

# ANÁLISE DO IMPACTO DO RODOANEL - TRECHO NORTE SOBRE A QUALIDADE DO AR



Volume 1

São Paulo, Agosto de 2010

---

Atenção: Este é um arquivo digital para consulta. O original deste Relatório, impresso em papel e devidamente assinado, é o único documento referente ao assunto aqui abordado que possui validade legal. A reprodução de partes ou do total deste relatório, desde que não editada ou modificada, está autorizada por seus autores na condição de que estes sejam devidamente citados.

---

## SUMÁRIO

### Volume 1 – Contribuição de Emissões Atmosféricas na Qualidade do Ar

Sumário executivo	6
1. Escopo	8
2. Antecedentes	8
3. Metodologias e premissas básicas	10
3.1. Determinação das condições de tráfego	10
3.2. Determinação dos fatores de emissão	14
3.3. Determinação das condições meteorológicas	18
3.4. Modelo de dispersão atmosférica	21
4. Discussão dos resultados	25
5. A normatização das análises de rodovias	27
6. Conclusões	31

ANEXO I: Caracterização da Região Metropolitana de São Paulo e Condições de Dispersão Associadas

ANEXO II: Estudo de Dispersão Atmosférica das emissões provenientes do tráfego do Rodoanel - Trecho Norte

ANEXO III: Gráficos de Isoconcentrações dos Trechos 01 a 06 - Cenários: 2.014 e 2.024

ANEXO IV: Gráficos de Isoconcentrações dos Túneis 01 a 06- Cenários: 2.014 e 2.024

Este trabalho foi realizado pela EnvironMentality – Tecnologia com Conceitos Ambientais Ltda., conjuntamente com a ADS – Tecnologia e Desenvolvimento Sustentável Ltda., ambas com larga experiência em estudos de vanguarda na emissão de fontes móveis, as quais disponibilizaram dados e procedimentos inovadores por elas desenvolvidos, vitais para a execução deste trabalho com a qualidade técnica necessária. Agradecemos, portanto, a participação de todos os colaboradores e consultores associados que se dedicaram à sua elaboração e, em particular, aos professores do Instituto Astronômico e Geofísico da USP, pelo auxílio prestado nas análises meteorológicas para a modelagem atmosférica, a saber:

Edmilson Dias de Freitas

Ricardo de Camargo

Shigeru Yamagata

Alfred Szwarc

ADS

Fábio Cardinale Branco

EnvironMentality

# ANÁLISE DO IMPACTO DO RODOANEL - TRECHO NORTE SOBRE A QUALIDADE DO AR

## Sumário executivo

O presente trabalho foi desenvolvido de acordo com o objeto estabelecido no Contrato assinado entre a EnvironMentality e o Consórcio JGP – Consultoria e Participações Ltda e Prime Engenharia, para a análise do impacto do tráfego do Rodoanel no trecho Norte sobre a qualidade do ar. A elaboração dos cenários analisados de tráfego e de qualidade do ar foi feita através de modelagem matemática a partir dos volumes de tráfego previstos pela Secretaria de Transportes e DERSA e de fatores de emissão dos veículos brasileiros calculados com base nos dados de certificação da CETESB através de metodologia própria da EnvironMentality. O traçado do Trecho Norte utilizado na modelagem representa a situação dos estudos de engenharia em 15 de agosto de 2010, tendo sido fornecido pela DERSA.

Os volumes de tráfego utilizados estão baseados nos fluxos médios diários de tráfego modelados pela Assessoria de Planejamento da Secretaria de Transportes do Estado de São Paulo para os quatro segmentos que compõem o Trecho Norte do Rodoanel (Dutra - Cumbica, Cumbica – Fernão Dias, Fernão Dias – Av. Inajar de Souza e Av. Inajar de Souza – Av. Raimundo Pereira de Magalhães) e alças de acesso correspondentes, bem como em previsões de tráfego das rodovias que cruzam ou alimentam esse trecho do Rodoanel, também fornecidos pela DERSA. Com base nas previsões de VDM (Volume Diário Médio) para os cenários estudados (2014 e 2024), nas curvas de distribuição horária estimadas para o Rodoanel e nas proporções das diversas classes de veículos que trafegam nessas rodovias, foram calculados os fatores médios de emissão dos fluxos esperados hora a hora.

Neste trecho existem apenas duas estações meteorológicas com histórico de dados suficientes para serem analisados: estação do Aeroporto Internacional de Cumbica e estação de monitoramento da qualidade do ar da CETESB em Santana. Entretanto, por ser um trecho com aproximadamente 45 km de extensão e com uma topografia bastante variada, posto que percorre as proximidades da Serra da Cantareira, a modelagem de dispersão de poluentes foi feita tanto com os dados reais das estações, extrapolados para todo o trecho, quanto por modelagem feita a partir da aplicação do modelo Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS)<sup>1</sup> a toda a região Metropolitana de São Paulo para o detalhamento temporal das condições meteorológicas em pontos selecionados sobre o traçado previsto para este trecho do Rodoanel. Com esses dois tipos de dados distintos, gerando cenários de concentração de poluentes diferentes, pode-se avaliar o impacto em qualquer ponto do trecho considerado do Rodoanel em condições simuladas, o mais próximo possível da real utilização da via, verificando-se qual das duas hipóteses de dispersão representa as condições mais severas de contribuição da via para a concentração de poluentes, trabalhando-se em favor da segurança tanto nas áreas residenciais quanto naturais nas margens da rodovia.

Diferentemente dos estudos feitos para os trechos Sul e Leste do Rodoanel, o trecho Norte apresenta uma quantidade de túneis muito mais significativa, de forma que os dados e cenários considerados alimentaram dois modelos distintos de dispersão, a saber:

- para os seis trechos (tabela 1) em que a via corre em superfície ou viadutos foi utilizado o modelo CALRoads View, específico para fontes móveis, para a estimativa e previsão do impacto do tráfego esperado no Rodoanel sobre a qualidade do ar nas imediações da via, em áreas situadas além da faixa de domínio, isto é, em comunidades estabelecidas junto aos trechos que atravessam espaços conurbados, bem como em áreas de reserva natural.

---

<sup>1</sup> . Walko, R. L., Tremback, C. J., Panetta, J., Freitas, S. R., Fazenda, A. L., Freitas, E. D., Enari, E. BRAMS version 4.0. Model input namelist parameters. Março 2007. Disponível on line em [www.cptec.inpe.br/brams](http://www.cptec.inpe.br/brams)

- para os trechos em que a via será construída em túneis, foram modeladas as saídas de ambos os sentidos de cada túnel, considerando-se que os poluentes gerados pelo tráfego no interior dos mesmos venha a ser acumulado e lançado na atmosfera apenas pela boca de saída, dispersando-se em uma faixa de até 100 m de distância do desemboque, no sentido da via. Para essa modelagem foi utilizado o modelo AERMOD, já amplamente consagrado para a estimativa de dispersão de poluentes gerados por fontes fixas.

Tabela 1 – trechos modelados onde a via está projetada em superfície

Trecho	Início	Fim	Foco da modelagem
1	Trecho Oeste do Rodoanel	túnel 1	entroncamento com Raimundo P. de Magalhães
2	túnel 1	túnel 2	região urbanizada de Brasilândia
3	túnel 2	túnel 3	entroncamento com Inajar de Sousa
4	túnel 5	túnel 6	entroncamento com Rod. Fernão Dias
5	túnel 6	divisa com Município de Arujá	estrada Guarulhos-Nazaré
6	divisa com Município de Arujá	Trecho Leste do Rodoanel	entroncamento com Rod. Presidente Dutra

Como resultados são apresentadas as linhas de isoconcentração de poluentes estimadas em função da distância do eixo da rodovia, nos trechos em que

a via correrá em superfície, ou dos desemboques dos túneis, conforme o caso (anexos III e IV).

A avaliação dos cenários estudados indicou que, no geral, a situação para o ano 2014 é mais severa do que a prevista para 2024. Isto se deve à tendência de redução das emissões veiculares em geral ditadas pelo PROCONVE, as quais compensam, com vantagem, o crescimento esperado do tráfego.

No caso das simulações feitas para os trechos onde a rodovia não apresenta túneis, não foram observados pontos críticos de concentração para os cinco poluentes considerados (monóxido de carbono, hidrocarbonetos, material particulado, dióxido de nitrogênio e dióxido de enxofre) que possam vir a representar ameaça à qualidade do ar fora da faixa de domínio do Rodoanel. O único poluente que apresentou concentrações significativas, ultrapassando o Padrão de Qualidade do Ar (PQAr) apenas sobre as faixas de rolamento, foi o dióxido de nitrogênio. Essas concentrações caem rapidamente, atingindo o PQAr ainda dentro dos limites da faixa de domínio.

Ressalte-se que, devido às características próprias deste poluente quanto à reatividade fotoquímica, foi necessário que sua modelagem fosse feita pelo modelo CALINE4, o qual não considera os dados reais ou simulados pelo modelo BRAMS de meteorologia, de modo que essa modelagem foi efetuada apenas com a situação mais crítica de estabilidade atmosférica (classe de estabilidade G e velocidade do vento de 1 m/s), cuja ocorrência é muito pouco provável, restrita a alguns dias de inverno e não persistente ao longo das 24 horas do dia. Exceção é feita à modelagem dos túneis, pelo modelo AERMOD, que considera tanto as condições meteorológicas quanto a emissão dos poluentes a cada hora ao longo do dia.

No caso do material particulado, apenas nas proximidades do entroncamento com a Rodovia Presidente Dutra (trecho 6) a simulação de concentração anual indicou ultrapassagem do padrão de qualidade do ar, também restrita à área da rodovia, apenas para o cenário de 2014.

Para os desemboques dos túneis, modelados pelo AERMOD, observa-se que ocorre ultrapassagem do PQAr em dois pontos, apenas para o dióxido de nitrogênio, novamente sobre as faixas de rolamento.

Devido à proximidade da reserva da Serra da Cantareira, é necessário analisar com maior cuidado as concentrações previstas de dióxido de enxofre, o qual, dentre os poluentes estudados é aquele que potencialmente pode provocar maior impacto sobre a vegetação. Para esse tipo de análise, a Resolução CONAMA nº 3, de 1990, estabelece o padrão secundário de qualidade do ar, mais restritivo do que o padrão primário, normalmente utilizado para áreas de ocupação urbana. No caso do dióxido de enxofre, o padrão secundário corresponde à concentração média de 24 horas de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e à concentração média aritmética anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Assim, analisando o efeito potencial dos poluentes emitidos sobre a vegetação, observamos que apenas no trecho 6 ocorre a possibilidade de ultrapassagem do padrão secundário anual no cenário de 2014 sobre a pista. Cabe ressaltar, ainda, que esta ultrapassagem do padrão secundário ocorre apenas no cruzamento entre o Trecho Norte do Rodoanel e a Rodovia Presidente Dutra, portanto em área urbana, fora da reserva natural.

## 1. Escopo

O propósito deste trabalho é atender ao objeto do Contrato assinado entre a EnvironMentality e o Consórcio JGP/PRIME, formado pelas empresas JGP – Consultoria e Participações Ltda e Prime Engenharia, que foi incumbido pela DERSA para a análise do impacto do tráfego do Trecho Norte Rodoanel no sobre a qualidade do ar. Nesse contexto o trabalho projeta cenários de tráfego e correspondentes impactos sobre a qualidade do ar que permitem avaliar a magnitude dos efeitos da emissão de poluentes pelos veículos que trafegam no Trecho Norte do Rodoanel Mário Covas. Complementarmente, permite estimar a necessidade de adoção de medidas destinadas a mitigar efeitos que possam vir a ser considerados críticos.

## 2. Antecedentes

Em 2001, a EnvironMentality desenvolveu um trabalho em conjunto com o Instituto de Física da USP e o Instituto de Pesquisas Energéticas – IPEN para a determinação do impacto ambiental do tráfego de veículos no Sistema Anchieta-Imigrantes, publicado mais tarde pela Ecovias<sup>2</sup>. O trabalho demonstrou que em uma rodovia não ocorrem condições totalmente desfavoráveis à dispersão de poluentes atmosféricos concomitantemente com os episódios de máxima emissão, pois o próprio movimento dos veículos é suficiente para promover um fluxo de ar no sentido do tráfego por “efeito de arraste”, bem como a dissipação de energia pelos veículos gera um movimento de convecção natural, induzindo à dispersão dos poluentes. A existência desse efeito de arraste pelo tráfego de veículos e a ocorrência de turbulência térmica criada pela dissipação de energia contida no gás de exaustão e emitida pelos próprios veículos são fenômenos também reportados em diversos trabalhos internacionais. Desta forma, a presença de tráfego intenso, com alta emissão de poluentes, não coincide necessariamente com as condições locais de calma e vice-versa.

Aquele trabalho também estabeleceu correlações entre as concentrações dos diversos poluentes medidos de forma a evidenciar os poluentes traçadores do tráfego, onde o material particulado mostrou-se bom indicador do tráfego de veículos a diesel e o monóxido de carbono, um bom indicador dos veículos leves, que no Brasil são primordialmente equipados com motor de ignição por centelha (motor do ciclo Otto alimentados a álcool, gasolina, misturas álcool-gasolina ou gás natural). Verificou-se, também, que os demais poluentes podem ser estimados através das proporções das emissões no inventário de fontes móveis, considerando as proporções reais das classes de veículos que circulam na rodovia em estudo.

---

<sup>2</sup> Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality); Gatti, L.V. (IPEN); Artaxo Neto, P.E. (Instituto de Física USP); Murgel, E.; Martins, A. (Ecovias) - Impacto do Sistema Anchieta-Imigrantes sobre a Qualidade do Ar e modelagem estatística para a intervenção e gerenciamento de sua operação – Congresso ABCR – Gramado - RS - novembro/2003.

Mais recentemente, este método foi aplicado na avaliação do Corredor Expresso Tiradentes, para a São Paulo Transportes – SPTrans, onde o monitoramento de material particulado ao longo das vias de tráfego indicou os pontos críticos e permitiu comparar a influência do tráfego de ônibus no corredor sobre as concentrações existentes na cidade.

Outro experimento conduzido pela EnvironMentality para a medição da emissão de ônibus a diesel com amostrador a bordo de um veículo conduzido em ciclos padronizados de tráfego urbano para a avaliação de filtros de partículas e catalisadores também aportou conhecimentos importantes para a determinação dos fatores de emissão em g/km, validando os processos de cálculo indireto a partir da emissão dos motores (em g/kWh) e dos consumos de combustível medidos no motor em ciclo de emissões e no veículo em uso normal.

Todos estes trabalhos permitiram a validação dos métodos de cálculo dos fatores de emissão dos veículos pesados a partir dos fatores dos seus motores e a sua aplicação em inventários e nos modelos de dispersão.

Finalmente, vale lembrar que estes procedimentos são essencialmente os mesmos empregados por esta mesma equipe de consultores nos estudos anteriores, relativos aos trechos Sul e Leste do Rodoanel, diferindo apenas nos fatores de emissão da via que foram calculados com os fluxos e as composições do tráfego de veículos leves e pesados peculiares do trecho Norte e à composição da frota projetada para os anos base de 2014 e 2024, conforme solicitado pela DERSA e pelo Consórcio. Outra diferença importante refere-se à modelagem das emissões nas saídas dos seis túneis, que exigiu a utilização de fatores de emissão e fluxos de veículos calculados hora a hora, devido às características intrínsecas do programa AERMOD, que considera as emissões ao longo de todo o dia e não apenas durante os picos de emissão.

Com base nos conhecimentos consolidados nos trabalhos descritos acima e na modelagem de cenários críticos com o software CALRoads View, este trabalho possibilita prever o impacto do tráfego previsto para o Rodoanel, tanto num prazo mais imediato (2014, quando deverá entrar em funcionamento o Trecho Norte do

Rodoanel) como no futuro (2024), considerando, inclusive, a evolução dos fatores médios de emissão esperados em função do desenvolvimento do PROCONVE – Programa de Controle da Poluição por Veículos Automotores e do acordo de postergação das medidas de controle para veículos pesados fabricados entre 2009 a 2012.

Para a modelagem das emissões dos túneis foi utilizado o software AERMOD, considerando-se a saída dos túneis como fontes estacionárias (do tipo fonte-volume) que acumulam todas as emissões geradas no seu interior. Devido tanto ao efeito de arraste descrito anteriormente, quanto ao fluxo gerado pelos ventiladores a serem instalados no interior dos túneis, considerou-se que as emissões dos túneis diferem daquelas geradas por chaminés em fontes industriais, ocorrendo a dispersão por uma faixa de 100 m ao longo da via após a boca do túnel propriamente dita. Trata-se de metodologia compatível com a literatura especializada internacional, e inclusive preconizada pelo órgão ambiental de Hong Kong.

### **3. Metodologias e Premissas Fundamentais**

O estudo foi desenvolvido com base nas informações estatísticas disponíveis e ajustadas entre si, para assegurar a consistência entre os dados e tendências que cada uma revela, tendo sido utilizadas diferentes fontes de dados, buscando-se sempre aquelas que fossem mais adequadas às características próprias do Rodoanel.

Em alguns casos, em especial naqueles relacionados aos fatores de emissão, os dados de base não são detalhados por terem sido obtidos ou compilados pela EnvironMentality em projetos nos quais é exigida confidencialidade, embora possam ser utilizados por este escritório. Os valores médios, por sua vez,

foram calculados especificamente para as condições de tráfego e frotas previstas pela DERSA para o âmbito do presente trabalho, sendo portanto aplicáveis apenas para a modelagem do Rodoanel Trecho Norte.

Para produzir o fator de emissão médio dos veículos que trafegarão no Rodoanel, da forma como é solicitado nos modelos CALRoads View (fator de emissão composto, considerando um valor médio único para a frota, sem distinção de leves e pesados) e AERMOD (massa total de poluentes emitidos por unidade de tempo), foram utilizados dados estatísticos de diversas naturezas e fontes, como descrito a seguir.

### **3.1. Determinação das condições de tráfego**

Considerando que o Trecho Norte do Rodoanel ainda não se encontra em operação, não existem estatísticas de dados reais, nem mesmo previsões de tráfego hora a hora. Entretanto, o modelo CALRoads View, utilizado para a previsão das concentrações atmosféricas dos poluentes nos trechos em que a via corre em superfície, baseia-se em valores horários de tráfego e composição de frota.

Visando contornar esta dificuldade, foram utilizadas como base para as simulações dos trechos considerados homogêneos (entre trevos), as previsões para 2014 e 2024 do VDM (Volume Diário Médio) estimado para o trecho Norte do Rodoanel e respectivos trevos, utilizadas no projeto da via, fornecidas pela Assessoria de Planejamento da Secretaria de Transportes do Estado de São Paulo. A tabela 2 apresenta essas projeções do VDM.

**Tabela 2 – Projeções de VDM – Rodoanel Norte**

Segmento	Volumes diários médios nos trechos (2014)			Volumes diários médios nos trechos (2024)		
	Auto	Comercial	TOTAL	Auto	Comercial	TOTAL
Dutra - Cumbica	9.013	7.732	<b>16.745</b>	20.964	14.553	<b>35.517</b>
Cumbica – Fernão Dias	12.504	8.318	<b>20.822</b>	26.869	16.150	<b>43.019</b>

Fernão Dias – Inajar de Souza	27.296	16.694	<b>43.990</b>	51.249	27.666	<b>78.915</b>
Inajar de Souza – Raimundo Pereira de Magalhães	28.073	15.962	<b>44.035</b>	52.334	26.422	<b>78.756</b>

Para o movimento dos trevos foram utilizadas previsões do volume de tráfego das vias que cruzam o Rodoanel, bem como dos movimentos de acesso ao Rodoanel e às rodovias que o interceptam em cada sentido (tabela 3).

**Tabela 3 – Projeções de VDM dos trevos – Rodoanel Norte**

Interseção	Movimento (em relação ao Rodoanel)		2014		2024	
			Auto	Comercial	Auto	Comercial
Raimundo	saindo	PI - Capital	6.225	2.425	8.578	3.211
		PE - Capital	395	236	642	366
		PI - Interior	12.011	849	13.584	1.034
		PE - Interior	1.675	74	2.946	177
Raimundo	entrando	Capital - PE	7.151	2.467	9.752	3.248
		Capital - PI	829	245	1.247	427
		Interior_PE	12.478	904	14.595	1.188
		Interior_PI	1.287	109	2.472	174
Raimundo	eixo da via	Interior - Capital	1.659	128	1.970	164
		Capital - Interior	1.587	228	2.165	281
Norte - Oeste	mudança de trecho		11.953	7.349	23.149	12.625
Oeste - Norte	mudança de trecho		11.933	7.949	21.878	12.653
Inajar	saindo	PI - Capital	2.012	52	4.052	165
		PE - Capital	1.502	377	2.818	638
Inajar	entrando	Capital - PE	2.157	52	4.409	239
		Capital - PI	1.891	459	4.557	1.010
Inajar	eixo da via	Raimundo - Fernão Dias	12.037	8.253	21.545	13.089
		Fernão Dias - Raimundo	11.866	7.607	22.328	12.928
Fernão Dias	saindo	PI - Capital	5.867	1.608	11.244	2.583
		PE - Capital	512	18	1.916	71
		PI - Interior	2.786	3.786	4.447	5.291
		PE - Interior	940	715	1.844	1.648
Fernão Dias	entrando	Capital - PE	5.348	1.155	10.792	2.297
		Capital - PI	189	5	749	19
		Interior_PE	2.319	3.055	3.374	4.315
		Interior_PI	449	494	968	1.231
Fernão Dias	eixo da rodovia	Interior - Capital	21.875	9.898	26.212	12.161
		Capital - Interior	21.091	10.590	26.724	12.388
	eixo Rodoanel	Inajar - Hélio Smidt	5.275	3.317	10.410	6.227
		Hélio Smidt - Inajar	5.701	3.773	10.982	6.956
Hélio Smidt	saindo	PI - Capital	1.843	261	3.854	752
		PE - Capital	133	34	1.313	146
Hélio Smidt	entrando	Capital - PE	1.896	372	3.730	1.068
		Capital - PI	115	13	367	77
Hélio Smidt	eixo Rodoanel	Fernão Dias - Dutra	3.904	3.551	8.272	6.723
		Dutra - Fernão Dias	4.861	4.134	11.011	7.607
Dutra	saindo	PI - Capital	565	243	1.952	559
		PE - Capital	11.533	2.627	13.755	3.279
		PI - Interior	1.993	2.908	3.321	5.122
		PE - Interior	381	1.343	642	2.203
Dutra	entrando	Capital - PE	740	485	3.902	902
		Capital - PI	12.081	2.751	14.028	3.759
		Interior_PE	3.044	3.143	5.571	5.383
		Interior_PI	1.224	2.258	2.369	2.417
Dutra	eixo da rodovia	Interior - Capital	24.170	13.920	28.818	16.414
		Capital - Interior	19.681	13.304	23.636	15.743
Leste - Norte	mudança de trecho		1.210	539	2.851	1.468
Norte - Leste	mudança de trecho		1.461	412	3.366	1.120

Obs: PI = pista interna.

PE = pista externa.

Entrando e saindo referem-se aos veículos que entram no Rodoanel, provenientes do interior ou da Capital ou saem do Rodoanel com destino ao interior ou à Capital.

Cumprе ressaltar que o posicionamento e volume de tráfego do trevo de acesso ao Aeroporto Governador André Franco Montoro, em Guarulhos, não foram incluídos na modelagem de qualidade do ar, embora os dados de carregamento considerem esse acesso. Como o volume de tráfego que sai da pista do Rodoanel para acessar o aeroporto deverá ser equivalente ao volume que retorna do aeroporto, considerou-se o trecho onde for inserido o trevo como trecho homogêneo.

Adicionalmente, foram utilizados os volumes horários medidos em junho de 2010 no trecho Sul, já em operação, do Rodoanel, cuja variação horária foi assumida como representativa de todo o Rodoanel.

Com base nesses volumes de tráfego, foi estabelecido um perfil de distribuição horária do tráfego de veículos de passeio e comerciais ao longo do dia (tabela 4), o qual foi aplicado ao VDM de forma a estimar os volumes horários tanto para os trechos homogêneos quanto para os trevos.

**Tabela 4 – Distribuição horária do VDM**

Intervalo = 1 hora		Leves	Pesados
00:00	01:00	0,5%	1,3%
01:00	02:00	0,4%	0,8%
02:00	03:00	0,3%	0,8%
03:00	04:00	0,2%	0,7%
04:00	05:00	0,2%	0,9%
05:00	06:00	0,5%	2,6%
06:00	07:00	2,3%	6,0%
07:00	08:00	5,7%	7,9%
08:00	09:00	7,2%	6,5%
09:00	10:00	5,9%	4,8%
10:00	11:00	6,1%	6,3%
11:00	12:00	5,4%	6,0%
12:00	13:00	5,3%	5,7%
13:00	14:00	4,9%	5,3%
14:00	15:00	4,9%	6,0%
15:00	16:00	5,5%	6,2%
16:00	17:00	6,3%	6,8%
17:00	18:00	8,4%	8,2%
18:00	19:00	9,9%	6,6%
19:00	20:00	8,2%	4,2%
20:00	21:00	6,1%	2,3%
21:00	22:00	3,1%	1,6%
22:00	23:00	1,8%	1,5%
23:00	00:00	1,0%	1,1%

### **3.2. Determinação dos fatores de emissão**

Os fatores de emissão adotados neste estudo são calculados através de software proprietário e desenvolvido pela EnvironMentality, a partir dos seguintes dados:

- fatores de emissão individuais determinados nos processos de certificação do PROCONVE para o licenciamento ambiental dos modelos de veículos novos, conduzido pelo IBAMA/CETESB;
- composição da frota prevista para o Rodoanel a cada hora;

- projeção dos parâmetros acima em função das séries históricas de produção e sucateamento de veículos nos últimos 50 anos, associadas aos futuros limites do PROCONVE.

A seguir são detalhados os critérios considerados para a determinação dos fatores de emissão da via:

- **Veículos leves e caminhonetes com motor do ciclo Otto:** foram utilizados os fatores de emissão médios de homologação dos veículos novos, medidos em g/km através de ensaios e ciclo padrão de condução segundo a Norma NBR-6601, ponderados pela produção para cada ano-modelo desde 1980 até 2008 e publicados pela CETESB, assim como a curva de quilometragem anual, também da CETESB. A curva de idade e composição da frota circulante de veículos leves, bem como o fator de deterioração de emissões são os desenvolvidos pela EnvironMentality, com base em dados estatísticos reais de campo, coletados por um equipamento de medição de emissões veiculares por sensoriamento remoto<sup>3</sup>;
- **Motocicletas:** foram consideradas como veículos leves, pois a DERSA não as discrimina nos dados de volume de tráfego para as previsões de 2014 e 2024.
- **Veículos pesados e caminhonetes a diesel:** foram utilizados os fatores de emissão médios de homologação dos motores novos (medidos em g/kWh através de ensaios de motores em banco dinamométrico), publicados pela CETESB, convertidos para emissões dos veículos (em g/km) por meio de metodologia desenvolvida pela EnvironMentality<sup>4</sup> baseada no consumo de energia. A curva de idades da frota circulante de veículos pesados foi

---

<sup>3</sup> Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality) – “Inventário de Fontes Móveis: análise prospectiva e retrospectiva dos benefícios do PROCONVE para a qualidade do ar desde 1980 a 2030” – São Paulo, 2007, relatório e anexos entregues ao Ministério do Meio Ambiente em março de 2007 – no prelo.

<sup>4</sup> Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality) - Estimativa dos Fatores de Emissão de Veículos Pesados a partir dos Dados de seus Motores e do Consumo de Combustível – Anexo do Relatório de análise do impacto do rododanel - trecho sul sobre a qualidade do ar – 2007.

calculada a partir das tabelas de frotas registradas, publicadas pelo Departamento Estadual de Trânsito de São Paulo (DETRAN-SP) para a RMSP em 2007. Para a quilometragem média anual foram adotadas as estatísticas da EMTU – Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos e SPTrans – São Paulo Transportes para ônibus urbanos, e da EnvironMentality para caminhões, calculadas com base em estatísticas de transportadoras e aferidas pelo balanço das demandas de combustíveis no Brasil e do Inventário Nacional de Fontes Móveis já mencionado. A distribuição dos veículos diesel nas categorias definidas pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN) (Caminhões trator, Caminhões e Ônibus) foi obtida a partir de uma análise estatística sobre dados de pedágio do Sistema Anchieta-Imigrantes<sup>(2)</sup> no período de 01/01/2000 a 30/06/2001, tendo sido considerada como frota característica para o Rodoanel, por ser o dado mais consistente disponível e obtido em uma rodovia de alto movimento que cruza o Rodoanel.

De modo a avaliar a consistência dos dados de emissão dos veículos pesados e sua validade na aplicação às condições do Rodoanel, os fatores calculados para os ônibus foram comparados a ensaios com veículos testados em campo, segundo diversos ciclos de condução, os quais representam diferentes formas de utilização do veículo, com velocidades diferentes<sup>5</sup>, validando o método de conversão dos fatores de emissão em g/kWh para g/km desenvolvido pela EnvironMentality. Essa validação do método e de seus resultados para os ônibus encoraja a aplicação do método também aos demais veículos do ciclo diesel, cujos fatores de emissão somente puderam ser obtidos pelo mesmo processo. Além disso, a utilização dos fatores de deterioração, de acordo com a normatização norte-americana <sup>(6)</sup>, ajusta os fatores de emissão utilizados (baseados na emissão de

---

<sup>5</sup> Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality); Szwarc, A. (ADS) - Verificação da Eficiência de Sistemas Retrofit Johnson-Matthey em Ônibus Urbanos – Relatório apresentado à CETESB e EMTU em Abril de 2007.

<sup>6</sup> USEPA - Compilation of Emission Factors AP-42; <http://www.epa.gov/otaq/ap42.htm>, 2006.

motores novos) para a aplicação em uma frota circulante composta essencialmente por veículos usados.

Os fatores de deterioração da EPA são dados como acréscimos de emissão em gramas de poluente por quilômetro, para cada 10.000 km. Estes fatores foram convertidos para porcentual de acréscimo em função da quilometragem acumulada, aplicado sobre os fatores de emissão calculados pela EnvironMentality, considerando a idade limite de 20 anos como deterioração máxima do veículo. Para os efeitos deste trabalho, foi adotado o mesmo porcentual de adulteração de 20% da frota (à semelhança do que ocorre com os veículos do ciclo Otto, evidenciada pelas medições por sensoriamento remoto), para os quais foi aplicada a deterioração máxima, independentemente da idade do veículo.

Assim, pode-se considerar que os fatores de emissão de veículos pesados utilizados neste trabalho são os mais representativos da frota brasileira expressos em g/km, tendo sido calculados para cada ano-modelo, e apresentam coerência com os poucos dados efetivamente medidos em campo no Brasil para esta classe de veículos.

Para as previsões de emissão dos modelos futuros, foram adotadas as mesmas margens de segurança verificadas em relação aos limites de emissão do PROCONVE e as médias certificadas, aplicadas aos limites previstos para as próximas fases do Programa, para cada classe de veículos considerada. Para a previsão da composição de frota foram utilizadas as mesmas curvas de distribuição de idades atual aplicada à frota futura total.

Compondo-se o banco de dados dos fatores de emissão para cada tipo de veículo e as combinações dos volumes de tráfego esperados de veículos leves e pesados, obtiveram-se os fatores médios de emissão “da rodovia” aplicáveis ao Trecho Norte do Rodoanel, que alimentaram os modelos de dispersão atmosférica, utilizados na previsão das concentrações ambientais de poluentes.

Uma vez obtidos os volumes horários de tráfego separados em veículos de passeio e comerciais, conforme exposto no item anterior, estes foram novamente

subdivididos nas cinco categorias do DENATRAN (veículo leve Otto, caminhonete Diesel, caminhão, caminhão-trator e ônibus) de modo a compatibilizar com as suas emissões características, com base nas estatísticas de frota e nas contagens de pedágio conforme comentado anteriormente.

Com base nos percentuais de cada tipo de veículo a cada hora e nos fatores de emissão médios de cada poluente, foram calculados os fatores de emissão médios de CO, HC, NO<sub>x</sub>, particulados e SO<sub>x</sub> por veículo\*milha da via a cada hora, em todos os segmentos do Trecho Norte do Rodoanel. O produto destes fatores médios de emissão pelo volume horário de tráfego forneceu a estimativa das cargas poluidoras para cada poluente, emitidas pelo fluxo de veículos que trafegam em cada segmento da via e trevos nos horários de pico, valores utilizados como críticos em termos de emissão de cada poluente.

### **3.3. Determinação das condições meteorológicas**

A determinação das condições meteorológicas para a análise de dispersão de poluentes, de uma forma geral, pode ser considerada como um dos pontos críticos a ser cuidadosamente estudado, pois tais condições são altamente dinâmicas e apresentam fortes correlações com fatores ligados ao meio físico (topografia, uso do solo, presença de corpos d'água etc.). Nesse sentido, o ideal é que se possa contar com séries históricas de dados colhidas em estações situadas nas imediações da área de estudo. No caso de uma rodovia, o ideal é que tais estações estejam situadas dentro da área de influência da via e distribuídas ao longo de todo o trecho estudado. Entretanto, essas condições ideais são raramente encontradas, sendo necessário lançar mão de alternativas que permitam suprir as deficiências de dados amostrais.

Outro aspecto de extrema importância é o fato de que observações muitas vezes refletem apenas condições muito localizadas, não permitindo a caracterização de uma região. Como um exemplo extremo deste problema, é fácil imaginar como seria o resultado de uma medida da direção do vento no interior de um túnel ou

mesmo em um corredor de prédios. Independente das condições atmosféricas e dos padrões climatológicos do escoamento nas vizinhanças desses locais, a predominância dos ventos certamente será coincidente com a direção da via (canalização). Numa situação não tão simples, o mesmo efeito pode ser verificado ao longo de ruas ou estradas ou relevos que formem corredores. Sendo assim, o uso de modelos atmosféricos que representem características mais homogêneas de uma região é ainda mais importante e adequado.

Visando contornar o problema de aquisição de dados meteorológicos e ao mesmo tempo, utilizar dados que apresentassem alto grau de confiabilidade para o trecho do Rodoanel em estudo, a equipe optou por utilizar, além dos dados medidos nas estações situadas nas proximidades (Aeroporto de Cumbica e Santana - CETESB), também dados modelados, obtidos a partir da aplicação do modelo Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) especificamente para a RMSP, dos quais foram extraídas séries temporais em 20 pontos distribuídos ao longo de todo o trecho estudado. Dentre estes pontos, 6 foram selecionados como representativos dos principais segmentos do trecho Norte do Rodoanel, expostos na figura 1.

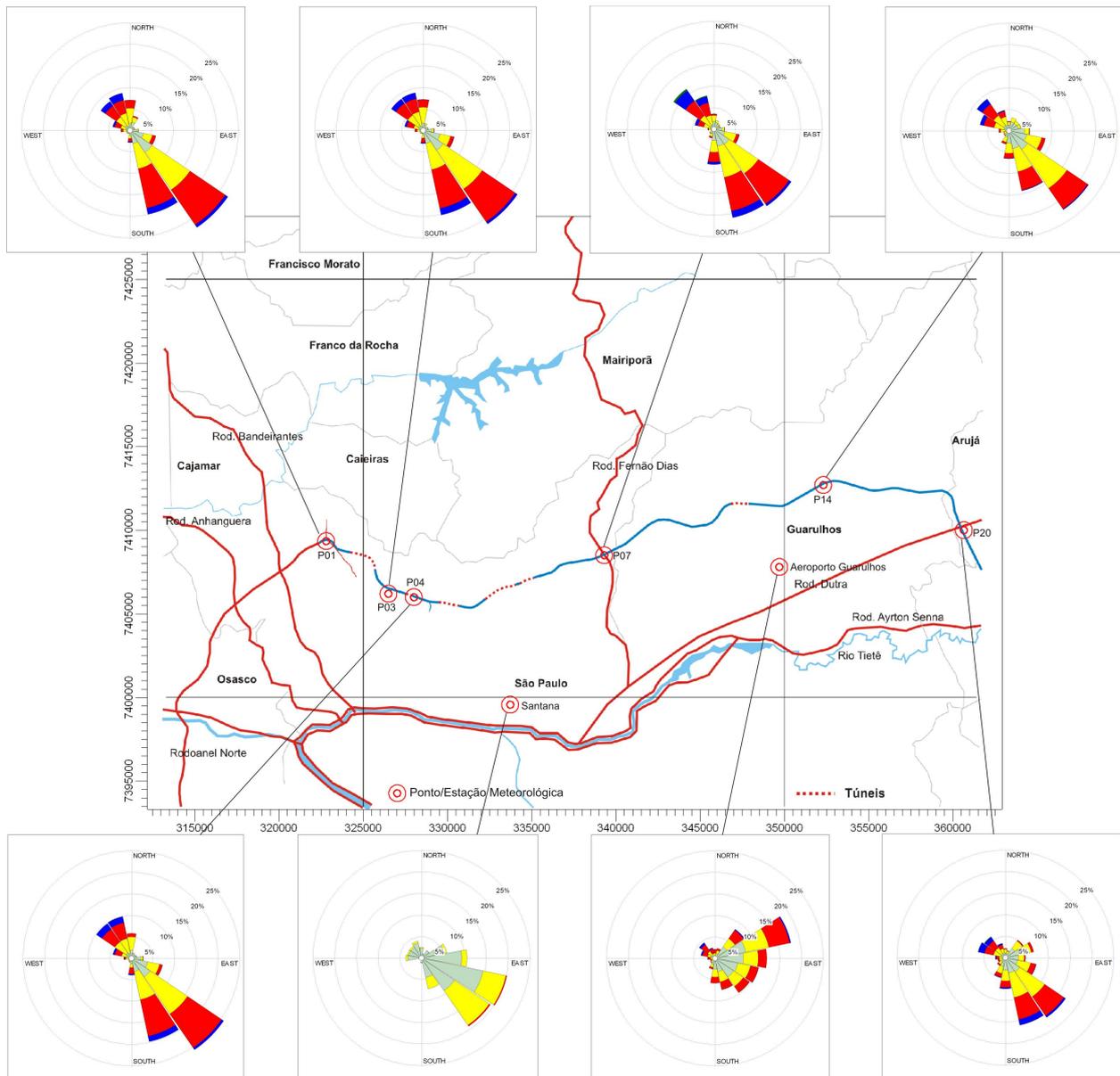
Em particular, a presença da Serra da Cantareira ao longo de todo o trecho Norte do Rodoanel pode influenciar significativamente as condições de dispersão de poluentes. Assim, de forma a avaliar a representatividade dos dados das estações meteorológicas presentes nas proximidades (Aeroporto de Cumbica e estação de monitoramento da CETESB - Santana) para este estudo, foram comparados os resultados das modelagens feitas com esses dados coletados e os simulados pelo modelo BRAMS em todo o trecho, os quais mostraram-se bastante compatíveis. Essa mesma metodologia foi anteriormente aplicada nos trechos Sul e Leste do Rodoanel, com resultados similares.

Estas estações foram escolhidas em função da disponibilidade de informações e também por estarem localizadas próximo aos extremos do trecho do Rodoanel em análise neste trabalho.

De forma a garantir que as simulações de dispersão de poluentes correspondam às situações mais críticas que possam ser encontradas quando da operação da via, o trabalho de modelagem foi duplicado, utilizando-se os dados reais e aqueles gerados pelo modelo BRAMS. Detalhamentos do modelo BRAMS, da metodologia utilizada para a modelagem e dos resultados simulados podem ser encontrados no Anexo – *Caracterização Meteorológica da Região Metropolitana de São Paulo: Análise Mensal e Condições de Dispersão Associada* – deste relatório.

Pode-se afirmar, desta forma, que dada a ausência de observações nas proximidades do trecho do Rodoanel em foco neste estudo, a utilização de séries fornecidas pelo modelo meteorológico BRAMS consiste em uma representação suficientemente realista das condições meteorológicas reinantes. Por outro lado, a pequena variabilidade encontrada entre os dados do BRAMS nos diferentes pontos simulados e a sua coerência com os dados reais permite supor que a extrapolação dos dados das duas estações consideradas para as proximidades da pista não introduz erros significativos na análise, justificando a utilização de ambas as bases de dados para a seleção das situações mais críticas.

No intuito de apresentar uma avaliação bastante objetiva dos resultados fornecidos pelo modelo meteorológico BRAMS, foram elaboradas as rosas dos ventos observadas e modeladas referentes às localidades modeladas, as quais são apresentadas na figura 1.



**Figura 1 – Localização e rosa dos ventos nos pontos modelados e nas estações meteorológicas utilizadas**

Adicionalmente, as contribuições de poluentes foram calculadas também através do modelo CALINE 4, especialmente para  $\text{NO}_2$ , devido à capacidade deste modelo em simular as reações fotoquímicas que ocorrem na atmosfera. Este modelo, diferentemente do CAL3QHCR, não considera os dados de meteorologia reais ou os simulados pelo BRAMS, de modo que essa modelagem foi efetuada

apenas com a situação mais crítica de estabilidade atmosférica (classe de estabilidade G e velocidade do vento de 1 m/s), cuja ocorrência é eventual e a persistência ao longo de vários dias é muito pouco provável. Este tipo de situação pode ocorrer em períodos de inverno, sob o domínio de um sistema de anticiclone, o qual desvia a entrada de frentes frias em direção ao oceano, principalmente durante as primeiras horas da manhã, não coincidindo com o pico de tráfego matinal, que tem seu ápice tipicamente às 08:00 h. Entretanto, como nessas condições atmosféricas não há a ocorrência de nuvens, o aquecimento diferencial de áreas com e sem vegetação e o próprio efeito de ilha de calor induz à geração de ventos, aumentando a dispersão e reduzindo as concentrações, de modo que os picos mencionados não persistem ao longo das 24 h. Os modelos de simulação das contribuições às concentrações atmosféricas de poluentes serão detalhados no próximo item.

#### **3.4. Modelos de dispersão atmosférica**

O entendimento de como e em quanto uma fonte de emissão de poluentes pode afetar a qualidade do ar de uma região é um desafio freqüente para os profissionais que trabalham com o tema. Estimar a magnitude dos impactos na qualidade do ar devido à emissão de poluentes é uma ciência que envolve uma série de incertezas e imprecisões, motivo pelo qual junto com o seu desenvolvimento é necessário todo um grupo de especialistas que possam fazer a interpretação correta dos resultados. Nos casos onde as fontes de poluição serão instaladas, ou quando as mesmas ainda não existem (como é o caso de fontes móveis em um projeto de rodovia), o modelo de dispersão é considerado pelas principais agências ambientais do mundo como a ferramenta mais adequada para se caracterizar, a relação entre as emissões dos poluentes primários e a qualidade do ar.

Os estudos pioneiros no campo da dispersão de poluentes atmosféricos regulamentados foram inicialmente desenvolvidos para as chamadas fontes pontuais, as chaminés de indústrias, depois destas para as fontes área, como as de

emissões de queimadas e, finalmente, para as fontes linha, caso das emissões geradas pelas fontes móveis, como as vias de trânsito intenso.

Para a modelagem da dispersão dos poluentes nos desemboques de túneis, considerou-se que, uma vez que os túneis não possuirão chaminés para a saída dos poluentes e que cada sentido da via é isolado em um túnel próprio, com ventilação forçada no sentido do fluxo tanto pelos ventiladores a serem instalados no seu interior quanto pelo efeito de êmbolo dos próprios veículos em movimento, pode-se assumir que todos os poluentes emitidos no interior de um túnel deverão sair pelo seu desemboque continuamente. Assim, optou-se por considerar o desemboque de cada túnel como sendo uma fonte fixa, cuja emissão de cada poluente é proporcional ao volume e composição da frota existente no seu interior, variando a cada hora.

A modelagem da concentração dos diversos poluentes nas imediações dos desemboques dos túneis, portanto, não poderia ser feita pelo modelo CALINE, de modo que o modelo utilizado foi o AERMOD-View, da Lakes, na sua versão 6.6.0, por ser um software já consagrado nacionalmente para a modelagem de fontes fixas.

Como parâmetros de modelagem, foram consideradas as emissões dos veículos nas saídas dos túneis (sentido de fluxo) como fontes-volumes de 100 metros de comprimento, conforme assumido pelo órgão ambiental de Hong Kong (Kowloon Development Office, Territory Development Department - Agreement No. CE32/99), principal referência legal encontrada na literatura internacional, a qual é tecnicamente compatível com trabalhos especializados feitos na área, como por exemplo o relatório “Air Quality Impact Assessment”, do Vic Park Tunnel Project, Auckland, New Zealand, elaborado em 2006.

Adicionalmente foram consideradas as emissões dos veículos nas entradas e saídas dos túneis como fontes linhas.

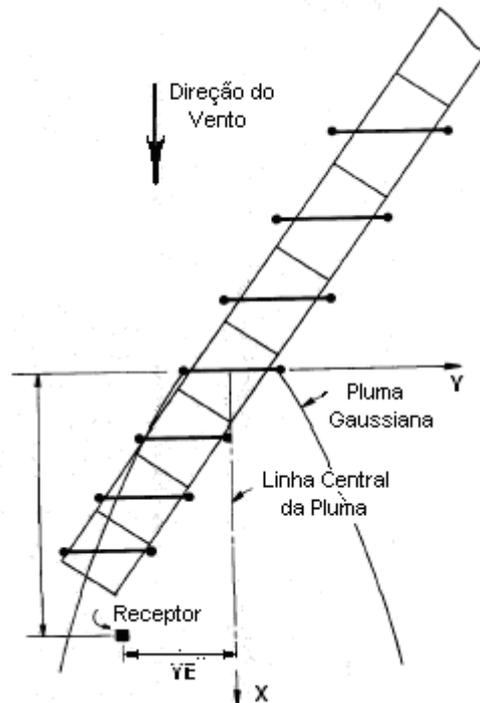
Os dados meteorológicos utilizados foram séries históricas de 2005 a 2009 do Aeroporto de Guarulhos e da estação da CETESB de Santana, e a topografia foi modelada com a opção de terreno complexo.

As contribuições de NO<sub>2</sub> foram determinadas utilizando o método PVMRM (Plume Volume Molar Ratio Method), que faz parte da opção de modelagem de NO<sub>x</sub> no AERMOD, consistindo na aplicação de algoritmos para conversão de NO<sub>x</sub> para NO<sub>2</sub>. Para simulação foram utilizados NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> – 0,90 (guideline), In-Stack NO<sub>2</sub>/NO<sub>x</sub> Ratio – 0,075 (referencia Hong Kong Environmental Protection Department) e Ozone Value – 42,7 ppb, conforme as médias das concentrações horárias máximas das estações de monitoramento da CETESB.

Para os trechos em que a via não é confinada por túneis, a modelagem foi baseada nas diretrizes desenvolvidas pela US-EPA (United States Environmental Protection Agency) para os estudos de dispersão de poluentes atmosféricos, apresentadas no 40 CFR (Code of Federal Regulations), Apêndice W da Parte 51, intitulado “Guidelines on Air Quality Models” (Diretrizes sobre Modelos de Qualidade do Ar), onde estão recomendados os modelos da série CALINE (California Line Source Dispersion Model) e CAL3QHCR, na Seção 3. Estes modelos utilizam os algoritmos similares aos dos modelos de dispersão gaussianos e o conceito de zona de mistura (largura da pista acrescida de área de turbulência ao lado da pista) onde há uma dispersão induzida pelo tráfego, como já observado em medições realizadas na Rodovia dos Imigrantes em 2001.

O modelo CALINE4 (versão atualizada do modelo CALINE3) divide a rodovia em pequenos trechos elementares, que são transformados em fontes emissoras, onde cada elemento é modelado como uma fonte linha finita equivalente e posicionada na direção normal em relação ao vento (“Discrete Parcel Method”). A dispersão a jusante deste elemento é gaussiana e a contribuição de cada trecho elementar na qualidade do ar de um receptor específico é somada com a dos outros elementos, obtendo-se o impacto total.

A Figura 2 mostra o esquema de trechos elementares e a estrutura de distâncias relativas do receptor em função da direção do vento e da rodovia.



**Figura 2 – Esquema de Trechos Elementares do CALINE4 e CAL3QHCR**

### **Zona de Mistura**

Os modelos CALINE4 e CAL3QHCR consideram a região imediatamente acima da rodovia como uma zona de emissão e turbulência uniformes, que denominamos zona de mistura. Esta é definida como a região acima do leito da via de tráfego, acrescida de 3 metros em cada lado da pista. A largura adicional é devida à dispersão horizontal inicial que é provocada pelos veículos em movimento. (figura 3)

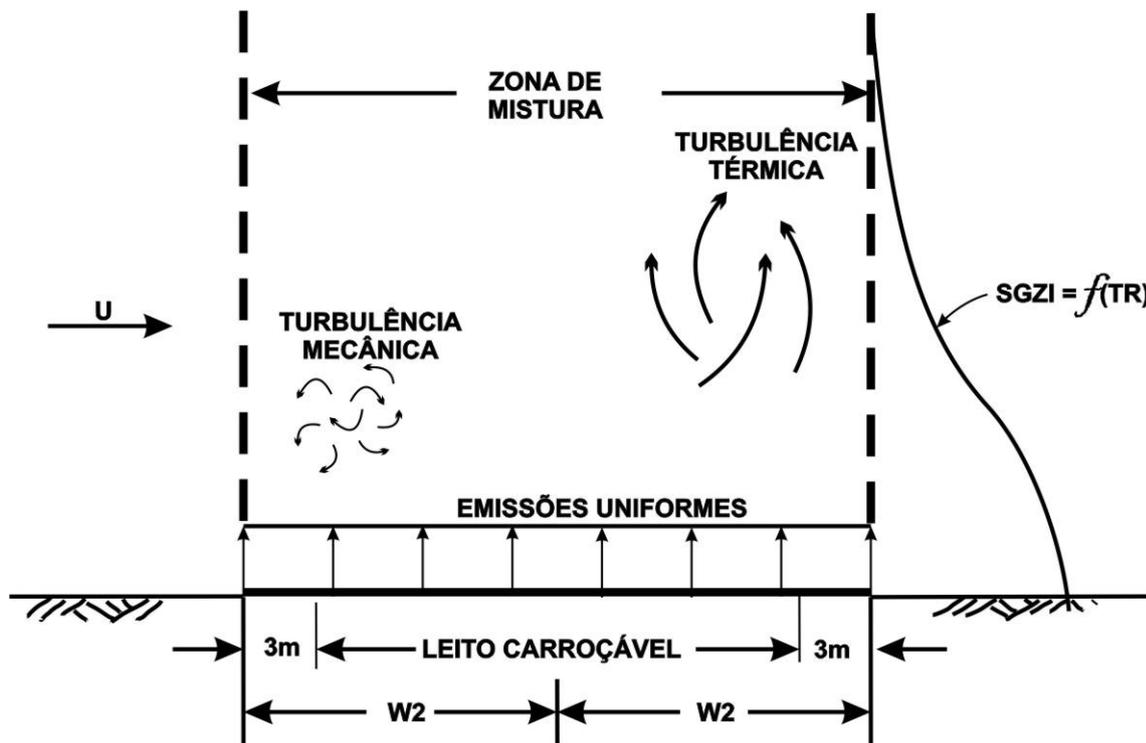


Figura 3 – Zona de Mistura

Na zona de mistura, a turbulência mecânica criada devido ao movimento de veículos e à turbulência térmica devido aos gases quentes de exaustão provenientes dos escapamentos dos veículos são assumidos como sendo os mecanismos de dispersão dominantes. Evidências indicam que isto é válido sempre, exceto para condições atmosféricas instáveis, situação que favorece a dispersão dos poluentes.

As emissões veiculares são lançadas para a atmosfera e rapidamente dispersas. A maior dispersão inicial ocorre através da turbulência gerada pela passagem de outros veículos. Esta condição de lançamento ativo de gases difere significativamente do lançamento passivo que é assumido pela metodologia padrão de dispersão gaussiana, que ocorre a partir dos limites da pista de rolamento. Para se ajustar a isso, o CALINE4 modela o parâmetro de dispersão vertical inicial (SGZI) como uma função do tempo de residência (TR) dos poluentes dentro da zona de mistura.

Vários estudos indicaram uma correlação entre a velocidade do vento e a dispersão vertical inicial e todos concluíram que quanto menor a velocidade do vento maior será a dispersão vertical inicial. O CALINE4 assume que quanto mais longa a permanência da parcela de ar na zona de mistura turbulenta, maior será a intensidade da dispersão vertical inicial que essa parcela será submetida. Assim, o tempo de residência pode ser diretamente definido em termos de velocidade média do vento.

### **Parâmetro de Dispersão Vertical, $\sigma_z$**

O CALINE4 utiliza uma versão modificada das curvas de dispersão de Pasquill-Smith (P-S), para descrever o parâmetro de dispersão vertical Gaussiano,  $\sigma_z$ , em pontos receptores a jusante da rodovia. Esta versão modificada inclui, entre outros, os efeitos térmicos da emissão veicular, cujas curvas são construídas utilizando parâmetros da dispersão vertical inicial (zona de mistura), SGZI (figura 3, acima) valores de  $\sigma_z$  a distâncias recomendadas por Pasquill.

### **Parâmetro de Dispersão Horizontal, $\sigma_y$**

O CALINE4 utiliza o método desenvolvido por Draxler para calcular os valores do parâmetro de dispersão horizontal Gaussiano,  $\sigma_y$ , que são fórmulas matemáticas complexas levando em conta parâmetros tais como, tempo de difusão dos gases, ângulo em radianos do vetor que representa o vento no eixo da componente horizontal, etc.

Após descrição sucinta dos principais parâmetros que norteiam a teoria de dispersão atmosférica e conhecendo as emissões médias da frota circulante, a meteorologia e a característica de ocupação do local, pode-se afirmar que o propósito destes modelos é estimar impactos na qualidade do ar no entorno de rodovias, cobrindo uma faixa de até 500 metros. Experiências têm demonstrado que

formas mais complexas são desnecessárias, pois as incertezas inerentes às magnitudes das emissões são maiores.

### **O modelo CALRoadsView da Lakes**

Os modelos de dispersão CALINE4 e CAL3QHCR fazem parte do software CALRoadsView da Lakes Environmental Software Inc..

O modelo CALINE4 é normalmente utilizado como “screening”, para determinar as condições e cenários “mais críticos” para dispersão de poluentes em análises preliminares. O modelo pode estimar as contribuições de monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), gases inertes e material particulado (MP) somente para períodos curtos (1 hora), não necessitando de dados meteorológicos de estações próximas e dados mais acurados.

O CALINE4 também pode simular as contribuições de dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>) utilizando as equações de equilíbrio de NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e O<sub>3</sub>, associadas ao método de “Discrete Parcel Methods”. Para tanto o modelo solicita as informações de concentrações iniciais de NO, NO<sub>2</sub>, e O<sub>3</sub> e taxa de conversão de NO<sub>2</sub>.

O CAL3QHCR é a versão refinada do modelo CAL3, que permite processar até um ano de dados meteorológicos reais e necessita de dados meteorológicos no formato do modelo ISC3 (USEPA). O modelo pode estimar as contribuições de monóxido de carbono (CO) para períodos de 1 e 8 horas, e material particulado (MP) para períodos de 24 horas e anual, enquanto que o CALINE4 apresenta apenas as situações pontuais estabelecidas por hipótese para “screening”. Na modelagem efetuada, a hipótese de “screening” considerada foi a de pior condição de dispersão, com classe de estabilidade G e ventos de 1 m/s, de ocorrência pouco freqüente na região e persistência improvável, principalmente sobre uma rodovia, onde o próprio tráfego induz à geração de ventos superficiais sobre a via, promovendo a dispersão e diluição dos poluentes.

No presente estudo, a determinação das contribuições das emissões veiculares na qualidade do ar nas áreas próximas das rodovias foi conduzida

utilizando-se o CALINE4 e o CAL3QHCR que fazem parte do software CALRoadsView. Os resultados desta modelagem encontram-se no Volume II.

Nas apresentações gráficas da modelagem, as curvas de isovalores indicam a formação de elipses de concentração mais alta ao longo de trechos homogêneos tanto em termos do fluxo de veículos quanto de topografia ou meteorologia. Esta é uma característica intrínseca ao modelo, que calcula a emissão para cada vetor que compõe o traçado da via em separado, dando a falsa impressão de que a concentração entre dois vetores vizinhos é menor que no centro de cada um. Tal distorção, entretanto, está ligada apenas à forma de apresentação, uma vez que os valores máximos, que devem ser considerados na avaliação do impacto da via, são corretamente calculados. As linhas de isovalores, na verdade, deveriam ser as envoltórias desses conjuntos de elipses, que assumiriam um comportamento paralelo aos trechos homogêneos da via.

#### **4. Discussão dos Resultados**

A avaliação dos cenários estudados indicou que, no geral, a situação para o ano 2014 é mais severa do que a prevista para 2024. Isto se deve à tendência de redução das emissões veiculares em geral, ditadas pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, as quais na grande maioria dos casos compensam, com vantagem, o crescimento esperado do tráfego.

Apenas pontualmente, devido a variações na composição da frota (relação entre veículos de passeio e comerciais) as concentrações de CO e HC sobre a pista estimadas para o ano de 2014 foram pouco inferiores às estimadas para 2024, mas sempre em valores muito baixos, não representando nenhum problema ou tendência significativa a crescimentos futuros, pois o perfil da frota em 2024 já deverá ter se estabilizado.

Os resultados encontrados para o ano de 2014, detalhados nos anexos, indicaram ultrapassagens dos padrões para NO<sub>2</sub> e, no trecho 6, também para material particulado, conforme mostra a tabela a seguir onde são apresentados os

máximos valores calculados para cada trecho pela condição mais crítica de modelagem.

**Tabela 5 - Valores máximos de concentração calculados para 2014 sobre a pista\*\***

Poluente	PQAR*	Concentração - trechos					
		1	2	3	4	5	6
CO – 1 hora (ppm)	34,9	3,6	2,8	2,8	5,0	1,8	6,8
CO – 8 horas (ppm)	8,7	1,3	1,2	1,2	2,1	0,5	3,4
NO <sub>2</sub> – 1 hora (ppm)	0,17	0,35	0,22	0,23	0,32	0,27	0,41
MP – 24 horas (µg/m <sup>3</sup> )	150	47,5	43,6	51,7	84,1	18,9	104,4
MP – média anual (µg/m <sup>3</sup> )	50	26,9	28,6	30,2	34,5	8,7	57,3
SO <sub>2</sub> – 24 horas (µg/m <sup>3</sup> )	365	41,9	38,4	45,6	76,6	17,6	96,2
SO <sub>2</sub> – média anual (µg/m <sup>3</sup> )	80	23,7	25,2	26,7	31,5	8,84	52,8
HC – 1 hora (ppm-hexano)	-	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	0,5

(\*) PQAR – Padrão de Qualidade do Ar

(\*\*) Pista= faixas de rolamento + 3 metros de cada lado (zona de mistura)

É importante ressaltar que o único local onde a modelagem indica o aparecimento de HC é no cruzamento do Rodoanel com a Via Dutra. Como não há padrão de qualidade do ar para HC, observa-se que as concentrações previstas são inferiores às 2<sup>as</sup> máximas anuais medidas no Parque D.Pedro II no período de 1996 a 2004, na cidade do São Paulo, que é um local urbano típico da influência do tráfego intenso de veículos.

Tais ultrapassagens, entretanto, ocorrem sempre dentro da área de domínio da via, onde as pessoas expostas (usuários da via) não permanecem por mais de

alguns segundos no local, não representando problemas em relação à saúde da população lindeira, como pode ser verificado nos anexos III e IV.

Na modelagem feita para o ano de 2024 os valores máximos encontrados são inferiores aos da modelagem de 2014 em quase todos os casos. Para 2024 já não ocorrem violações do padrão de material particulado e as ultrapassagens do padrão para NO<sub>2</sub> são menos significativas e sempre restritas à área de domínio da via (tabela 6).

**Tabela 6 - Valores máximos de concentração calculados para 2024 sobre a pista\*\***

Poluente	PQAR*	Concentração - trechos					
		1	2	3	4	5	6
CO – 1 hora (ppm)	34,9	2,8	2,5	2,5	3,6	1,9	4,7
CO – 8 horas (ppm)	8,7	1,26	1,12	1,19	1,5	0,64	2,37
NO <sub>2</sub> – 1 hora (ppm)	0,17	0,29	0,18	0,19	0,23	0,23	0,28
MP – 24 horas (µg/m <sup>3</sup> )	150	26,3	24,1	28,7	34	11,8	39,9
MP – média anual (µg/m <sup>3</sup> )	50	14	15,8	16,8	13,9	6	21,9
SO <sub>2</sub> – 24 horas (µg/m <sup>3</sup> )	365	12,2	11,1	13,4	16,9	6,2	21,3
SO <sub>2</sub> – média anual (µg/m <sup>3</sup> )	80	6,5	7,3	7,8	6,9	3,2	11,7
HC – 1 hora (ppm-hexano)	-	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,4

(\*) PQAR – Padrão de Qualidade do Ar

(\*\*) Pista= faixas de rolamento + 3 metros de cada lado (zona de mistura)

Como mencionado anteriormente, a modelagem de NO<sub>2</sub> foi feita apenas com o modelo CALINE4, para as condições mais críticas de estabilidade atmosférica (classe de estabilidade G e velocidade do vento de 1 m/s), por ser o modelo que

considera as reações fotoquímicas. Estas previsões não ocorrem durante todo o ano e são, portanto, ocorrências eventuais, dificilmente reincidentes por vários dias e que, mesmo quando reincidem, ocorrem apenas durante o início da manhã (5:00 h às 6:00 h), desfazendo-se após algumas horas. Particularmente, em se tratando de uma rodovia, essa alta estabilidade não ocorre conjuntamente com um alto fluxo de veículos, pois o próprio tráfego induz à geração de ventos superficiais sobre a via e o aquecimento do ar pelos motores induz a circulação vertical, sempre promovendo a dispersão e diluição dos poluentes gerados pelo tráfego de veículos.

Considerando que as ultrapassagens previstas decorrem da aplicação de modelos matemáticos que consideram a coincidência de situações extremas (worst case), que são muito pouco prováveis, recomenda-se a realização de campanhas de monitoramento após o início de operação para verificar estas hipóteses.

No tocante à possibilidade de degradação da vegetação na região de reserva natural da Serra da Cantareira próxima à rodovia, o principal poluente a ser considerado é o dióxido de enxofre, cujas concentrações devem ser comparadas com o padrão secundário de qualidade do ar, mais restritivo que o primário, apresentado na tabela. No caso deste poluente, os padrões secundários correspondem à concentração média de 24 horas de  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e à concentração média aritmética anual de  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pode-se verificar na tabela acima que apenas no trecho 6 o padrão secundário para média anual é ultrapassado sobre a pista, mas este trecho compreende o entroncamento com a Rodovia Presidente Dutra, situada em área urbanizada, de forma que se pode afirmar que as emissões provenientes do Rodoanel não representam risco direto à vegetação da Reserva.

## 5. Monitoramento de qualidade do ar

Em função dos resultados da modelagem, recomenda-se a realização de monitoramento da qualidade do ar após o início de operação da via para confirmação destas previsões, o qual poderá ser desenvolvido em três etapas, a saber:

- Campanhas de monitoramento móvel de material particulado, com equipamentos portáteis ao longo de todo o Rodoanel, para confirmar as previsões deste estudo, inclusive as localizações dos pontos que apresentem maior concentração dos poluentes oriundos de veículos pesados (MP e NO<sub>x</sub>);
- Com base nos resultados deste estudo e das campanhas de monitoramento móvel, caso venha a se mostrar necessário, determinar os melhores locais para a instalação de uma estação de monitoramento fixa para avaliação contínua da qualidade do ar, considerando os poluentes NO<sub>x</sub> e MP, pelo menos;
- Após a instalação da estação fixa, proceder ao acompanhamento das suas medições, associado a novas campanhas de monitoramento móvel, que servirão de referência para a avaliação de toda a via.

## 6. Conclusões e recomendações

A metodologia de análise definida pela CETESB se mostrou apropriada para a análise requerida, com resultados coerentes entre si e com experiências e medições realizadas em diversas vias de tráfego brasileiras.

A análise dos pontos mais críticos para previsões de cenários em épocas diferentes também indica que a tendência futura é de redução do impacto inicial, como resultado da atualização tecnológica da frota brasileira de veículos promovida pelo Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE.

Constatou-se que o CO e o HC são os únicos poluentes que podem, pontualmente, apresentar aumento das concentrações com o crescimento esperado do tráfego e alteração da relação entre veículos leves e pesados no período de 2014 a 2024. Tais aumentos, entretanto, não devem representar uma tendência de crescimento futuro, posto que a proporção de veículos leves e pesados tende a se estabilizar e com a redução esperada dos fatores de emissão devida à renovação da frota, a tendência futura segue sendo decrescente.

Dentre os trechos estudados, que representam todo o Trecho Norte do Rodoanel, verificou-se que as concentrações de dióxido de nitrogênio ultrapassam o PQAr, em eventos esporádicos de curta persistência, sempre dentro dos limites da faixa de domínio da rodovia, onde a população exposta não permanece por tempo prolongado. Outra ultrapassagem observada foi a de material particulado, mas apenas no cruzamento com a Rodovia Presidente Dutra, ultrapassagem esta também restrita à faixa de domínio das rodovias. O fato de o NO<sub>2</sub> despontar como o principal poluente, seguido do MP, indica que os veículos pesados a diesel são a principal fonte de emissão atmosférica do Rodoanel, o que confirma a necessidade de intensificação do controle de emissão, principalmente de NO<sub>x</sub>, nesta classe de veículos.

A preocupação do estudo é focada principalmente nos efeitos dos poluentes emitidos sobre as populações e áreas vegetadas lindeiras à rodovia. Nesse sentido, pode-se afirmar que as violações de padrão constatadas de NO<sub>x</sub> não representam qualquer risco, pois as concentrações caem muito rapidamente com a distância da via, de forma que nas áreas vizinhas à faixa de domínio já não deverão ocorrer ultrapassagens do padrão.

Por outro lado, o NO<sub>x</sub> é um dos elementos precursores de ozônio, cuja concentração pode potencialmente provocar problemas respiratórios e danos à vegetação. Entretanto, a formação de ozônio na atmosfera é um fenômeno regional, para o qual contribui a emissão de NO<sub>x</sub> e de hidrocarbonetos de toda a região em questão, no caso, a RMSP. Neste caso, deve-se considerar que a emissão pela qual o Rodoanel é responsável é desprezível frente às emissões de toda a RMSP. Mais importante que isso, é o fato de que o veículo que utilizar uma via alternativa ao Rodoanel estará transitando com velocidade inadequada (pela Marginal Tietê, por exemplo) e, portanto, emitindo uma quantidade significativamente maior de NO<sub>x</sub> em outras vias e contribuindo mais para o efeito regional de formação de ozônio.

Foi verificado, ainda, que a geração de poluentes devida à operação do Rodoanel não deverá ter influência significativa sobre a vegetação natural da Serra da Cantareira.

Portanto, recomenda-se que a construção do Trecho Norte do Rodoanel seja aprovada pelos órgãos ambientais, de acordo com as características propostas, as quais se mostraram adequadas de acordo com a modelagem em geral. No entanto, deve ser prevista uma campanha de monitoramento da qualidade do ar após o início da operação, segundo a metodologia discutida e proposta em estudos anteriores relativos aos Trechos Sul e Leste, para confirmar as previsões obtidas neste estudo.

Complementarmente, recomenda-se a implantação de programas de gestão operacional que visem a fluidez do tráfego e a regulação periódica adequada dos motores, ambas resultantes em redução da emissão de poluentes e em economia de combustível.

## BIBLIOGRAFIA

1. Walko, R. L., Tremback, C. J., Panetta, J., Freitas, S. R., Fazenda, A. L., Freitas, E. D., Enari, E. BRAMS version 4.0. Model input namelist parameters. Março 2007. Disponível on line em [www.cptec.inpe.br/brams](http://www.cptec.inpe.br/brams)
2. Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality); Gatti, L.V. (IPEN); Artaxo Neto, P.E. (Instituto de Física USP); Murgel, E.; Martins, A. (Ecovias) - Impacto do Sistema Anchieta-Imigrantes sobre a Qualidade do Ar e modelagem estatística para a intervenção e gerenciamento de sua operação – Congresso ABCR – Gramado - RS - novembro/2003.
3. Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality) – “Inventário de Fontes Móveis: análise prospectiva e retrospectiva dos benefícios do PROCONVE para a qualidade do ar desde 1980 a 2030” – São Paulo, 2007, relatório e anexos entregues ao Ministério do Meio Ambiente em março de 2007 – no prelo.
4. Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality) - Estimativa dos Fatores de Emissão de Veículos Pesados a partir dos Dados de seus Motores e do Consumo de Combustível – Anexo do Relatório de análise do impacto do rodoanel - trecho sul sobre a qualidade do ar – 2007.
5. Branco, G. M. e Branco, F. C. (EnvironMentality); Szwarc, A. (ADS) - Verificação da Eficiência de Sistemas Retrofit Johnson-Matthey em Ônibus Urbanos – Relatório apresentado à CETESB e EMTU em Abril de 2007
6. USEPA - Compilation of Emission Factors AP-42; <http://www.epa.gov/otaq/ap42.htm>, 2006.
7. Murgel, E. et alii - Relatório de análise do impacto do rodoanel - trecho sul sobre a qualidade do ar – 2007
8. Branco, G.M. e Branco F.C. - Medições de Qualidade do Ar no Rodoanel – Relatório para a DERSA – 2007