenuto di zolfo nei gasoli a partire dal 1996; l'industria ha cominciato ad adeguare la sua produzione alle nuove regole completando la transizione nel 1998-'99;
- si dispone attualmente di alcune determinazioni analitiche solo per il gasolio e per gli anni 1990 e 1995, utili per la stima del fattore di emissione (vedi tabelle 3 e 5);
- si dispone di stime relative al potere calorifico dei carburanti nei primi anni '90, riportate nel BEN ed in diverse pubblicazioni, e di alcune stime sul contenuto di zolfo.

Tabella 5 – Dati storici relativi al gasolio

	Densità (kg/lt)	Zolfo (%m/m)	Numero Cetano	Carbonio (%m/m)	Idrogeno (%m/m)	Pot. Cal. Superiore (Mj/kg)	Pot. Cal. Inferiore (Mj/kg)
1990	0,838	0,22	50,23	86,1	13,3	45,661	42,815
1995	0,839	0,09	51,56	86,5	13,2	45,463	

Fonte: elaborazioni APAT su dati SSC

Sulla base di questi dati non riteniamo attualmente possibile determinare con precisione i fattori di emissione per gli anni 1990-1999, ma è anche evidente che quelli utilizzati finora presentano diverse pecche, in particolare si faccia riferimento ai dati riportati in tabella 4:

- confrontando i dati contenuti nelle righe "gasolio 1990-1999" con quelli delle righe "media sperimentale" per gasolio autotrazione e riscaldamento, si osserva che le differenze sono intorno all'1,2% in kg/kg massa e praticamente coincidenti in unità di energia, sembra quindi possibile utilizzare i nuovi valori anche per il passato; i pochi dati sperimentali disponibili sul gasolio (vedi tabella 3) confermano questa valutazione;
- confrontando i dati contenuti nelle righe "benzina 1990-1999" con quelli delle righe "media sperimentale" le differenze oscillano tra il 2 ed il 5% circa, a seconda che ci si basi sui fattori per unità di energia o per unità di massa, e vanno approfondite viste le quantità in gioco;
- in dati del gpl mostrano differenze intorno all'1,4% , si opta però per mantenere il dato sperimentale del 2000 anche per gli anni precedenti in quanto questo carburante è relativamente poco utilizzato per autotrazione negli altri paesi ed i dati di letteratura si riferiscono spesso a combustibile per uso industriale;
- con riferimento ai fattori di emissione IPCC-OECD si osserva che sono riferiti a carburanti piuttosto energetici, in particolare la benzina ha un contenuto calorifico di oltre 10700 kcal/Kg, rispetto ai 10500 kcal/Kg del BEN e i 10446 kcal/Kg misurati;
- i fattori di emissione IPCC-OECD sono espressi in contenuto di carbonio rispetto all'unità di energia, suggerendo una relativa invarianza di questo dato al variare del potere calorifico, non confermata dai dati sperimentali; i fattori di emissione utilizzati finora (righe benzina gasolio e gpl 1990-1999) si fondano sul contenuto di carbonio rispetto all'unità di energia e stimano un fattore di emissione per kg di carburante utilizzando:
 - il fattore di emissione IPCC per unità energetica
 - il contenuto energetico normalizzato per i carburanti (benzine pari a circa 10500 Kcal/kg) come riportato nei BEN
 il fattore di emissione risulta pertanto pari, nel caso della benzina, a circa 3,042 t di CO₂ per t, con una differenza del 3% circa rispetto ai dati sperimentali.

Sulla base dei diversi dati sperimentali di cui si dispone non esiste affatto una relativa stabilità del fattore di emissione rispetto al contenuto energetico dei carburanti, ma anzi si presenta una piccola ma significativa correlazione negativa, ovvero il fattore di emissione per unità di energia prodotta aumenta con il diminuire del contenuto energetico del combustibile. Questo fatto è più pronunciato nel caso di presenza di composti ossigenati ma resta valido anche per le benzine senza questi composti.

Al fine di determinare i fattori di emissione per il periodo 1990-1999 si ritiene, per i gasoli ed il gpl, di adottare i fattori sperimentali rilevati nel 2000 anche per gli anni precedenti, viste le differenze inferiori all'1% con i dati di contenuto energetico riportati nel BEN e con le stime IPCC-OECD.

Per quello che riguarda le benzine, si dispone delle seguenti informazioni:

- come già ricordato il fattore di emissione non è stabile rispetto al contenuto energetico dei carburanti, si rileva invece una significativa correlazione negativa, ov-

- vero il fattore di emissione per unità di energia prodotta aumenta con il diminuire del contenuto energetico;
- utilizzando i dati sperimentali delle sole benzine senza ossigeno, che sono le più simili ai carburanti utilizzati in precedenza, si è verificata la stabilità della correlazione esistente tra i fattori di emissione per unità energetica ed il potere calorifico; la correlazione dei dati risulta molto elevata e pari ad oltre il 94%;
- degli stessi campioni di benzina senza ossigenati è noto sia il potere calorifico che il fattore di emissione;
- della benzina IPCC-OECD di riferimento sono noti sia il fattore di emissione che il contenuto energetico
- delle benzine nazionali, come già ricordato, è noto solo il contenuto energetico.

Si propone pertanto per le benzine di interpolare i dati di fattore di emissione e contenuto energetico dei campioni 2000 della benzina di riferimento internazionale e, per mezzo dell'equazione di interpolazione, stimare il fattore di emissione della benzina nazionale utilizzando il suo potere calorifico. Il fattore di emissione risultante è riportato in tabella 4 alla riga "bz BEN, fat. di emissione interpolato". Il dato numerico è molto simile alla media dei valori misurati, ma dal punto di vista metodologico è molto più solido.

Come già accennato questo "fattore di emissione interpolato" è ritenuto sicuramente applicabile dal 1990 al 1995-'96, nel periodo successivo si è in presenza di una transizione graduale verso i carburanti riformulati e non sarebbe applicabile, ma, in assenza di informazioni, si propone di utilizzarlo comunque.

Cambiare i fattori di emissione cambia ovviamente gli inventari delle emissioni: nel caso dell'inventario 1999 la variazione nelle emissioni complessiva oscilla tra le 1,5 Mt di CO₂ e le 2,2 Mt a seconda che il calcolo fosse basato sul fattore di emissione in unità di massa o in unità energetiche. Rispetto al totale delle emissioni energetiche dello stesso anno, pari a 429 Mt di CO₂, si tratta di una variazione complessiva dello 0.4%, più sensibile la variazione delle sole emissioni del trasporto su strada, che aumentano del 1,8% circa.

6. Conclusioni

Nei capitoli II e III sono state riepilogate le non trascurabili differenze di stima delle emissioni risultanti nel settore dei trasporti dovute all'uso di diverse metodologie (in termini di emissione in peso di anidride carbonica la differenza tra l'applicazione della metodologia IPCC-OECD e modello COPERT risulta tra le 1,5 e 2,2 Mt a seconda se si utilizzavano i fattori di emissione per unità di peso o per unità di energia). Queste metodologie, il modello COPERT e la metodologia settoriale dell'IPCC-OECD, sono comunque valide a livello internazionale. Sulla base dei dati di letteratura disponibili, la spiegazione più probabile per queste differenze è dovuta alla non confrontabilità dei dati di base dei carburanti, dato che una metodologia si riferisce alla composizione chimica e l'altra al contenuto energetico dei carburanti stessi.

Risultati sperimentali preliminari riportati nel capitolo IV correlano la composizione chimica ed il contenuto energetico di una serie di campioni di carburanti rappresentativi della produzione nazionale e consentono valutazioni più precise.

Per quanto riguarda il modello COPERT, l'analisi puntuale delle formule termochimiche utilizzate mostra che esse trascurano il contenuto di ossigeno delle benzine e di zolfo dei gasoli, pertanto, nel caso di carburanti con elevati tenori di ossigeno e/o di zolfo i fattori di emissione calcolati si discostano da quelli reali. Si propone quindi la correzione delle formule utilizzate dal modello COPERT in modo che tengano conto del contenuto di ossigeno delle benzine. La correzione del modello va concordata a livello internazionale e sono state intraprese le opportune azioni. Nel frattempo si propone di correggere i fattori H/C utilizzati dal modello utilizzato dall'ANPA in modo da ottenere le emissioni reali di anidride carbonica.

Per quanto riguarda i fattori di emissione IPCC-OECD, le differenze risultano minime per gasoli e gpl e pertanto i fattori di emissione sperimentali possono essere adottati tranquillamente. Per le benzine il dato IPCC-OECD è relativamente basso e deve essere aggiornato. Tale dato è validissimo, si badi bene, né le benzine italiane sono così diverse da quelle di altri paesi, semplicemente il fattore di emissione non tiene conto delle recenti modifiche nella composizione delle benzine, in particolare dell'aggiunta di ossigenati, che modificano in modo significativo questo carburante.

Nel capitolo V si affronta la determinazione di fattori di emissione applicabili per il periodo 1990-1999. Per i gasoli e gpl, viste le differenze inferiori all'1% con i dati IPCC-OECD, si propone di utilizzare i dati sperimentali per tutto il periodo. Per le benzine è stato proposto di utilizzare una interpolazione che tenga conto dei risultati sperimentali attuali e dei fattori di emissione IPCC e consenta di utilizzare le informazioni contenute nel Bilancio energetico. Le variazioni attese negli inventari del settore dei trasporti a causa della revisione dei fattori di emissione sono dell'ordine del 1,8%, più contenuta l'influenza sulle emissioni complessive, circa lo 0,4%.

Bibliografia

- [1] Brini S., Desiato F., Fortuna F., Gaudio D., Liburdi R., Scalambretti R., Emissioni in atmosfera e qualità dell'aria in Italia, ANPA, Serie Stato dell'Ambiente 6/1999
- [2] Contaldi M., De Lauretis R., Ilacqua M., Liburdi R., Saija S., Le emissioni in atmosfera da trasporto stradale, ANPA, Serie Stato dell'ambiente 12/1999
- [3] IPCC/IEA/OECD/UNEP, IPCC 1996 revised Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories, Vol. 1-3, IPCC WGI Technical Support Unit, Hadley Centre, Bracknell, UK (sito web <http://www.iea.org/ipcc.htm>)
- [4] MICA (Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato, Direzione Generale delle Fonti di Energia ed industrie di base), Bilancio Energetico Nazionale, anni vari, sito web <http://www.minindustria.it/ita/default.htm>;
- [5] European Environment Agency (EEA), "Atmospheric emission inventory guidebook", Joint EMEP-CORINAIR edito nel febbraio 1996
- [6] European Environment Agency – European Topic Centre on Air Emission, Recommendations for revised data system for air emission inventories, (Topic Report 1995/2 disponibile nel sito web <http://www.eea.eu.int/frdocu.htm>)
- [7] Ntziachristos L. and Samaras Z. LAT/AUTH (European Topic Centre on Air Emissions) with contributions from: S. Eggleston (AEA Technology), N. Gorißen (UBA), D. Hassel (TÜV Rheinland), A.-J. Hickman (TRL), R. Joumard (INRETS, R. Rijkeboer (TNO) and K.-H. Zierock (UBA), Manuale programma COPERT III, EEA, July 1999)
- [8] P. Tittarelli, (SSC) Stazione Sperimentale Combustibili, "Analisi caratteristiche carburanti", contratto con ANPA settembre 2000-agosto 2001.
- [9] R.H. Perry, Perry's chemical engineers' handbook, MC Graw-Hill, 1988
- [10] J.B. Heywood, Internal combustion engines fundamentals, Mc Graw-Hill International edition, 1988

Allegato 1

Fattori di emissione dei carburanti (Linee Guida per gli inventari delle emissioni di gas ad effetto serra).

Fattori di emissione CO ₂								
	Fattori di emissione stechiometrici				coeffic. di ossida- zione	Fattori di emissione inventario 1998		
	t C/TJ	t CO ₂ /TJ	t CO ₂ /tep	t CO ₂ /t		t CO ₂ /TJ	t CO ₂ /t	t CO ₂ /tep
Fattori di emissione internazionali (IPCC / OCSE - Reference approach, 1997)								
Combustibili liquidi								
Petrolio greggio	20.00	73.28	3.066	3.066	0.99	72.549	3.035	3.035
GPL	17.20	63.02	2.637	2.901	0.99	62.392	2.872	2.610
Benzina	18.90	69.25	2.897	3.042	0.99	68.559	3.012	2.868
Kerosene	19.50	71.45	2.989	3.079	0.99	70.735	3.048	2.9595
Carica petrolchimica (20.0)								
Gasolio	20.20	74.01	3.097	3.159	0.99	73.274	3.127	3.066
Olio combustibile denso	21.10	77.31	3.235	3.180	0.99	76.539	3.148	3.202
Coke di petrolio	27.50	100.76	4.216	3.499	0.99	99.755	3.464	4.174
Orimulsion	22.00	80.61	3.373	2.216	0.99	79.804	2.194	3.339
TAR	23.42	85.82	3.591		0.99		3.306	3.555
Combustibili gassosi								
Gas naturale(dry) IPCC	15.300	56.06	2.346	2.744	0.995	55.780	2.731	2.334
Gas naturale (secco) '98	15.207	55.72	2.331	2.737	0.995	55.441	2.723	2.320
Gas naturale (secco) '99	15.212	55.74	2.332	2.736	0.995	55.459	2.723	2.320
Biomasse								
Biomassa solida	(29.9)	(109.56)					(1.124)	
Biodiesel	(20)							
Biogas	(30.6)							

Fonte: IPCC

Allegato 2

Approccio di riferimento: emissioni di CO₂ dal settore dei trasporti, anno 1998

Table 1.A(a) Sectoral background data for energy
Fuel Combustion Activities - Sectoral Approach - (Sheet 3 of 4)

Italy 1998 - Submission 1998

GREENHOUSE GAS SOURCE AND SINK CATEGORIES	AGGREGATE ACTIVITY DATA		IMPLIED EMISSION FACTORS ⁽²⁾			EMISSIONS		
	Consumption		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
	(TJ)	⁽¹⁾	(t/TJ)	(kg/TJ)	(kg/TJ)	(Gg)	(Gg)	(Gg)
I.A.3 Transport	1,572,773	NCV				111,807	44.42	12.50
Gasoline	807,478	NCV	69.50	38.14	7.83	56,124	30.80	6.32
Diesel	672,630	NCV	74.05	15.16	8.18	49,808	10.20	5.50
Natural Gas	12,057	NCV	56.32	18.25	8.29	679	0.22	0.10
Solid Fuels	0	NCV	0.00	0.00	0.00	0	0.00	0.00
Biomass	0	NCV	0.00	0.00	0.00 ⁽³⁾	0	0.00	0.00
Other Fuels	80,608	NCV	64.46	39.70	7.20	5,196	3.20	0.58
a. Civil Aviation	31,643	NCV				2,238	1.00	0.50
Aviation Gasoline	308	NCV	68.56	0.00	0.00	21		0.00
Jet Kerosene	31,335	NCV	70.75	31.91	15.96	2,217	1.00	0.50
b. Road Transportation	1,492,856	NCV				106,035	40.25	10.24
Gasoline	775,835	NCV	69.46	38.41	7.50	53,886	29.80	5.82
Diesel Oil	633,588	NCV	74.05	14.09	6.19	46,917	8.93	3.92
Natural Gas	12,057	NCV	56.32	18.25	8.29	679	0.22	0.10
Biomass	0	NCV	0.00	0.00	0.00 ⁽³⁾			
Other Fuels (please specify)	71,376	NCV				4,553	1.30	0.40
Liquid Petroleum Gas (LPG)	71,376	NCV	63.79	18.21	5.60	4,553	1.30	0.40
c. Railways	26,815	NCV				1,985	0.37	0.63
Solid Fuels	0	NCV	0.00	0.00	0.00			
Liquid Fuels	26,815	NCV	74.02	13.80	23.49	1,985	0.37	0.63
Other Fuels (please specify)	0	NCV				0	0.00	0.00
		NCV	0.00	0.00	0.00			
d. Navigation	21,459	NCV				1,549	2.80	1.13
Coal	0	NCV	0.00	0.00	0.00			
Residual Oil	0	NCV	0.00	0.00	0.00			
Gas/Diesel Oil	12,227	NCV	74.09	73.61	77.70	906	0.90	0.95
Other Fuels (please specify)	9,232	NCV				643	1.90	0.18
gasoline	9,232	NCV	69.64	205.81	19.50	643	1.90	0.18
e. Other Transportation	0	NCV				0	0.00	0.00
Liquid Fuels		NCV	0.00	0.00	0.00			
Solid Fuels		NCV	0.00	0.00	0.00			
Gaseous Fuels		NCV	0.00	0.00	0.00			

Nota: NCV = potere calorifico inferiore

Fonte: Common Reporting Format (dati comunicati da Ministero Ambiente a Segretariato convenzione sul clima, anno 1998)

Allegato 3

Emissioni di CO₂ dal settore dei trasporti su strada, anno 1998, stimate dal programma COPERT III

CO₂ Emission Results

Source oriented			
Sector	Hot [t]	Cold Start [t]	Total [t]
Passenger Cars	63.307.896	7.463.764	70.771.661
Gasoline <1,4 l	28.619.452	3.504.897	32.124.349
Gasoline 1,4 - 2,0 l	16.378.693	2.217.471	18.596.164
Gasoline >2,0 l	872.436	132.428	1.004.864
Diesel <2,0 l	9.483.941	834.178	10.318.119
Diesel >2,0 l	3.768.190	321.417	4.089.608
LPG	4.185.185	453.373	4.638.558
Light Duty Vehicles	8.402.284	691.717	9.094.001
Gasoline <3,5 t	1.029.259	137.859	1.167.119
Diesel <3,5 t	7.373.024	553.858	7.926.882
Heavy Duty Vehicles	24.010.834	0	24.010.834
Gasoline >3,5 t	26.263	0	26.263
Diesel 3,5 - 7,5 t	2.311.670	0	2.311.670
Diesel 7,5 - 16 t	3.585.046	0	3.585.046
Diesel 16 - 32 t	11.410.476	0	11.410.476
Diesel >32t	6.677.379	0	6.677.379
Buses	2.953.557	0	2.953.557
Urban Buses	779.877	0	779.877
Coaches	2.173.680	0	2.173.680
Mopeds	2.234.750	0	2.234.750
<50 cm ³	2.234.750	0	2.234.750
Motorcycles	1.742.379	0	1.742.379
4-stroke <250 cm ³	977.056	0	977.056
4-stroke 250 - 750 cm ³	571.613	0	571.613
4-stroke >750 cm ³	193.710	0	193.710
Grand Total:	102.651.699	8.155.481	110.807.181

Sector	Percentage
Passenger Cars	76%
Light Duty Vehicles	10%
Heavy Duty Vehicles	9%
Buses	3%
Mopeds	2%
Motorcycles	0%

Country: Italy Date: #Name? Copert III - Version 2.0

File: C:\backup\Trasporti\COPERT\Runs_COPIII\Italia98.mdb

Fonte: Elaborazioni APAT per Inventario Corinair