

Efeito Radioativo das Emissões de Gases de Efeito Estufa por Parte de Automóveis no Brasil

Luiz Adalberto Barbosa Uria¹

Roberto Schaeffer²

Resumo

Este trabalho examina o impacto direto e indireto no aquecimento global considerando-se a utilização da gasolina e do álcool combustível em automóveis e veículos comerciais leves no Brasil. A fim de se alcançar este objetivo, quantificam-se aqui as emissões de CO₂, CO, HC's e NO_x em unidades de CO₂ - equivalente para os horizontes de tempo de 20, 100 e 500 anos.

Os resultados mostram que, ao considerarmos a utilização da gasolina em automóveis e veículos comerciais leves, o efeito de aquecimento indireto para o horizonte de tempo de 20 anos é aproximadamente 47 % do aquecimento total, decaindo para 23 % e 14% para os horizontes de tempo de 100 e 500 anos, respectivamente. No caso da utilização do álcool combustível, considerando-se que as emissões líquidas de CO₂ são negligenciáveis, e considerando-se também que as emissões de CO e HC's são transformadas em CO₂ e H₂O na atmosfera, o efeito de aquecimento indireto é devido exclusivamente às emissões de NO_x, totalizando 100% do aquecimento total. Considerando-se ambos, gasolina e álcool como combustíveis utilizados nos automóveis e veículos comerciais leves no Brasil, a divisão do aquecimento indireto no aquecimento total iguala-se a 53 % para um horizonte de 20 anos, decaindo para 27% e 16% para os horizontes de tempo de 100 e 500 anos, respectivamente.

1 Introdução

A maioria dos estudos que tratam do impacto no aquecimento global, considerando-se os vários combustíveis utilizados por veículos automotores, focaliza suas análises naqueles gases que possuem um efeito radiativo direto na atmosfera. Como consequência, estes estudos concentram suas análises nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nítrico (N₂O), devotando praticamente nenhuma atenção aos gases que possuem um efeito indireto no aquecimento da atmosfera, como o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos (HC's) e os óxidos de nitrogênio (NO_x). Apesar da incúria dada a estes últimos gases ter sua justificativa baseada na pequena contribuição relativa dos mesmos nas emissões totais, em algumas situações os seus grandes potenciais de aquecimento global (GWP) fazem com que os impactos devido às emissões destes gases estejam longe de serem negligenciáveis.

Este trabalho estima as emissões, por parte de veículos automotores, de gases que influem de forma direta e indireta num provável aquecimento global do planeta. Para isto, quantificam-se as emissões de monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC's) e óxidos de nitrogênio (NO_x), tendo-se sempre em mente a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) - único gás com efeito exclusivamente direto aqui considerado - emitida por estes autoveículos³. Considera-se o total das emissões advindas de automóveis e veículos comerciais leves (a álcool e a gasolina) no Brasil no ano de 1995. A quantificação das emissões de CO₂ baseia-se no total de gasolina e álcool consumidos no ano de 1995, levando-se em conta fatores de conversão para quilogramas de carbono formado por tonelada equivalente de petróleo (tEP) utilizada. A partir dessas quantidades emitidas, calcula-se a participação das, aqui denominadas, emissões indiretas⁴ através do percentual de aquecimento indireto destas no aquecimento total⁵, levando-se em conta o potencial de aquecimento global (GWP) de cada um dos gases considerados, para os horizontes de tempo de 20, 100 e 500 anos (URIA, 1996).

¹ Doutorando e Pesquisador do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ

² Professor Adjunto do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ

³ É importante que se frise que ainda que estes resultados de emissão aparentemente contradigam os dados apresentados na Tabela 1, no fundo não há contradição alguma nos mesmos. É importante se lembrar que os dados resultados na Tabela 2 dizem respeito a valores médios verificados para a frota existente em 1995, que em função dos veículos em circulação naquele ano representam um veículo médio a álcool que, na média, é mais velho que o veículo médio a gasolina considerado

⁴ Supõe-se que as emissões de ambos os gases se dê no instante t=0. Os efeitos destas emissões são estimados para os horizontes de tempo de 20, 100 e 500 anos nos relatórios do IPCC (1990, 1992 e 1995).

⁵ O Efeito Radiativo Integrado (E.R.I) para um determinado gás leva em conta o conceito do índice GWP, podendo ser calculado, em termos de CO₂ equivalente, através de : E.R.I do gás =GWP_i*F.E Médio*Quilometragem Média da Frota*n° de veículos da frota. Ou, alternativamente, E.R.I do gás =GWP_i*quantidade emitida do gás J

Pretende-se demonstrar que as quantidades emitidas desses gases, assim como seu percentual de aquecimento indireto, não são insignificantes dentro do contexto de uma política que privilegie o controle de emissões como uma proposta mitigadora dos níveis de poluição atmosférica, assim como de um provável aquecimento global.

2 Estimativa das Emissões Indiretas por Veículos Automotores

Considera-se aqui o cálculo das emissões de gases que contribuem de forma indireta para o aquecimento global, ou, mais especificamente, as emissões de CO, HC's e NO_x por parte da frota brasileira de automóveis e veículos comerciais leves, a álcool e a gasolina, no ano de 1995.

A metodologia para o cálculo destas emissões é a mesma utilizada em trabalhos da CETESB (MURGEL et al., 1987), a qual considera a relação entre a idade do veículo, a quilometragem média percorrida anualmente por este e o fator de emissão para cada categoria veicular.

A emissão de cada gás realizada para cada ano pode ser definida como:

(Eq. 1)

$$\text{Emissão do Gás para Cada Ano} = \text{Quilometragem Média Anual Percorrida} * \text{Número de Veículos em Circulação no Ano} * \text{Fator de Emissão}$$

Considerando-se que o fator de emissão expressa a massa de gás emitida por quilômetro percorrido, temos então que a quantidade total de gás emitida em cada ano representa a massa de gás emitida pelo total de veículos em circulação naquele ano numa determinada região (aqui especificamente o Brasil).

2.1 Quilometragem Média Anual

Para efeito deste estudo, considera-se aqui que a quilometragem média anual da frota brasileira espelha, basicamente, a quilometragem média anual dos veículos em circulação na cidade de São Paulo, segundo dados da CETESB (1982). Ainda que isto não retrate 100% bem a realidade, visto que cada região brasileira possui características próprias para suas frotas veiculares (características estas que variam de uma região para outra e ao longo do tempo), acredita-se que os erros introduzidos com esta simplificação estejam dentro dos limites de incerteza de boa parte dos dados aqui utilizados.

A Figura 1 apresenta a quilometragem média anual para veículos leves utilizada neste estudo. O exame desta permite que se verifique que veículos novos percorrem, em média, em seu primeiro ano de uso, cerca de 22.000 km, reduzindo-se este número à medida que o automóvel envelhece (provavelmente por tornarem-se menos confiáveis à medida que o tempo passa), chegando até os veículos com mais de onze anos de fabricação, que percorrem uma média de 9.000 km por ano.

2.2 Estimativa da Frota Nacional Circulante

A determinação da frota circulante tem como base os dados referentes ao número de unidades vendidas no mercado interno ao longo dos anos, sendo as unidades remanescentes calculadas a partir de uma curva de sucateamento que, em termos de idade, expressa a composição da frota nacional por anos de utilização.

A Figura 2 apresenta a curva de sucateamento utilizada no presente trabalho, construída a partir da média ponderada entre as quantidades de automóveis e veículos comerciais leves vendidos no mercado interno e suas respectivas taxas de sucateamento. A figura mostra que, na média, os automóveis e veículos comerciais leves possuem um sucateamento de cerca de 100% comum a idade veicular próxima aos 28 anos.

Figura 1 - Quilometragem Média Anual versus Idade do Veículo

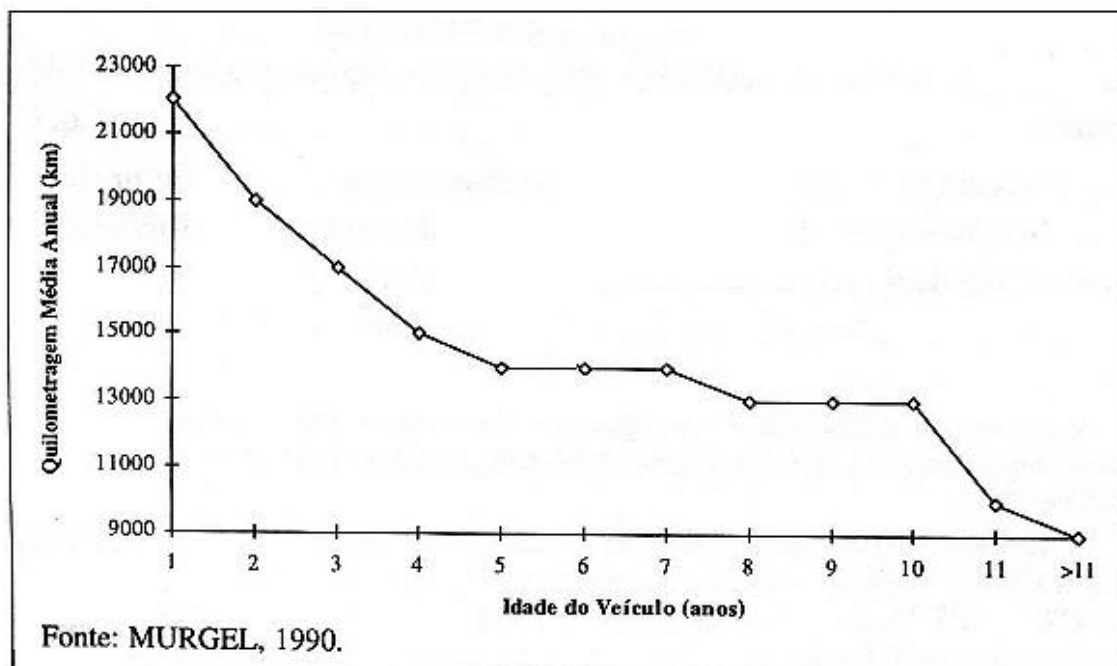
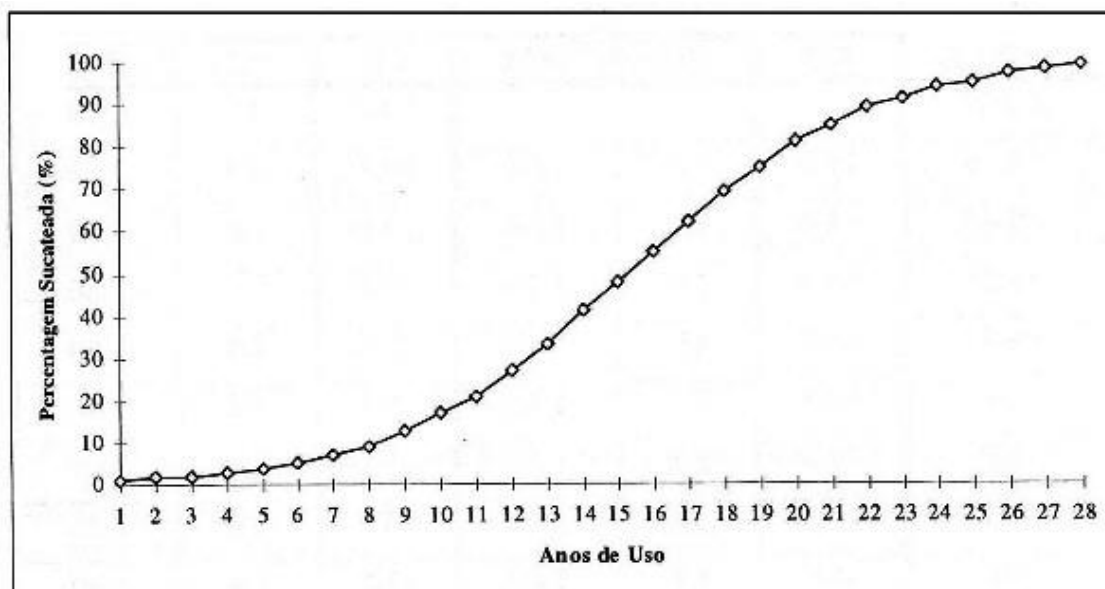


Figura 2 - Curva de Sucateamento



2.3 Fator de Emissão

O Fator de Emissão vem a ser, por definição, um valor médio das quantidades emitidas obtido através de cálculos estatísticos ou medições reais, sendo específico para um dado poluente e típico de um determinado modelo, classe ou frota de veículos (MUGEL et al., 1987).

O Fator de Emissão da frota representa o valor de emissão característico da frota total de veículos – heterogênea por ser composta por veículos de idades e modelos diferentes –, resultante da média ponderada dos Fatores de Emissão para cada ano-modelo. A ponderação é feita com base no número de veículos constantes da frota de cada ano-modelo e na distribuição da quilometragem média rodada por tempo de uso do veículo (MURGELetal., 1987).

Neste trabalho, consideram-se apenas os Fatores de Emissão a partir do escapamento dos automóveis e veículos comerciais leves, por representarem cerca de 80% do total de emissões advindas de veículos automotores (SZWARC & MURGEL, 1989)⁶. Os Fatores de Emissão para veículos novos, apresentados na Tabela 1, referem-se à média dos valores de ensaios realizados no Laboratório de Emissão Veicular da CETESB, ponderados proporcionalmente à comercialização de cada configuração de veículo e outros critérios relativos à evolução da concepção dos motores⁷.

Tabela 1 - Fatores Médios de Emissão de Veículos Leves Novos^a

ANO/MODELO	Veículos a Alcool			Veículos a Gasolina		
	CO	HC	NOx	CO	HC	NOx
Pré-78	-	-	-	54,0	4,7	1,20
78-79	18,0	1,6	1,00	54,0	4,7	1,20
80-83	18,0	1,6	1,00	33,0	3,0	1,40
84-85	16,9	1,6	1,20	28,0	2,4	1,60
86-87	16,0	1,6	1,80	22,0	2,0	1,90
88	13,3	1,7	1,40	18,5	1,7	1,80
89	12,8	1,6	1,10	15,2	1,6	1,60
90	10,8	1,3	1,20	13,3	1,4	1,40
91	8,4	1,1	1,00	11,5	1,3	1,30
92	3,6	0,6	0,50	6,2	0,6	0,60
93	4,2	0,7	0,60	6,3	0,6	0,80
94	4,6	0,7	0,70	6,0	0,6	0,70
95 ^b	4,6	0,7	0,70	6,0	0,6	0,70

Fonte: CETESB, 1995.

^a Médias ponderadas de cada ano-modelo pelo volume da produção, expressas em g/km

^b Dados repetidos do ano anterior por falta de dados disponíveis para o ano em questão.

2.4 Fator de Deterioração

Com a constante utilização do veículo, o desgaste de peças e ~ componentes afeta as características de emissão do motor, aumentando 1 especialmente as emissões de CO e HC's. Entretanto, isto não parece acontecer com as emissões de NO_x, visto que nos motores sem sistemas de controle existe uma tendência à diminuição destas emissões devido, principalmente, ao desgaste dos anéis dos pistões com conseqüente diminuição dos picos de temperatura dentro dos cilindros (MURGEL et al., 1987).

Uma das maneiras utilizadas para se estimar a emissão de um veículo usado é a de se fazer uso de um fator multiplicativo chamado Fator ~ de Deterioração (FD), que é incorporado ao Fator de Emissão (FE) para `veículos novos, ou seja:

(Eq.2)

$$\text{Fator de Emissão Corrigido (Veículo usado)} = \text{Fator de Emissão (veículo novo)} * \text{Fator de Deterioração}$$

Para efeito deste estudo, por falta de dados específicos para o Brasil, os Fatores de Deterioração considerados para efeito de cálculo são, aqueles utilizados pelo E.P.A. (1981) para a frota americana de veículos automotores.

2.5 Inventário Veicular e de Emissões Veiculares

A partir das considerações feitas anteriormente (itens 2.1 a 2.4), chega-se ao número provável de autoveículos em circulação no Brasil no ano de 1995, bem como às prováveis quantidades de poluentes emitidas pela frota brasileira para o mesmo ano.

Os principais resultados obtidos a partir destas considerações ' estão reunidos de forma consolidada, por tipo de combustível utilizado, na Tabela 2. A partir dela percebe-se que a frota circulante a gasolina é cerca de 57% maior que a frota movida a álcool.

⁶ O N₂O é um importante e potente gás de efeito estufa também proveniente de veículos automotores, e que possui um efeito direto sobre o forçamento radiativo. Apesar disto dificuldades metodológicas ele não é quantificado na presente análise, diminuindo assim o teor da parcela direta no aquecimento total.

⁷ Já descontada a parcela do carbono advindo dos HC's e do CO

Ao se comparar as emissões entre veículos a gasolina e a álcool, observa-se que um veículo movido a gasolina emite, em média, cerca de 33% a mais de CO do que um veículo movido a álcool. Com relação às emissões de HC's, um veículo movido a gasolina é responsável também por uma maior quantidade emitida deste poluente – embora comparativamente menor do que as emissões de CO-, emitindo, em média, cerca de 14% a mais do que um veículo a álcool. Já a quantidade emitida de NO_x é maior para um veículo movido a álcool do que para um movido a gasolina, sendo aproximadamente 4% superior às emissões deste último⁸.

Tabela 2 - Dados Consolidados por Tipo de Combustíveis para o Ano de 1995

Dado Característico	Poluente	Gasolina	Álcool
Total de Veículo sem Circulação (unidades)	-	6.815.517	4.343.903
Quilometragem Média Percorrida pela Frota (km)	-	14.979	12.356
Fator de Emissão Médio para a Frota (g/km)	CO	18,15	16,53
	HC	1,76	1,87
	NOx	0,95	1,21
Total de Emissões (toneladas)	CO	1.853.129	887.033
	HC	179.522	100.540
	NOx	97.345	64.780
Total de Emissões por Veículo (ton./veículo)	CO	0,2719	0,2042
	HC	0,0263	0,0231
	NOx	0,0143	0,0149

Fonte: Elaboração própria.

3 Estimativa do Potencial de Aquecimento Indireto

É fácil entender o efeito direto de certos gases - como o CO₂ e os CFC's - sobre o aquecimento global, pois estes gases retêm calor diretamente. Os HCNM (hidrocarbonetos não-metano), o CO e os NO_x, por outro lado, apesar de não serem considerados gases de efeito estufa em seu sentido direto - eles não retêm calor diretamente -, podem ter importantes efeitos indiretos sobre o forçamento radiativo através da produção e destruição do ozônio troposférico e de suas influências nas concentrações do radical hidroxil e de CH₄ na atmosfera.

Para se estimar o percentual de aquecimento indireto a partir das emissões de veículos automotores determinadas anteriormente, há que se expor alguns conceitos e definições necessários à formulação do problema e conseqüente apresentação de resultados.

3.1 O Potencial de Aquecimento Global

O índice de Potencial de Aquecimento Global (GWP) foi originalmente proposto por LASHOF & AHUJA (1990), sendo posteriormente adotado e desenvolvido pelo IPCC, de maneira a permitir comparações quantitativas entre o efeito estufa de diferentes gases (ROSA & SCHAEFFER, 1995).

O GWP de um dado gás pode ser definido como sendo o quociente entre o forçamento radiativo instantâneo de um pulso de emissão desse gás e o forçamento radiativo também instantâneo decorrente de uma emissão igual e simultânea de um gás usado como referência (geralmente o CO₂), integrados até um certo horizonte de tempo (ROSA & SCHAEFFER, 1995).

De acordo com o IPCC (1995), o GWP pode ser expresso como o forçamento radiativo integrado no tempo a partir de uma liberação instantânea de um quilograma de um dado gás relativo a um quilograma de CO₂, sendo dado pela Eq. 3:

$$GWP(x) = \frac{\int_0^T a_x * [x(t)] dt}{\int_0^T a_r * [r(t)] dt}$$

(Eq. 3)

⁸ O número de moles (expresso em gmol, t mol, lbmol etc.) de um determinado composto representa a razão entre sua massa (expressa em gramas, toneladas, libras etc.) e seu peso molecular médio. Portanto, por consistência dimensional, o seu peso molecular médio pode ser expresso em g/gmol, t/tmol, lb/lbmol etc

Nesta equação a_x representa o forçamento radiativo instantâneo devido a um incremento unitário na concentração do gás que se deseja fazer um estudo comparativo; $x(t)$ e $r(t)$ representam a fração de cada gás (do gás em questão e do CO_2 , respectivamente) remanescente na atmosfera no tempo t . T representa o horizonte de tempo para o qual o cálculo é realizado (limite superior do intervalo de integração), e a_{CO_2} possui o mesmo significado de a_x modificado apenas por se referir ao gás de referência - o CO_2 .

Em sua concepção original o GWP foi desenvolvido com fins de aplicação na formulação de políticas, como uma medida da possível intensificação do efeito de aquecimento do sistema superfície-troposfera devido à emissão de diferentes gases.

O GWP para alguns gases, que posteriormente será utilizado na determinação do percentual de aquecimento indireto das emissões de veículos automotores, é apresentado na Tabela 3.

3.2 Cálculo da Participação do Aquecimento Indireto no Aquecimento Total

3.2.1 Veículos a Gasolina

A participação do aquecimento indireto no aquecimento total é definida como a razão entre duas parcelas: a parcela indireta e a parcela total, sendo que esta última representa o somatório das parcelas direta e indireta, conforme é apresentado na Eq.4.

(Eq.4)

$$\text{Percentual de Aquecimento Indireto} = \frac{\text{Parcela Indireta}}{\text{Parcela Total}}$$

A parcela indireta representa o somatório do efeito radiativo integrado (em unidades de CO_2 equivalente) dos gases de efeito estufa que atuam de maneira indireta no forçamento radiativo¹⁰. Aqui são tratadas as emissões de CH_4 - que possui efeitos tanto diretos como indiretos -, CO , NO_x e $HCNM$.

A parcela direta, por sua vez, é definida de forma análoga, levando em conta, apenas, a atuação direta sobre o forçamento radiativo. Analisam-se aqui, nesse caso, as emissões de CO_2 e CH_4 ¹¹.

Os potenciais de aquecimento global (GWP) estão disponíveis (vide Tabela 3) tanto para os constituintes da parcela indireta quanto para os da parcela direta.

⁹ Observe que na Eq.1 estes parâmetros são de suma importância

¹⁰ Esta consideração é apenas aproximada pois deve-se levar em conta a taxa de absorção do CO_2 para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, ou seja, existe um tempo de permanência do CO_2 na atmosfera que não está sendo considerado. Além disto, algum combustível fóssil é usado também tanto na fase agrícola quanto na fase industrial da produção de álcool. Para maiores detalhes, ver MACEDO (1991).

¹¹ Esta é outra aproximação, pois deve-se levar em conta os tempos de permanência destes compostos antes de serem oxidados a CO_2 , bem como sua posterior taxa de absorção para o crescimento da cana-de-açúcar

Tabela 3 - Potencial de Aquecimento Global de Alguns Gases Relativos ao CO₂ (Base Mássica)

Gás Considerado	Tempo de Vida Estimado ^a	Gás Estufa Afetado	Potencial de Aquecimento Global Integração no Horizonte de Tempo (anos)			Erro Estimado %
			20	100	500	
EFEITO DIRETO						
CO ₂	120 anos	-	1	1	1	-
CH ₄	10,5 anos	-	35	11	4	±20
N ₂ O	132 anos	-	260	270	170	-500
HCMN	dias a meses	-	-	-	-	-
CO	meses	-	-	-	-	-
No _x	dias	-	-	-	-	-
EFEITO INDIRETO						
CH ₄	-	O ₃ troposférico	24	8	3	±50
CH ₄	-	CO ₂	3	3	3	±50
CH ₄	-	H ₂ O estratosférico	10	4	1	±50
CO	-	O ₃ troposférico	5	1	0	±10
CO	-	CO ₂	2	2	2	±10
No _x	-	O ₃ troposférico	150	40	14	±10
HCMN	-	O ₃ troposférico	28	8	3	±10
HCMN	-	CO ₂	3	3	3	±10

Fonte: BELL, GUPTA e GREENING,

^a Os valores mais aceitos hoje para o tempo de vida do CH₄ e do N₂O são, respectivamente, 14,5 e 120 anos (IPCC, 1995).

Os Fatores de Emissão Médios para o CO, HC's e No_x podem ser observados, entre outros resultados, na Tabela 2. Entretanto não são disponíveis os fatores de emissão médios para o CH₄, CO₂ e HCMN.

Quanto ao fator de emissão de CO₂, este pode ser obtido a partir do consumo médio de gasolina no ano de 1995 e a partir da Eq.1. Com isto, a quantidade de CO₂ liberada para a atmosfera a partir da frota movida a gasolina no ano de 1995 é estimada em aproximadamente 37Mt de CO₂¹². Então, baseando-se nesta quantidade emitida, o fator de emissão médio para o CO₂ pode ser estimado em cerca de 365 g/km.

A composição exata de cada hidrocarboneto presente na mistura de hidrocarbonetos é difícil de se obter, ainda mais para frotas de diferentes idade se combustíveis decomposição variada. Para determinar a quantidade de CH₄ emitida a partir dos autoveículos, estima-se inicialmente uma proporção molar entre os diversos hidrocarbonetos presentes na mistura de hidrocarbonetos, estabelecendo-se uma divisão equimolar entre o hidrocarboneto mais leve (no presente caso o CH₄) e o mais pesado (um hidrocarboneto com um peso molecular médio da ordem de 114 t/mol)¹³. A quantidade de hidrocarbonetos totais pode ser vista na Tabela 2. Deste total, deve-se subtrair parcela devida ao CH₄, já que este hidrocarboneto é o único que apresenta tanto efeitos diretos como indiretos sobre o forçamento radiativo, sendo, portanto, necessário diferenciá-lo dos demais hidrocarbonetos.

Tendo-se em mente estas considerações, a quantidade de CH₄ formada e emitida a partir da frota movida a gasolina é estimada em cerca de 22 kt, e seu fator de emissão médio por veículo em aproximadamente 0,22g/km. Portanto, levando-se em conta a Tabela 2, a quantidade de HCMN emitida foi estimada em cerca de 157 kt, com um fator de emissão médio de 1,54g/km.

O Efeito Radiativo Integrado (E.R.I) pode ser calculado através da Eq.5:

¹² O percentual de aquecimento indireto total leva em consideração os dois combustíveis utilizados: gasolina e álcool, ou seja:

¹³ A razão de o horizonte de 20 anos ser considerado mais crítico para o presente estudo é porque o GWP dos gases diminui com o passar do tempo. Assim, por definição, a participação do efeito indireto sobre o efeito total será sempre tão mais crítico quanto menor for o intervalo de tempo considerado.

$$\text{E.R.I do gás } i = \text{GWP}_i * \text{F.E Médio} * \text{Quilometragem Média da Frota} * \text{N}^\circ. \text{ de Veículos da Frota} \quad (\text{Eq.5})$$

Considerando-se então o GWP dos diferentes gases em diferentes s de tempo conforme apresentado na Tabela 3, chega-se aos s da Tabela 4.

A Tabela 4 permite observar que ao se considerar uma base que não leve em conta o efeito radiativo dos gases (base N-GWP), ou seja. quando se faz um simples balanço de massa, verifica-se que o somatório dos percentuais das emissões ditas de efeito indireto não é significativo. Isto levaria a pensar que, numa análise voltada para a determinação do efeito radiativo total das emissões de autoveículos, a simples contabilização das quantidades emitidas de CO₂ seria suficiente para caracterizar o impacto produzido, já que este gás apresenta um percentual bastante expressivo 1 rente aos demais. Entretanto, isto não é verdade se se considera uma base que leva em conta o verdadeiro efeito radiativo dos gases (base CO₂ equivalente). Pelo exame desta tabela percebe-se que o somatório dos percentuais das emissões ditas de efeito indireto (CO, CH₄, HCNM e NO_x), ao se considerar a base CO₂ - equivalente, certamente é expressivo frente ao percentual das emissões ditas de efeito direto (CO₂ e CH₄), sendo que esta expressividade se reduz à medida que os horizontes de tempo considerados aumentam.

Tabela 4 - Dados Consolidados para a Frota a Gasolina para o Ano de 1995^a

Gás Emitido	Quantidade Emitida (base n-GWP) ^b	E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 20 anos ^c	E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 100 anos ^c	E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 500 anos ^c
CO ₂	37,29 (94,6)	37,29 (52,3)	37,29 (76,0)	37,29 (85,6)
CH ₄ ^d	- ^e	0,77 (1,1)	0,24 (0,5)	0,092 (0,2)
Total Direto	37,29 (94,6)	38,06 (53,4)	37,53 (76,5)	37,37 (85,8)
CO ₂	1,85 (4,7)	12,98 (18,2)	5,56 (11,4)	3,71 (8,5)
CH ₄ ^d	0,022 (0,1)	0,82 (1,1)	0,34 (0,7)	0,16 (0,3)
HCNM	0,157 (0,4)	4,88 (6,8)	1,73 (3,5)	0,94 (2,2)
NO _x	0,097 (0,2)	14,60 (20,5)	3,89 (7,9)	1,36 (3,2)
Total Indireto	2,130 (5,4)	33,27 (46,6)	11,52 (23,5)	6,17 (14,2)
Total Geral	39,42 (100)	71,33 (100)	49,04 (100)	43,54 (100)

Fonte: Elaboração própria.

^a Os valores entre parênteses indicam o percentual relativo ao total geral emitido.

^b A base N-GWF não leva em conta o efeito radiativo dos gases. As quantidades são expressas em milhões de toneladas do gás em questão.

^c E.R.I.(Efeito Radiativo Integrado). A base CO₂ - equivalente leva em conta o efeito radiativo dos gases, As quantidades são expressas em milhões de toneladas de CO₂ equivalente.

^d Hipótese adotada: proporção equimolar entre o hidrocarboneto mais leve (CH₄) c o hidrocarboneto mais pesado (peso molecular médio da ordem de 114 t/tmol).

^e Não se diferencia aqui parcela direta e indireta, pois trata-se de um balanço de massa. Apenas, por comodidade, preferiu-se incluir a quantidade de CH₄ emitida na parcela indireta.

Apesar de se adotar uma distribuição equimolar entre os diversos hidrocarbonetos (isto foi feito porque seria difícil estimar a proporção exata destes na mistura), uma análise de sensibilidade demonstra que ao se variar a proporção entre os diferentes hidrocarbonetos os resultados para os percentuais de aquecimento global não variam de forma significativa. Isto pode ser visto na Tabela 5, que apresenta a variação do percentual de aquecimento indireto sobre o aquecimento total ao se considerar diversas

proporções molares entre os hidrocarbonetos presentes na mistura. Nesta tabela, a variável δ representa a proporção molar de cada hidrocarboneto presente na mistura de hidrocarbonetos. Por exemplo, $\delta_x = 99/0...(6)/1$ indica uma proporção molar de 99% do hidrocarboneto mais leve (CH_4), 0% para os seis HC's subsequentes e 1% para o hidrocarboneto mais pesado (peso molecular equivalente a 114t/tmol); $\delta_y = 70/3, 3, 2, 1, 3, 2/16$, indica uma proporção molar de 70% para o CH_4 , a composição entre barras para os seis HC's subsequentes, e 16% para o hidrocarboneto mais pesado, e assim sucessivamente.

Pode-se chegar a uma conclusão idêntica quando fazemos variar os Fatores de Emissão Médios e as Quilometragens Médias Anuais conjuntamente¹⁴. Os resultados da variação do percentual de aquecimento indireto considerando-se estas variações podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 5 - Variação do Percentual de Aquecimento Indireto sobre o Aquecimento Total ao se Considerar Diversas Proporções Molares entre Hidrocarbonetos

Variação Delta(δ)	Percentual de Aquecimento Indireto (20 anos)	Percentual de Aquecimento Indireto (100 anos)	Percentual de Aquecimento Indireto (100 anos)
$\delta 1:99,99/0...(6)/0,01$	43,96	23,61	14,25
$\delta 2:70/1...(6)/24$	46,18	23,50	14,18
$\delta 3:50/0...(6)/50$	46,64	23,48	14,17
$\delta 4:30/2...(6)/58$	46,85	23,47	14,16
$\delta 5:0,01/0...(6)/99,99$	47,06	23,46	14,15

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6 - Variação do Percentual de Aquecimento Indireto Considerando-se Variações nos Fatores de Emissão Médios e nas Quilometragens Médias Anuais Conjuntamente

Variação Percentual dos Parâmetros Conjuntamente	Variável delta (δ) ^a	Percentual de Aquecimento Indireto (20 anos)	$ \Delta $ (%) ^b	Percentual de Aquecimento Indireto (100 anos)	$ \Delta $ (%) ^b	Percentual de Aquecimento Indireto (100 anos)	$ \Delta $ (%) ^b
-20	$\delta 1$	33,9	10,1	16,3	7,3	9,3	5,0
	$\delta 2$	35,4	11,7	15,9	7,6	9,2	5,0
-10	$\delta 1$	39,1	4,9	19,9	3,7	11,7	2,6
	$\delta 2$	41,4	5,7	19,6	3,9	11,6	2,6
Sem Alteração	$\delta 1$	44,0	0,0	23,6	0,0	14,3	0,0
	$\delta 2$	47,1	0,0	23,5	0,0	14,2	0,0
+10	$\delta 1$	48,4	4,4	27,4	3,8	17,0	2,7
	$\delta 2$	52,4	5,3	27,5	4,0	17,0	2,8
+20	$\delta 1$	52,4	8,4	31,3	7,7	19,9	5,6
	$\delta 2$	57,3	10,2	31,6	8,1	19,9	5,7

Fonte: Elaboração própria.

^a $\delta 1$ representa a proporção molar [99,99/0...(6)/0,01];

$\delta 2$ representa a proporção molar [0,01/0...(6)/99,99];

^b A variação é em relação aos valores em Sem Alteração

3.2.2 Veículos a Alcool

Todos os resultados até agora apresentados foram obtidos considerando-se o combustível gasolina. A mesma linha de raciocínio poderia ser feita para o combustível álcool.

Entretanto ao se considerar o cálculo da participação do aquecimento indireto no aquecimento total verifica-se que este é composto por duas parcelas: a parcela devida ao aumento direto (baseada nas emissões de CO_2 , e CH_4) e a parcela devida ao aumento indireto (baseada nas emissões de CH_4 , CO , NO_x e $HCNM$). Isto foi mostrado na Eq.4.

¹⁴ Observe que na Eq. 1 estes parâmetros são de suma importância

Admitindo-se que o CO₂ emitido pelo uso do álcool combustível seja contrabalanceado pelo processo de fixação do CO₂ necessário para o desenvolvimento da cana-de-açúcar - o que resulta na retirada desse gás da atmosfera -, pode-se supor que dentro da parcela devida ao aquecimento direto o CO₂ não seja computado¹⁵.

Além disto, todo carbono emitido sob outras formas que não CO₂ (por exemplo, CH₄, CO, HCNM) é oxidado em CO₂ e H₂O, sendo, conseqüentemente, também responsável pelo crescimento da cultura da cana-de-açúcar. Portanto, dentro da parcela devida ao aquecimento indireto CH₄, CO e os HCNM não devem ser igualmente computados¹⁶. Resta, a apenas, considerar as emissões de NO_x.

Já que os NO_x são os únicos a serem computados na parcela indireta (CO, CH₄ e HCNM são transformados em CO₂ e H₂O), e que por aproximação a parcela direta é nula (CO₂ necessário para o crescimento da cana-de-açúcar), então o percentual de aquecimento indireto considerando se o álcool como o combustível utilizado é de aproximadamente 100%.

3.2.3 Veículos Totais

Levando-se em consideração o percentual de aquecimento indireto devido tanto ao combustível gasolina quanto o álcool combustível, o de aquecimento indireto total passa a ser um pouco superior aos percentuais encontrados quando se considera apenas o combustível gasolina¹⁷.

A Tabela 7 apresenta, de forma consolidada, alguns dos resultados encontrados considerando-se a frota de autoveículos movida a gasolina e a álcool conjuntamente para o ano de 1995. Esta tabela é semelhante à Tabela 4, não ser por uma diferença nos percentuais e nas quantidades emitidas de NO_x. Ela mostra, de forma implícita- compare esta com a Tabela 4 -, que ao se considerar as emissões líquidas provenientes de autoveículos movidos a álcool (no caso apenas as emissões de NO_x) numa análise que esteja voltada para a determinação do efeito radiativo total, estas são pequenas quando comparadas com o total das emissões advindas de autoveículos movidos a gasolina, influenciando assim muito pouco no percentual de aquecimento indireto total.

¹⁵ Esta consideração é apenas aproximada pois deve-se levar em conta a taxa de absorção do CO₂ para o desenvolvimento da cana-de-açúcar, ou seja, existe um tempo de permanência do CO₂ na atmosfera que não está sendo considerado. Além disto, algum combustível fóssil é usado também tanto na fase agrícola quanto na fase industrial da produção de álcool. Para maiores detalhes, ver MACEDO (1991).

¹⁶ Esta é outra aproximação, pois deve-se levar em conta os tempos de permanência destes compostos antes de serem oxidados a CO₂, bem como sua posterior taxa de absorção para o crescimento da cana-de-açúcar

¹⁷ O percentual de aquecimento indireto total leva em consideração os dois combustíveis utilizados: gasolina e álcool, ou seja:

$$\text{Percentual de Aquecimento Indireto Total} = \frac{[\text{Parcela Indireta}]_{\text{gasolina+álcool}}}{[\text{Parcela Direta}]_{\text{gasolina}} + [\text{Parcela Indireta}]_{\text{gasolina+diesel}}}$$

Tabela 7 - Dados Consolidados para a Frota Movida a Gasolina e Álcool para o Ano de 1995 a

Gás Emitido	Quantidade Emitida (base N-GWP) ^b	E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 20 anos ^c	E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 100 anos ^c	E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 500 anos ^c
CO ₂	37,29 (94,4)	37,29 (46,0)	37,29 (72,2)	37,29 (8,9)
CH ₄ ^d	- ^e	0,77 (1,0)	0,24 (0,5)	0,092 (0,2)
Total Direto	37,29 (94,4)	38,06 (47,0)	37,53 (72,7)	37,37 (84,1)
CO ₂	1,85 (4,7)	12,98 (16,0)	5,56 (10,8)	3,71 (8,4)
CH ₄ ^d	0,022 (0,1)	0,82 (1,0)	0,34 (0,6)	0,16 (0,3)
HCM	0,157 (0,4)	4,88 (6,0)	1,73 (3,3)	0,94 (2,1)
NO _x	0,162 (0,4)	24,31 (30,0)	6,48 (12,6)	2,26 (5,1)
Total Indireto	2,194 (5,6)	42,99 (53,0)	14,11 (27,3)	7,08 (15,9)
Total Geral	39,48 (100)	81,05 (100)	51,62 (100)	44,42 (100)

Fonte: Elaboração própria

^a Os valores entre parênteses indicam o percentual relativo ao total geral emitido.

^b A base N-GWP não leva em conta o efeito radiativo dos gases. As quantidades (quantidades líquidas) são expressas em milhões de toneladas do gás em questão.

^c E.R.I. (Efeito Radiativo Integrado). A base CO₂ equivalente leva em conta o efeito radiativo dos gases. As quantidades (quantidades líquidas) são expressas em milhões de toneladas de CO₂ - equivalente.

^d Hipótese adotada: proporção equimolar entre o hidrocarboneto mais leve (CH₄) e o hidrocarboneto mais pesado.

^e Não se diferencia aqui parcela direta e indireta, pois trata-se de um balanço de massa. Apenas, por comodidade, preferimos incluir a quantidade de CH₄ emitida na parcela indiceta.

Analogamente, realiza-se aqui também uma análise de sensibilidade, demonstrando, uma vez mais, que, apesar de algumas aproximações realizadas, os resultados dos percentuais de aquecimento indireto não se modificam de forma sensível. Estes resultados encontram-se na Tabela 8, que apresenta uma comparação entre o percentual de aquecimento indireto (considerando-se a frota movida a gasolina) e o percentual de aquecimento indireto total (considerando-se as frotas a gasolina e a álcool conjuntamente), para variações simultâneas nos fatores de emissão médios e nas quilômetros médios anuais para o horizonte de tempo de 20 anos, considerado aqui como o mais crítico¹⁸.

¹⁸ A razão de o horizonte de 20 anos ser considerado mais crítico para o presente estudo é porque o GWP dos gases diminui como passar do tempo. Assim, por definição, a participação do efeito indireto sobre o efeito total será sempre tão mais crítico quanto menor for o intervalo de tempo considerado

Tabela 8 - Percentual de Aquecimento Indireto Considerando-se Variações nos Fatores de Emissão Médios e nas Quilometragens Médias Anuais Conjuntamente para o Horizonte de 20 Anos^a

Varição Percentual dos Parâmetros Conjuntamente	Variável delta (δ) ^b	Percentual de Aquecimento Indireto (Frota à Gasolina)(20 anos) ^c	Percentual de Aquecimento Indireto Total (Frota a Gasolina e Álcool) (20 anos) ^d	$ \Delta $ (%) ^e
-20	δ_1	33,9	39,7	5,8
	δ_2	35,4	41,5	6,1
-10	δ_1	39,1	45,2	6,1
	δ_2	41,4	47,7	6,3
Sem Alteração	δ_1	44,0	50,2	6,2
	δ_2	47,1	53,5	6,4
+10	δ_1	48,4	54,6	6,2
	δ_2	52,4	58,7	6,3
+20	δ_1	52,4	58,6	6,2
	δ_2	57,3	63,4	6,1

Fonte: Elaboração Própria

^a O percentual de aquecimento indireto total, considerando-se $d = [50/0...(6)/50]$, para o horizonte de tempo de 20 anos foi de cerca de 53,0%.

^b δ_1 representa a proporção molar $[99,99/0...(6)/0,01]$.

δ_2 representa a proporção molar $[0,01/0...(6)/99,99]$.

^c Considerando apenas a frota movida a gasolina.

^d Considerando a frota movida a gasolina e a álcool conjuntamente.

^e A variação é a diferença entre o valor do percentual de aquecimento indireto e o percentual de aquecimento indireto total.

Conclusões

Neste trabalho as atenções estiveram principalmente voltadas para estimativas das emissões ditas de efeito indireto de gases de efeito estufa de autoveículos, e para o cálculo da participação percentual do aquecimento indireto sobre o aquecimento total. A partir de uma determinada metodologia, totalizou-se o número de automóveis e veículos comerciais Brasil no ano de 1995, e, paralelamente, quantificou-se, para estas categorias veiculares, as emissões ditas indiretas considerando-se a frota movida a gasolina e a álcool separadamente.

No que concerne à emissão de poluentes, os resultados mostram que ao se comparar as frotas movidas a gasolina e a álcool no tocante às estas emissões percebe-se que o veículo a gasolina médio brasileiro emite, em média, cerca de 33% a mais de CO e 14% a mais de HC do que o veículo médio movido a álcool. Apenas as emissões de NO_x são superiores para o veículo médio movido a álcool, sendo aproximadamente 4% superiores às emissões do veículo médio movido a gasolina.

A Tabela 9 apresenta os percentuais envolvidos na quantificação dos gases apresentados nesta análise.

A tabela mostra que é necessário se ter em mente que, numa análise que esteja voltada para a determinação do efeito radiativo total provocado pelas emissões de autoveículos no Brasil, a utilização de uma base N-GWP conduz a resultados errôneos, principalmente porque não incorpora o efeito radiativo dos gases envolvidos. Como pôde-se perceber, quando se considera uma base N-GWP o percentual conjunto das emissões ditas de efeito indireto (CO, CH₄, HCNM e NO_x) não é significativo. Entretanto, quando se utiliza uma base que leva em conta o efeito radiativo dos gases (base CO₂ equivalente), este percentual conjunto exibe um valor bastante expressivo, embora decrescente quando se consideram horizontes de tempo crescentes. Ao se associar as quantidades emitidas pelos autoveículos e o índice GWP (base CO₂ equivalente), estima-se o impacto que estas emissões têm num contexto de aquecimento global. Verifica-se para a frota movida a gasolina que, ao se considerar um horizonte de 20 anos, o percentual de aquecimento indireto é de aproximadamente 47 %, sendo de cerca de 23% e 14% para os horizontes de tempo de 100 e 500 anos, respectivamente. Entretanto, quando se consideram as frotas movidas a gasolina e a álcool conjuntamente, estes percentuais se tomam apenas um pouco superiores aos encontrados quando da consideração de veículos movidos apenas a gasolina, sendo iguais a 53 %, 27% e 16% para os horizontes de tempo de 20, 100 e 500

anos, respectivamente. Isto se justificava, principalmente, pelo fato de o álcool ser um combustível renovável (o CO₂ emitido pelos autoveículos é reciclado de volta pela cultura de cana-de-açúcar durante o processo de fotossíntese, e os gases CO, HCNM e CH₄ são posteriormente oxidados, na atmosfera, em CO₂ e H₂O, permitindo, desta forma, que o efeito de aquecimento indireto possa ser atribuído quase que exclusivamente às emissões de NO_x, totalizando 100% do aquecimento total - vide Tabela 8).

Além disto, esta análise permite reforçar, também, que a manutenção do programa do álcool no Brasil (PROÁLCOOL) pode também ser justificável não apenas por questões ambientais ligadas à emissão de gases poluentes em geral, mas também por implicar, dentro de um contexto de aquecimento global, numa menor contribuição no aquecimento total do planeta.

Ainda que uma série de incertezas permeiem este trabalho, como por exemplo as próprias incertezas associadas aos GWP's dos diferentes gases, uma análise de sensibilidade para verificação dos resultados foi levada a cabo. O que se percebe é que, mesmo com a variação de alguns dos parâmetros utilizados na análise, os resultados finais não se modificam de forma sensível, estando dentro das faixas de erro consideradas para alguns dos dados de entrada disponíveis na literatura e utilizados neste estudo.

Tabela 9 - Participação dos Diferentes Gases Emitidos a partir de Veículos a Gasolina e a Álcool nas Emissões

Gás Emitido	Quantidade Emitida (base N-GWP) ^b			E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 20 anos ^b			E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 100 anos ^b			E.R.I. (CO ₂ -equivalente) 500 anos ^b		
	G ^c	A ^d	T ^e	G	A	T	G	A	T	G	A	T
CO ₂	94,6	0,0	94,4	52,3	0,0	46,0	76,0	0,0	72,2	85,6	0,0	83,9
CH ₄ ^f	-	-	-	1,1	0,0	1,0	0,5	0,0	0,5	0,2	0,0	0,2
Total Direto	94,6	0,0	94,4	53,4	0,0	47,0	76,5	0,0	72,7	85,8	0,0	84,1
CO ₂	4,7	0,0	4,7	18,2	0,0	16,0	11,4	0,0	10,8	8,5	0,0	8,4
CH ₄ ^f	0,1	0,0	0,1	1,1	0,0	1,0	0,7	0,0	0,6	0,3	0,0	0,3
HCNM	0,4	0,0	0,4	6,8	0,0	6,0	3,5	0,0	3,3	2,2	0,0	2,1
NO _x	0,2	100	0,4	20,5	100	30,0	7,9	100	12,6	3,2	100	5,1
Total Indireto	5,4	100	5,6	46,6	100	53,0	23,5	100	27,3	14,2	100	15,9
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Fonte: Elaboração própria.

^a A base N-GWP não leva em conta o efeito radiativo dos gases.

^b A base CO₂ equivalente leva em conta o efeito radiativo dos gases.

^c Percentuais para a frota movida a gasolina Percentuais para a frota movida a álcool.

^d Percentuais considerando-se as frotas movidas a gasolina e a álcool conjuntamente.

^e Hipótese adotada: proporção equimolar entre o hidrocarboneto mais leve(CH₄) carboneto mais pesado.

5 Referências Bibliográficas

- BELL, S.R.; GUPTA, M.; GREENING, L.A. (1995). "Full-Fuel-Cycle Approach to Vehicle Emissions Modeling: A Case Study of Gasoline in Southeastern Region of the United States". In: Energy Sources, v. 17, n. 5.
- CETESB (1982). Citado por MURGEL, M.M et al. (1987).
- _____ (1995). Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo - 1994. São Paulo.
- IPCC (1990). Climate Change: The IPCC Scientific Assessment, HOUGHTON, J.T.; JENHINS, G.J. &EPHRAUMS, J.J. eds. Cambridge University Press. Cambridge.
- _____ (1992). Climate Change 1992: The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment, HOUGHTON, J.T.; CALLENDAR, B.A. & VARNEY, S.K. eds.. Cambridge University Press. Cambridge.
- _____ (1995). Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios. Report from Working Group I and III, HOUGHTON, J.T.; MEIRA FILHO, L.G.; BRUCE, J.; LEE, H.; CALLANDER, B.A.; HAITES, E.; HARIS, N & MASKELL, K. eds.. Cambridge University Press. Cambridge.
- LASHOF, D.A.; AHUJA, D.R. (1990). "Relative Contributions of Greenhouse Gas Emissions to Global Warming". In: Nature, n. 344, pp.529.
- MACEDO, I.C. (1991). "Agroindústria da Cana-de-Açúcar: participação na redução da taxa de carbono atmosférico no Brasil". In: Informativo CTC, n. 67.
- MURGEL, E.M. (1990). Veículos Automotores. O Proálcool e a qualidade do ar. CNI. COASE. Rio de Janeiro.
- MURGEL, M.M; SZWARC, A.; SANTOS, M.D.; BRANCO, G.M.; CARVALHO, H. (1987). "Inventário de Emissão Veicular: metodologia de cálculo". In: Revista de Engenharia Sanitária, v. 26,
- PETROBRÁS (1996). SERPLA/DIPLES/SETEN.
- ROSA, L.P.; SCHAEFFER, R. (1995). "Global Warning Potentials: the case of emissions from dams". In: Energy Policy, v.23, n. 2, pp.149-158.
- SZWARC, A.; MURGEL, E.M. (1989). "Condições de Tráfego e a Emissão de Poluentes". In: Ambiente - Revista CETESB de Tecnologia, v. 3, n. 1, pp. 59-64.
- URIA, L.A.B. (1996). Emissão de Gases de Efeito Estufa no Setor de Transportes e seu Potencial de Aquecimento Indireto: o caso dos automóveis e veículos comerciais leves no Brasil. Rio de Janeiro: PPE/COPPE/UFRJ. (Tese de Mestrado).
- U.S. EPA (1981). Citado por MURGEL, M.M et al. (1987).