

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL

ESTUDO DE DISPERSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS DE UMA USINA TERMELÉTRICA COM O USO
DO MODELO AERMOD

TIAGO RAIMUNDO MUNHOZ

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental–TCC II

Prof. Dr. HENRIQUE DE MELO LISBOA
(Orientador)

Mst. LEONARDO HOINASKI
(Co-orientador)

FLORIANÓPOLIS, (SC)
FEVEREIRO/2013

TIAGO RAIMUNDO MUNHOZ

ESTUDO DE DISPERSÃO DE POLUENTES
ATMOSFÉRICOS DE UMA USINA TERMELÉTRICA COM O USO
DO MODELO AERMOD

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos
requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental–TCC II

Prof. Dr. HENRIQUE DE MELO LISBOA
(Orientador)

Mst. LEONARDO HOINASKI
(Co-orientador)

Prof. Dr. REINALDO HAAS
(Banca Examinadora)

Prof. Dr. PAULO BELLI FILHO
(Banca Examinadora)

FLORIANÓPOLIS-SC
2013

AGRADECIMENTOS

Ao Professor e orientador Henrique de Melo Lisboa e ao co-orientador Leonardo Hoinaski por toda a ajuda prestada, conselhos e conhecimento transmitido, sem os quais esse trabalho não seria possível.

A todos os professores que se empenharam em transmitir conhecimento nesses anos todos, em especial ao Professor Genaldo L. Nunes.

Ao meu pai (*in memoriam*) e minha mãe, que sempre me apoiaram e me permitiram estudar em uma das melhores universidades do país, bem como meus irmãos pelo exemplo a seguir.

Ao chefe Edney Rodrigues de Farias pela sugestão do tema e por todo o apoio e estrutura fornecidas para a elaboração deste trabalho, assim como pela oportunidade de estágio que acabou se tornando um marco fundamental da minha formação acadêmica.

Aos colegas Júlia Costa e Davi de Souza Schweitzer por me mostrarem o que é ser profissional, pelo conhecimento repassado ao longo dos dois anos de estágio, e pela confiança depositada em mim.

Ao parceiro André Escobar pela confiança depositada e auxílio na elaboração do modelo.

Aos amigos que estiveram sempre presentes, em especial ao Marcio Massanori Ishii e Felipe Domingues Petermann pela parceria, risadas e paciência.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	3
2.	JUSTIFICATIVA	5
3.	OBJETIVO.....	7
	OBJETIVO GERAL:	7
	OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	7
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1.	USINAS TERMOELÉTRICAS.....	9
4.1.1.	<i>Principais Poluentes</i>	<i>9</i>
4.1.2.	<i>Taxas de emissões</i>	<i>10</i>
4.2.	LEGISLAÇÃO	11
4.3.	MODELAGEM ATMOSFÉRICA	15
4.3.1.	<i>Tipos de modelos.....</i>	<i>15</i>
4.3.2.	<i>A equação Gaussiana.....</i>	<i>16</i>
4.4.	AERMOD.....	20
4.4.1.	<i>Tratamento do escoamento da pluma em função do terreno</i>	<i>22</i>
4.4.2.	<i>Caracterização da camada limite planetária</i>	<i>24</i>
4.4.3.	<i>Perfis verticais calculados</i>	<i>25</i>
4.4.4.	<i>Efeito Downwash</i>	<i>27</i>
5.	MATERIAIS E MÉTODO	29
5.1.	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL	29
5.2.	COLETA DOS DADOS.....	30
5.2.1.	<i>Dados meteorológicos.....</i>	<i>30</i>
5.2.2.	<i>Dados de terreno.....</i>	<i>36</i>
5.2.3.	<i>Dados da fonte</i>	<i>37</i>
5.3.	PREPARAÇÃO DO MODELO	38
5.3.1.	<i>Dados meteorológicos.....</i>	<i>38</i>
5.3.2.	<i>Dados da fonte e cenários de modelagem.....</i>	<i>38</i>
5.3.3.	<i>Dados de saída</i>	<i>40</i>
6.	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	43
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	73
8.	REF. BIBLIOGRÁFICAS	75

1. Introdução

Segundo Martins (2008) há indícios obtidos, através de registros arqueológicos, de que a poluição atmosférica foi uma constante na vida do homem, com efeitos adversos à sua saúde desde a época medieval. Ela pode estar presente em diversas formas, seja por gases tóxicos, material particulado, odores desagradáveis, ou até mesmo na forma de poluição sonora.

Dentre os desafios enfrentados pelos pesquisadores contemporâneos está quantificar e mensurar os poluentes atmosféricos, para que se possa agir nas fontes, com vistas a minimizar o problema. Deste modo, melhora-se assim a qualidade de vida, não apenas do homem, mas de todas as formas de vida afetadas pela poluição.

Com o passar do tempo e o avanço do conhecimento, pesquisadores começaram a propor teorias e equações que simulassem os fenômenos naturais. No tocante da poluição atmosférica, a quantidade de variáveis envolvidas foi sempre um entrave à simulação matemática dos fenômenos. O advento da computação tornou possível o desenvolvimento de modelos mais robustos, com cada vez mais variáveis envolvidas para a realização dos inúmeros cálculos necessários para descrever de maneira razoável os efeitos da atmosfera sobre as emissões antropogênicas ou naturais (JACOBSON, 2005).

Em se tratando de poluentes atmosféricos, as usinas termoeletricas que operam a partir da queima de combustíveis para geração de energia elétrica são consideradas potenciais poluidoras, responsáveis por emissões significativas de poluição na atmosfera. Para avaliar a veracidade de tais considerações e investigar os verdadeiros impactos ambientais causados por tais fontes, faz-se necessária a modelagem atmosférica.

Atualmente, a modelagem da dispersão de poluentes na atmosfera é de grande importância para questões ligadas ao licenciamento ambiental de empreendimentos potencialmente poluidores. Por meio dela, pode-se gerar uma estimativa da concentração dos poluentes, com uma metodologia padronizada e adaptada para diversos casos, embasando estudos ambientais, auxiliando a proposição de medidas de controle da poluição atmosférica ou até mesmo corroborando decisões de não implantação do empreendimento.

O presente estudo é um Trabalho de Conclusão de Curso da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), curso de Engenharia Sanitária e Ambiental. Ele visa aplicar o modelo AERMOD,

desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (EPA), para investigar os impactos locais causados pelas emissões de material particulado (MP) e NOx (óxidos de nitrogênio) gerados em uma usina termoeétrica (UTE).

A UTE em questão é propriedade da Guaçu Geração de Energia S.A., e encontra-se em estágio final de implantação no município de Aripuanã, no noroeste do Estado de Mato Grosso. Esta usina utilizará como fonte de combustível o cavaco de madeira (biomassa), a ser reaproveitado dos resíduos das madeireiras locais.

As emissões de usinas termoeétricas variam consideravelmente, conforme o tipo de combustível utilizado e tecnologia de queima (GODOY, 2001). Como já citado, a caldeira da termoeétrica do presente estudo prevê queima de cavacos de lenha, portanto, dar-se-á enfoque nas especificidades desse combustível nos tópicos subsequentes.

A queima dos combustíveis necessários para atingir a potência instalada, estimada de 30 MW, é claramente um potencial poluidor para a região. Observa-se que, no âmbito da dispersão atmosférica, a usina encontra-se relativamente próxima da área urbana do município Aripuanã (cerca de 2,0 km), justificando assim o presente estudo.

2. Justificativa

Atualmente, muito se tem falado a respeito da diversificação da matriz energética no Brasil. Tal discussão é acalorada, devido à multidisciplinaridade intrínseca ao tema. Não se pode deixar de analisar a relação entre impactos ambientais, custo de produção e demanda energética do país, a médio e longo prazos. Porém, é consenso que há necessidade de implantação de uma maior diversidade de fontes renováveis no âmbito nacional (EPE, 2011). Devido ao custo proibitivo das células fotovoltaicas, aliado às restrições práticas da energia eólica no cenário atual, a geração através de centrais termelétricas movidas a biocombustível é indiscutivelmente uma opção interessante, por apresentar um custo de implantação reduzido em relação a outras formas de geração de energia elétrica.

Usinas termelétricas são consideradas potenciais fontes poluidoras, o que justifica a necessidade de um rígido controle das emissões dos poluentes durante a sua operação. O controle das emissões é feito através de robustos equipamentos, tais como filtros de mangas, lavadores de gases, dentre outros. Estes têm por finalidade a remoção dos poluentes presentes, de forma que a emissão final enquadre-se nos padrões estabelecidos pela legislação vigente.

Em paralelo ao controle deve ser realizado o monitoramento das emissões na chaminé e da qualidade do ar na região. O monitoramento da qualidade do ar é feito aferindo-se, em determinados pontos próximos às indústrias, a concentração de poluentes presentes durante a operação da mesma. Entretanto, sem saber ao certo qual o local e condições mais críticas no que diz respeito à poluição atmosférica, o monitoramento perde representatividade.

Com o uso de modelos matemáticos, é possível prever quais serão os locais mais afetados pela poluição atmosférica e até mesmo a provável concentração dos poluentes no entorno de um empreendimento poluidor antes da sua instalação, com relativa precisão (determinação do impacto ambiental). Pode-se, deste modo, auxiliar na determinação da localização mais favorável para a instalação dos equipamentos de monitoramento e da própria indústria ou potencial poluidor.

Entre as vantagens de se utilizar a modelagem de dispersão dos poluentes na atmosfera pode-se citar (MENEZES, 2006):

- Estimativas de concentrações de poluentes para condições extremas;

- Campos de concentração em toda a grade do estudo, enquanto o custo do monitoramento em tantos pontos tornaria o mesmo inviável;
- Simulação de diferentes cenários, tanto meteorológicos quanto de emissão.

Modelos de dispersão atmosférica, tais como AERMOD e CALPUFF são amplamente utilizados, justamente em estudos de impacto ambiental, como metodologia para mensurar os impactos causados por uma possível fonte de poluição atmosférica que venha a instalar-se em determinada região.

3. Objetivo

Objetivo Geral:

Este trabalho tem como objetivo geral aplicar o modelo AERMOD para o cálculo da dispersão dos poluentes atmosféricos emitidos pela termoeletrica Guaçu.

Objetivos Específicos:

Dentre os objetivos específicos do trabalho, citam-se os principais:

- Gerar campos de concentração de material particulado (MP₁₀) e óxidos de nitrogênio (NO_x) por serem os principais poluentes, em potencial, do empreendimento e verificar eventos críticos;
- Comparar os dados simulados de qualidade do ar ambiente com os padrões de qualidade do ar, segundo a legislação vigente (CONAMA 003/90);
- Verificar a exposição da população à poluição emitida pela usina.

4. Revisão Bibliográfica

4.1. Usinas termoeletricas

Godoy (2001) faz uma breve descrição do funcionamento de uma usina termoeletrica a carvão. Embora a usina estudada no presente trabalho utilize como combustível a biomassa, o processo é análogo.

Em resumo, o combustível é misturado com ar para a combustão em uma fornalha de forma que o calor gerado pela reação seja transferido para a água armazenada em um “gerador de vapor”. O vapor ali gerado vai para um superaquecedor onde irá alcançar altas temperaturas e pressões. Isto possibilitará a expansão nas turbinas e, conseqüentemente, impelir o gerador elétrico.

No ano de 2001, o Brasil enfrentou um período de racionamento de energia elétrica, em função de uma estiagem prolongada que esgotou os reservatórios das usinas hidrelétricas (UHE) do país. A partir de então, o governo brasileiro optou por diversificar a matriz energética nacional com vistas a reduzir a dependência do país da energia hidráulica, aumentando assim a confiabilidade do sistema. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), atualmente os recursos hídricos são responsáveis por cerca de 75% da geração de energia elétrica no país (2008). Entretanto, para os próximos 10 anos está prevista a ampliação do fornecimento de energia oriunda de usinas termoeletricas, tendo como meta dobrar a participação da mesma, que hoje é de cerca de 5%.

4.1.1. Principais Poluentes

De acordo com EPA (2003), a queima de madeira em caldeiras tem como principal poluente o Material Particulado (MP_{10}). Tais emissões dependem, principalmente, da composição do combustível e condições de queima. Em quantidades menos significativas, óxidos de nitrogênio (NO_x) podem ser emitidos. Entretanto, é importante o monitoramento de tais emissões, pois as mesmas podem agravar o fenômeno de chuva ácida (WALLACE, 2006), além de deteriorar a qualidade do ar e, possivelmente, afetar a saúde das pessoas que residem no entorno de tais fontes.

Gases do efeito estufa são emitidos em toda queima, independentemente do combustível ou processo. Cerca de 99% do carbono existente no combustível é convertido para CO₂. Outros gases como NO₂, CH₄ e CO podem vir a ser formados, em maior ou menor quantidade, dependendo do processo de combustão. Contudo, um bom controle dos parâmetros de combustão (temperatura de queima, excesso de ar e etc.) pode minimizar a formação desses poluentes (EPA, 2003).

4.1.2. Taxas de emissões

Nogueira (2003) afirma que, embora as características das emissões atmosféricas variem consideravelmente em função do método de combustão e composição do combustível, a utilização de lenha apresenta vantagens, em relação ao carvão mineral e outros resíduos agrícolas, pelo baixo índice de emissão de SO_x. A Tabela 1 apresenta os fatores de emissão estimados para a combustão da lenha.

Tabela 1 - Fatores de emissão para combustão de lenha em caldeira industrial.

Fatores de emissão (g/kg de combustível seco)	CH ₄	PTS	SO _x	NO _x
Lenha em caldeira industrial	10,15	13,01	0,37	2,8
Carvão em caldeira industrial (EPA, 2003)	-	2,0 ¹	66,3 ²	4,5

Fonte: BATTACHARYA (2000) *apud* NOGUEIRA (2003).

EPA (2003) apresenta um inventário de fatores de emissão para diversos tipos de fontes poluidoras. Os fatores são apresentados em libras de poluentes por milhão de Btu³ de calor inserido. A madeira é dita seca quando possui menos de 20% de umidade em massa, do

¹ Valor para carvão com teor de cinzas de 5%

² Valor para carvão com teor de enxofre de 3,4%

³ British Thermal Unit (ou Unidade térmica Britânica) é uma unidade de medida não-métrica (Não pertencente ao SI) utilizada principalmente nos Estados Unidos, mas também utilizada no Reino Unido. É uma unidade de energia que é equivalente a: 252,2 calorias ou 1 055,05585 joules. A quantidade de 1 Btu é definida como a quantidade de energia

contrário é considerada úmida. A seguir, são apresentadas tabelas com os fatores de emissão para a combustão da madeira.

Tabela 2 - Fatores de emissão de material particulado da combustão da madeira.

Combustível	Dispositivo de controle	Fator de emissão (g/kg ⁴)
Madeira seca	Sem controle	3,84
Madeira úmida	Sem controle	3,16
Madeira seca	Coletor mecânico ⁵	2,88
Madeira úmida	Coletor mecânico	2,11

Fonte: EPA, 2003.

Tabela 3 - Fatores de emissão de NO_x, SO₂ e CO para combustão de madeira.

Combustível	NO _x	SO ₂	CO
	Fator de emissão (g/kg)	Fator de emissão (g/kg)	Fator de emissão (g/kg)
Madeira úmida	2,11	0,37	5,76
Madeira seca	4,70	0,37	5,76

Fonte: EPA, 2003.

4.2. Legislação

Na década de 1970 o órgão de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA) estabeleceu os padrões nacionais de qualidade do ar (NAAQS, da sigla, em inglês) para diversos tipos de poluentes (PEPPER, 2006). Os padrões foram definidos com base em critérios científicos, visando à preservação da saúde e bem estar do homem.

Primeiramente, o método de medição baseava-se na concentração de partículas em suspensão totais de 25 a 45 µm. Entretanto,

⁴ Unidade de emissão do poluente em massa, por quantidade de combustível queimado, em massa.

⁵ Coletores mecânicos incluem ciclones e multiciclones

posteriormente (em 1987) alterou-se o critério para concentração de material particulado com diâmetro médio igual ou inferior a 10 μm (PM_{10}). Tal alteração é um dos principais alicerces dos novos padrões, visto que tais partículas são capazes de penetrar profundamente no trato respiratório, incluindo alvéolos pulmonares, podendo assim causar agravos sérios à saúde.

A legislação brasileira, relativa à qualidade do ar externo, fundamenta-se principalmente na Resolução Conama nº 003/1990. Tal resolução assemelha-se em estrutura e padrões ao que foi definido pelo EPA na década de 70, incluindo os conceitos de padrões primários e secundários de qualidade do ar.

Padrões primários podem ser entendidos como o limite de poluição permitido para evitar agravos sérios, como comprometimento da saúde da população. Os padrões secundários, mais restritivos, devem ser vistos como metas a serem alcançadas para que o efeito resultante da poluição seja mínimo.

Dentre os poluentes relevantes para o estudo em questão (ver item 4.1.1), os níveis primários e secundários, de acordo com a legislação supracitada estão expostos na Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 - Concentrações máximas permitidas pela resolução CONAMA 003/90

Poluente	Padrão Primário ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de ar)		Padrão Secundário ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ de ar)	
Partículas totais em suspensão	80	Anual	60	Anual
	240	24h	150	24h
Fumaça	60	Anual	40	Anual
	150	24h	100	24h
Partículas inaláveis	50	Anual	50	Anual
	150	24h	150	24h
CO	10000	8h	10000	8h
	40000	1h	40000	1h
NO ₂	100	Anual	100	Anual
	320	24h	190	24h
SO ₂	80	Anual	40	Anual
	365	24h	100	24h

Embora seja baseada na normativa americana, a legislação brasileira encontra-se defasada por não fazer menção às partículas com diâmetro médio inferior a 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Tais partículas são responsáveis por uma série de agravos à saúde por penetrarem profundamente nos pulmões e, por vezes, alcançar a corrente sanguínea. As Tabelas 5 e 6, a seguir, apresentam as concentrações máximas de alguns poluentes atmosféricos na União Europeia e nos Estados Unidos da América, respectivamente.

Tabela 5 - Concentrações máximas permitidas pela legislação europeia (EU, 2008).

Poluente	Concentração		Período de amostragem	Tolerância ⁶
$\text{PM}_{2,5}$	25	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1h	n/a
SO_2	350	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1h	24
	125	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	24h	3
NO_2	200	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1h	18
	40	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	n/a
PM_{10}	50	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	24h	35
	40	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	Anual	n/a
CO	10000	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	8h	n/a

⁶ Número de vezes que a concentração estabelecida pode ser ultrapassada no período de um ano.

Tabela 6 - Concentrações máximas permitidas pela legislação norte americana (EPA, 2011).

Poluente	Primário/Secundário	Período de amostragem	Concentração	
CO	primário	8h	9	ppm
		1h	35	ppm
NO ₂	primário	1h	100	ppb
	primário e secundário	anual	53	ppb
PM _{2,5}	primário e secundário	anual	15	µg/m ³
		24h	35	µg/m ³
PM ₁₀	primário e secundário	24h	150	µg/m ³
SO ₂	primário	1h	75	ppb
	secundário	3h	0.5	ppm

Percebe-se que, mesmo não fazendo distinção entre padrão primário e secundário, a legislação europeia é mais restritiva que a brasileira. Porém o maior avanço realmente é a adoção de limites para o parâmetro PM_{2,5}.

A Resolução 382/06 do Conama define, em seu Anexo IV, os limites de emissão para poluentes atmosféricos, provenientes de processos de geração de calor a partir da combustão externa de derivados de madeira, em função da sua potência térmica nominal (PTN). Tais limites são expostos na Tabela 7, abaixo.

Tabela 7 - Limites de emissão para PTN entre 10 e 30 MW.

Poluente	Limite de emissão (mg/Nm ³)
MP	520
NO _x	650

Fonte: CONAMA, 2006.

4.3. Modelagem Atmosférica

Como já citado anteriormente, a modelagem atmosférica é de suma importância para otimizar o uso dos recursos destinados ao monitoramento da qualidade do ar, por estabelecer locais e parâmetros mais críticos para as condições específicas de cada caso.

Para fins de licenciamento ambiental os modelos estão se tornando cada vez mais uma ferramenta essencial, de forma que podem aferir com razoável precisão os impactos de um poluidor nas comunidades vizinhas. Para isto, deve-se levar em consideração a interação entre fatores, tais como relevo, condições meteorológicas críticas, características das emissões e etc.

4.3.1. Tipos de modelos

De acordo com Tadano *et al.* (2010) os modelos de dispersão atmosférica podem ser divididos em duas classes principais: os modelos *Eulerianos* e os *Lagrangeanos*. Tais modelos diferem-se um do outro pelo sistema de coordenadas adotado. Enquanto o primeiro adota um ponto fixo no espaço como base para realizar seus cálculos, o segundo desloca seu sistema de coordenadas conforme o transporte das partículas modeladas. Além desses, há também os modelos ditos *Gaussianos*, que podem ser considerados uma subclasse.

Segundo Boçon (1998) os principais tipos de modelos matemáticos para estimativa da dispersão de poluentes na atmosfera são:

- Modelos de pluma Gaussianiana;
- Modelos analíticos não gaussianos; e
- Modelos numéricos.

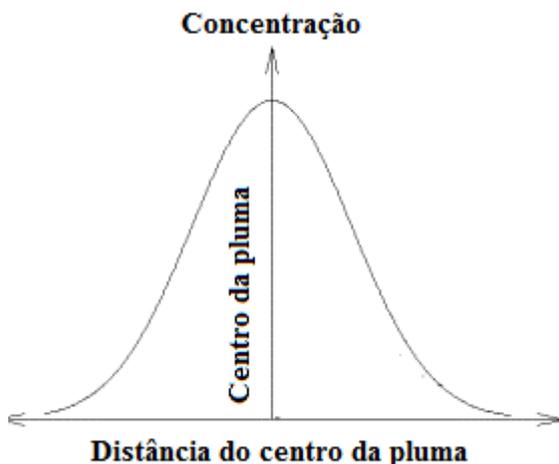
Menezes (2006) cita ainda os modelos numéricos que, por serem modelos mais complexos, tratam de questões mais específicas, tais como o impacto de um prédio ou terreno elevado na dispersão de uma pluma (fenômeno conhecido como *downwash*).

Diversos softwares de modelagem atmosférica estão disponíveis, de modo que pode-se optar pelo software mais apropriado para cada caso e suas especificidades. Dentre os mais reconhecidos, Hoinaski (2010) cita: ADMS (*Atmospheric Dispersion Modelling System*); AERMOD (*AMS/EPA Regulatory Model*); AUSPLUME (*Australian Plume Dispersion Model*); CALPUFF (*Lagrangian Puff Model*);

HYSPLIT (*Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model*); e ISC3 (*Industrial Source Complex*).

Os modelos de pluma *Gaussiana* são amplamente difundidos para o tipo de modelagem aqui abordada, pois, em função das suas características e premissas, produzem resultados compatíveis com dados experimentais (MORAES, 2004). Tal modelo assume que os poluentes são dispersos ao redor do eixo da pluma de acordo com a distribuição normal *Gaussiana*, função que possui formato de um sino e é conhecida como “curva de Gauss”. A curva de Gauss pode ser vista na Figura 1

Figura 1 – Representação da curva de Gauss e sua relação com a dispersão atmosférica.



Fonte: autor

4.3.2. A equação *Gaussiana*

Para melhor compreender o modelo de pluma *Gaussiana*, recorrer-se-á brevemente a seguir sobre a formulação da equação de dispersão e suas principais considerações, embasado em Melo (1994).

O conceito de dispersão visa tratar uma fonte que lança determinada concentração de poluentes na atmosfera, a qual tende a misturar-se gradativamente com o fluido que a cerca, nesse caso a atmosfera. Para estudar tal fenômeno deve-se analisar o problema sob dois aspectos, micro e macroscopicamente.

Adolph Fick, em 1855, propôs para o fenômeno da dispersão microscópica de dispersão (difusão molecular) uma analogia à difusão de calor, onde a difusão de moléculas em um fluido dar-se-ia de acordo com a diferença de concentração, da mesma forma que o fluxo de calor ocorre de acordo com o gradiente de temperatura. A representação matemática do fenômeno é a seguinte (TOSUN, 2002):

$$q_D = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Equação 1

Onde:

q_D = Fluxo difusivo;

C = Concentração;

D = Coeficiente de proporcionalidade (coef. de difusão molecular)

A difusão molecular representa o movimento aleatório e microscópico das moléculas em um fluido de modo a reduzir o gradiente de concentração (movimento *Browniano*). Tal movimento não diz respeito ao movimento advectivo oriundo do fluxo macroscópico do fluido (vento, no caso da dispersão atmosférica), na qual as moléculas tendem a seguir a direção macroscópica predominante (na média).

O fluxo advectivo por sua vez ocorrerá em função da velocidade macroscópica do fluido, ou seja, a velocidade do vento. A Equação 2, abaixo, apresenta a definição de fluxo advectivo.

$$q_A = uC$$

Equação 2

Onde:

q_A = Fluxo advectivo;

u = Velocidade do vento;

C = Concentração.

Considerando-se os dois tipos de movimentos descritos pode-se aplicar a Lei de Conservação da Massa a um volume fixo por onde passa o fluxo. De acordo com tal princípio físico, o somatório da taxa de variação de massa dentro do volume de controle (volume constante, fixo no espaço) com o balanço dos fluxos de massa através de seus limites

(em um determinado tempo) deve ser igual à zero. Para melhor compreensão tratar-se-á do fluxo escoando em 1-D, na direção x - Equação 3.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} = 0$$

Equação 3

Onde:

$$q_x = q_A + q_D$$

Para um regime estacionário, o fluxo advectivo no volume de controle será zero (fluxo que entra é igual ao que sai, não há acumulação), de maneira que:

$$q_x = q_D = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

Equação 4

Substituindo a Equação 4 na Equação 3, tem-se que:

$$\frac{\partial C}{\partial t} - D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = 0$$

Equação 5

Para resolver a Equação 5, é necessário recorrer à transformada de La Place e considerar algumas condições iniciais. Sejam elas:

- A concentração em $x=0$ no momento $t=0$ é igual à massa M de poluentes introduzidas no volume de controle;
- A atmosfera é infinitamente longa a ponto de não impedir a difusão do poluente; e
- A quantidade total de poluentes é constante ao longo do tempo.

De modo que (para uma consideração unidimensional em x):

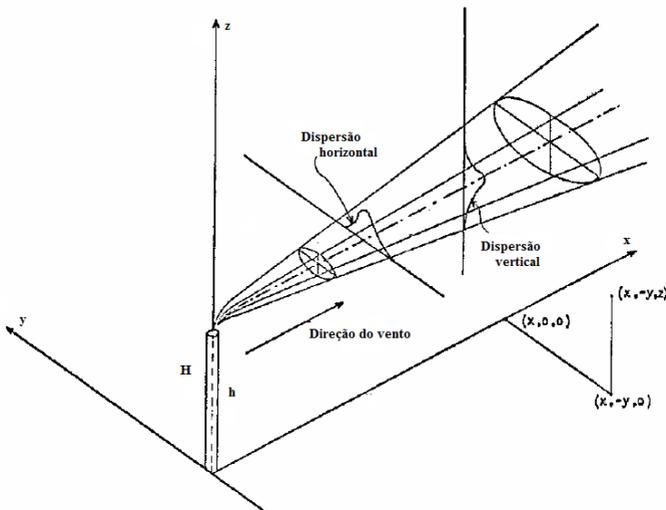
$$C(x, t) = \frac{M}{\sqrt{4\pi Dt}} \exp - \left(\frac{x^2}{4Dt} \right)$$

Agora, abordando o problema do ponto de vista estatístico, considerando o movimento de cada partícula como sendo aleatório para qualquer sentido, com igual probabilidade de ocorrência, aplica-se o Teorema do Limite Central para determinar a distribuição de moléculas mais provável ao longo do tempo e obter-se-á uma equação idêntica à Equação 6, supracitada. Devido a isso tal representação é chamada *Gaussiana*.

A equação que rege o fenômeno da advecção difusão é obtida de maneira análoga à Equação 6, porém considera-se o escoamento constante e pontual das moléculas (poluentes emitidos na atmosfera) na direção x .

Partindo do pressuposto supracitado, compreende-se que os poluentes irão dispersar-se de maneira difusiva ao longo do eixo x , seguindo o fluxo advectivo dominante, de modo que em $x = 0$ a concentração do poluente será máxima e para $x = \infty$ a concentração tenderá a zero (ver Figura 2). Dessa forma, a dispersão dos poluentes não depende mais do tempo, e sim da velocidade com que o poluente se desloca até alcançar o receptor hipotético x .

Figura 2 - Esquema de tratamento da dispersão da pluma pelo modelo.



Fonte: adaptada de Turner (1994)

Os conceitos acima expostos, com as devidas adaptações e refinamentos, constituem o cerne dos cálculos de dispersão efetuados pelo modelo computacional, como pode ser visto no tópico 4.4, na sequência.

4.4. AERMOD

Este tópico será redigido com base no manual do modelo AERMOD, disponível no website da EPA. Maior detalhamento das fórmulas presentes no modelo pode ser encontrado no manual do mesmo. Portanto, dar-se-á enfoque na estrutura dos cálculos e fluxo de informações.

Como já citado anteriormente, o modelo AERMOD trata a dispersão dos poluentes atmosféricos com base na distribuição *Gaussiana*, tanto na horizontal quanto na vertical, sempre para plumas em estado estacionário. Para tanto, a estrutura geral do modelo conta com dois pré processadores que irão subsidiar o modelo principal com informações sobre os parâmetros meteorológicos (AERMET) e dados sobre o terreno e receptores (AERMAP), que serão discutidos mais detalhadamente na sequência.

O modelo distingue e analisa de maneira diferente a dispersão de poluentes em condições atmosféricas estáveis (Stable Boundary Layer – SBL) e instáveis. Nesta última, há mais turbulência e a dispersão ocorre de maneira mais significativa (Convective Boundary Layer – CBL).

Em condições estáveis a dispersão da pluma é representada por uma função *Gaussiana*, tanto para a dispersão horizontal quanto vertical dos poluentes, enquanto que, modelando condições instáveis (CBL), o modelo assume a dispersão **vertical** como sendo uma distribuição aproximadamente *bi-Gaussiana*, onde 60% da massa do poluente concentra-se abaixo da linha média de dispersão, pois, de acordo com EPA (2004), essa representação é consistente com simulações numéricas e observações de campo.

A concentração em um dado ponto da pluma modelada na CBL é resultante da soma de três plumas hipotéticas, a saber: a fonte direta (fonte real, da chaminé); a fonte indireta (localizada acima do topo da CBL, trata dos poluentes que se aproximam do limite da camada de mistura); e a penetrada (para os poluentes que penetram na camada de inversão e tendem a dispersar na CBL). Tal configuração resulta em

uma função de probabilidade (p_w) de densidade vertical que se aproxima da superposição de duas distribuições *Gaussianas*, da seguinte forma:

$$p_w = \frac{\lambda_1}{\sqrt{2\pi\sigma_{w1}}} \exp\left(-\frac{(w - \bar{w}_1)^2}{2\sigma_{w1}^2}\right) + \frac{\lambda_2}{\sqrt{2\pi\sigma_{w2}}} \exp\left(-\frac{(w - \bar{w}_2)^2}{2\sigma_{w2}^2}\right)$$

Equação 7

Onde:

λ_1 e λ_2 são os pesos (coeficientes) das distribuições, e o restante são funções de σ_w (turbulência vertical), coeficientes calculados no pré processador meteorológico AERMET.

O motivo pelo qual se utiliza duas funções de densidade é para representar os efeitos de ascensão e rebaixamento da pluma de acordo com a velocidade média do vento. Ou seja, para simular as trajetórias mais prováveis que uma pluma pode tomar ao longo do eixo vertical, na direção de sotavento.

Como já citado, a concentração é dada pela soma das concentrações de três plumas hipotéticas, sendo a equação da concentração devido à pluma direta exposta abaixo. Ressalta-se que as outras duas apresentam a mesma estrutura.

$$C_d\{x_r, y_r, z\} = \frac{Qf_p}{\sqrt{2\pi\bar{u}}} F_y \cdot \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left[\exp\left(-\frac{(z - \Psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z + \Psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2}\right) \right]$$

Equação 8

onde:

$$\Psi_{dj} = h_s + \Delta h_d + \frac{\bar{w}_j x}{u}$$

Equação 9

e:

$$F_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_y}} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right)$$

Equação 10

Símbolos:

$C_d\{x_r, y_r, z\}$ = concentração no ponto (x_r, y_r, z) devido à fonte direta [g/m^3] (CBL);

Q = taxa de emissão da fonte [g/s];

f_p = fração de massa da pluma contida na CBL [sem dimensão];

u = velocidade do vento no topo da chaminé [m/s];

\tilde{u} = velocidade média do vento [m/s];

z_i = altura da camada de mistura [m];

σ_{z_j} = dispersão vertical total devido à ascensão ($j=1$) e ao rebaixamento ($j=2$) da pluma [m];

h_s = altura da chaminé (corrigida para o efeito de downwash) [m];

Δh_d = elevação da pluma para a fonte direta [m];

\bar{w}_j = velocidade média para a distribuição de ventos ascendentes ($j=1$) e descendentes ($j=2$);

σ_y = coeficiente de dispersão lateral para fontes diretas e indiretas [m];

Ψ_{dj} = altura efetiva da pluma [m];

F_y = função de distribuição horizontal [$1/\text{m}$];

λ_j = coeficiente de “peso” para cada distribuição (ascensão e descenso).

É perceptível a semelhança com a equação do modelo clássico *Gaussiano* de Pasquill-Gifford. Tal equação é a peça chave do modelo. Entretanto, para se determinar as suas variáveis é necessário uma série de cálculos com base em dados meteorológicos aferidos, topográficos e etc., realizados pelo pré processador AERMET e pela interface meteorológica do modelo. O item **Erro! Fonte de referência não encontrada.** aborda mais detalhadamente essa questão.

Dentre as variáveis que influenciam os cálculos do modelo, dois “tópicos” são de grande importância por determinarem a forma de abordagem e cálculos subsequentes do modelo até chegar na Equação 10, supracitada. São elas a caracterização da camada limite planetária (camada de mistura) e o tratamento da pluma com relação à elevação do terreno.

4.4.1. Tratamento do escoamento da pluma em função do terreno

O modelo AERMOD trata a pluma de dispersão de duas maneiras distintas para melhor representar a interação entre a pluma e o relevo,

seja este plano ou não. Uma delas considera o caso em que a pluma segue uma trajetória horizontal, seguindo a direção média do vento e, conseqüentemente, atingindo superfícies elevadas. O outro caso seria aquele em que a pluma tende a acompanhar as variações de relevo. A concentração final será obtida através da soma dessas duas plumas hipotéticas, cada qual multiplicada por um coeficiente para melhor representar a realidade, tal como descreve a Equação 11, a seguir:

$$C_T\{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\} + (1 - f)C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\}$$

Equação 11

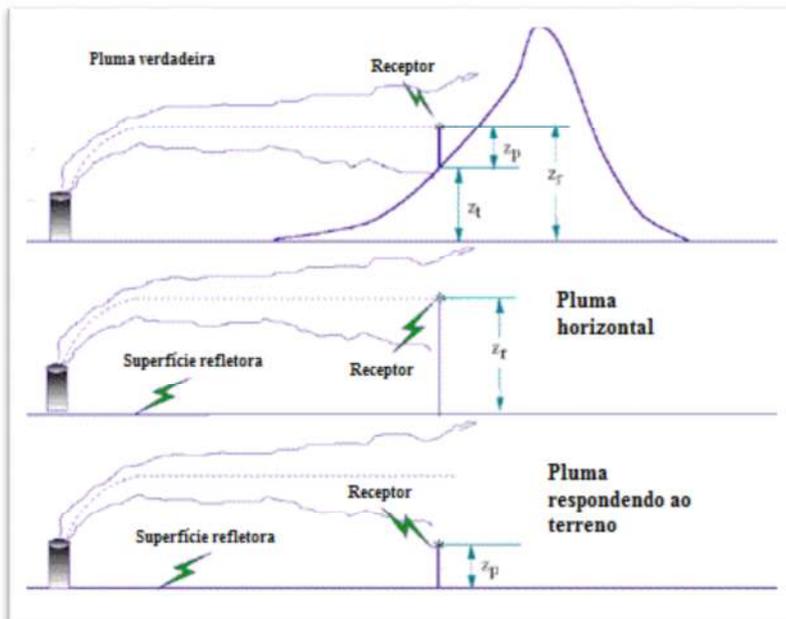
Onde:

- $C_T\{x_r, y_r, z_r\}$ é a concentração total;
- $C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\}$ é a pluma horizontal;
- $C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\}$ é a pluma que acompanha o terreno; e
- f é a função de ponderação entre os dois tipos de plumas.

Nota-se que o cálculo é igual para ambas as plumas. Entretanto, a coordenada z é distinta. No caso da pluma horizontal a coordenada z_r será a altura do receptor (sempre adotando como zero a elevação da base da chaminé). Em se tratando da pluma que acompanha o terreno, a coordenada z_p é a altura do ponto em questão subtraída da altura do terreno (ver Figura 3).

O coeficiente f ($0 \leq f \leq 1$), encontrado na Equação 11 é influenciado principalmente pela velocidade do vento. Considerando que quanto maior a velocidade do vento, maior é a instabilidade da atmosfera, maior será também a propensão da pluma elevar-se para acompanhar as variações do terreno e, conseqüentemente, maior será f .

Figura 3 - Aproximação dos estados extremos da pluma



Fonte: EPA, 2004.

4.4.2. Caracterização da camada limite planetária

A camada limite planetária (PBL) é a região da atmosfera mais próxima da superfície terrestre, onde o movimento dos ventos sofre influência da rugosidade do terreno.

A influência do terreno sobre a velocidade dos ventos aumenta a medida que aproxima-se do mesmo. Portanto, quanto maior a altitude, maior a velocidade do vento, resultando em uma curva onde a velocidade tende a zero em $z = 0$ e máxima em $z = z_i$ (z_i sendo a altura da camada de mistura).

Boubel et al. (1994) discorre sobre o efeito da topografia na dispersão de poluentes. O efeito da fricção topográfica tende a diminuir a velocidade do vento proporcionalmente à proximidade do mesmo com a superfície em questão. O gradiente de velocidade formado entre o vento próximo à superfície (mais lento) e o vento de altitudes mais

elevadas acaba por formar zonas de baixa pressão que induzem um movimento vertical ascendente. Esse efeito é conhecido como espiral de Ekman.

A soma dessas forças atuando em conjunto é deveras complexa, tanto que para estimar os parâmetros do perfil vertical da camada de mistura, o AERMOD conta com uma interface meteorológica para realizar os cálculos necessários e com o pré processador AERMET que faz uso de dados meteorológicos medidos para calcular determinados parâmetros necessários, a saber: Comprimento de Monin-Obukhov (L); velocidade de fricção superficial (u_*); rugosidade superficial (z_0); fluxo de calor superficial (H); escala da velocidade convectiva (w_*); dentre outros.

O AERMET repassa, ainda, as informações medidas de vento, temperatura e turbulência, no formato que a interface do AERMOD precisa, para gerar os perfis e coeficientes necessários para o cálculo de dispersão, a ser realizado posteriormente.

4.4.3. Perfis verticais calculados

Dentre os perfis verticais determinados pela interface meteorológica do AERMOD, estão:

- Direção do vento;
- Velocidade do vento;
- Temperatura;
- Gradiente vertical de temperatura potencial;
- Turbulência vertical (σ_w); e
- Turbulência lateral (σ_s).

Para os cálculos se faz necessário no mínimo uma medição de velocidade e direção do vento e temperatura. Na sequência, segue uma breve descrição das principais etapas de cálculo que fazem parte da determinação dos perfis.

4.4.3.1. Perfil de direção do vento

Os perfis de direção do vento são considerados constantes com a altura, tanto para condições estáveis, quanto para instáveis. Quando se possui mais de um nível de medição o modelo interpola entre os valores.

4.4.3.2. Perfil de velocidade do vento

O perfil de velocidade de ventos calculado pelo AERMOD possui formato logarítmico. Entretanto esse formato não representa apropriadamente a interação do vento com vegetação e obstáculos em baixas altitudes (abaixo da rugosidade superficial – $7z_0$). Para contornar esse problema o modelo faz uso de equações que permitem um decaimento linear da velocidade do vento abaixo de $7z_0$.

4.4.3.3. Perfil de temperaturas

Para o cálculo do perfil de temperaturas o modelo utiliza a seguinte equação (igualmente para condições estáveis e instáveis):

$$\theta\{z + \Delta z\} = \theta\{z\} + \frac{\partial \theta}{\partial z} \Delta z$$

Equação 12

Onde:

$\frac{\partial \theta}{\partial z}$ = gradiente de temperatura referente à camada Δz

$\theta\{z\}$ = temperatura potencial na altura z .

4.4.3.4. Perfil de gradiente vertical de temperaturas potenciais

A interface meteorológica do modelo AERMOD calcula, através de diversas equações, o perfil vertical de temperaturas potenciais⁷ para condições estáveis. O resultado apresenta uma relação inversa de dependência entre o gradiente e a altitude.

Para condições instáveis, na camada de mistura, o valor é tido como zero.

4.4.3.5. Perfil de turbulência vertical

⁷ Segundo Wallace & Hobbs (2002), a temperatura potencial θ de uma parcela de ar é definida como a temperatura que essa parcela teria caso fosse comprimida ou expandida adiabaticamente de sua temperatura e pressão existentes a uma pressão padrão p_0 (normalmente 1000 hPa).

O cálculo do perfil de turbulência vertical baseia-se na soma das turbulências ocasionadas pelos fenômenos convectivos e mecânicos na atmosfera, de modo que a expressão da turbulência total é a seguinte:

$$\sigma_{wT}^2 = \sigma_{wc}^2 + \sigma_{wm}^2$$

Equação 13

Onde:

σ_{wc} = turbulência horizontal convectiva; e

σ_{wm} = turbulência horizontal mecânica.

Quando por um lado a turbulência convectiva é influenciada pela escala de velocidade convectiva (w^*), a turbulência mecânica é função da velocidade de fricção superficial (u^*). A diferença entre condições estáveis e instáveis se dá ao fato de que em condições estáveis a variável convectiva é desprezada.

Uma das diferenças entre o método de Pasquill e o AERMOD está na determinação dos coeficientes de dispersão, uma vez que o primeiro usa classes de estabilidade e dados empíricos para estabelecer padrões, enquanto o modelo computacional propõe a formulação do fenômeno físico.

4.4.3.6. Perfil de turbulência horizontal (ou lateral)

De maneira análoga ao perfil de turbulência vertical, o horizontal faz uso de duas grandezas distintas, a mecânica e a convectiva, tratando condições estáveis apenas considerando-se a porção mecânica. A Equação 14, abaixo representa o fenômeno.

$$\sigma_{vT}^2 = \sigma_{vc}^2 + \sigma_{vm}^2$$

Equação 14

Onde:

σ_{vc} = turbulência horizontal convectiva; e

σ_{vm} = turbulência horizontal mecânica.

4.4.4. Efeito *Downwash*

Thé et al. (2004 *apud* Menezes 2006) caracteriza o efeito conhecido como *building downwash* como sendo a interferência na

dispersão da pluma de poluentes causada pelas construções próximas da fonte.

De maneira geral, uma rajada de vento, ao colidir com a parede de uma construção, ou mesmo uma chaminé, cria uma zona de alta pressão na região onde ocorre o impacto. Consequentemente, no outro lado da estrutura será formada uma zona de baixa pressão que, por sua vez, provoca um desvio da pluma em direção ao solo.

O AERMOD considera o efeito *downwash* ao incorporar os algoritmos do modelo PRIME (*Plume Rise Model Enhancements – Melhorias de modelo de elevação da pluma, tradução livre*) para estimar a ascensão e crescimento de uma pluma na área afetada pelo efeito.

5. Materiais e método

A metodologia para a realização do estudo de dispersão atmosférica apresenta três fases distintas, a saber:

- Coleta e ajuste dos dados;
- Preparação do modelo;
- Esforço computacional e relatórios.

Durante a primeira etapa são coletadas as informações necessárias para o estudo. A quantidade, qualidade e confiabilidade das informações serão determinantes em várias tomadas de decisão posteriores. Dados como os meteorológicos devem passar por uma análise de consistência e eventual preenchimento de falhas para que possam ser utilizados.

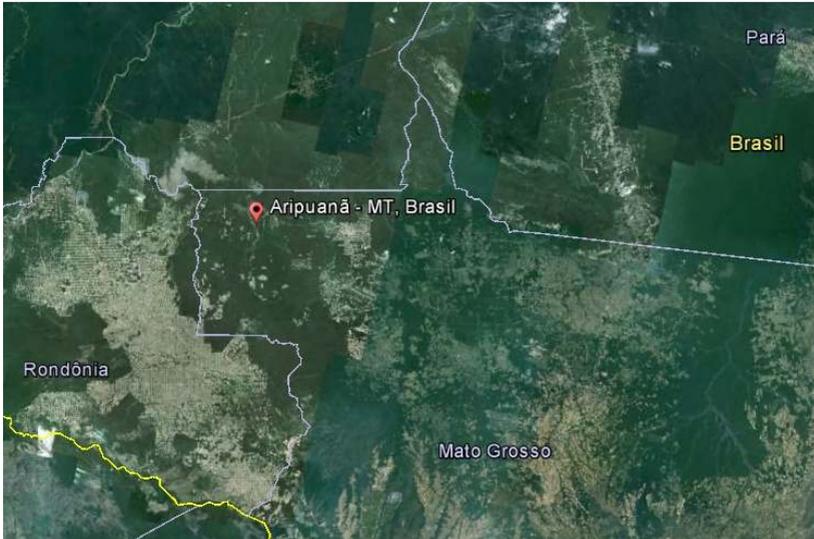
Na sequência prepara-se o modelo, determinam-se quais cenários serão (poderão ser) modelados a partir das informações adquiridas na etapa anterior e o software é alimentado com as mesmas.

Por fim é realizada a modelagem propriamente dita, quando ocorre o esforço computacional que irá gerar os campos de concentração referentes às opções selecionadas.

5.1. Caracterização do local

A termelétrica em questão, como já citado, encontra-se em fase de implantação no município de Aripuanã, localizado na região noroeste do estado de Mato Grosso, nas coordenadas 10°11'06,41''S e 59°27'34,60''. Ocupando uma área total de aproximadamente 14 hectares, o empreendimento situa-se a cerca de 3km, em linha reta, do núcleo urbano da cidade, como pode ser visto na Figura 4, a seguir.

Figura 4 - Localização da usina



Fonte: Google Earth

5.2. Coleta dos dados

5.2.1. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que mantém os registros da estação automática de Cotriguaçu-MT, código A-919, localizada a cerca de 120 km em linha reta do local de modelagem. Devido à escassez de dados de sondagem (*upper air data*) utilizou-se o estimador desenvolvido pela *Lakes Environmental*.

A distância entre a estação meteorológica e o local a ser modelado não é ideal, entretanto é o melhor dado disponível para a região. Pesam a favor da escolha o fato de que ambos os pontos encontram-se em conformações geomorfológicas semelhantes, com diferença entre altitudes (cotas) relativamente baixa e com uso do solo semelhante em seus entornos (predominantemente rural).

Os dados fornecidos pelo INMET compreendem:

- Pressão atmosférica (máxima, mínima e instantânea - hPa);
- Radiação global (KJ/m²);
- Precipitação (mm);

- Velocidade do vento (m/s);
- Direção do vento (graus);
- Rajada máxima de vento (m/s);
- Temperatura do ar (média, máxima e mínima - °C);
- Temperatura do ponto de orvalho (média, máxima e mínima - °C);
- Umidade relativa do ar (média, máxima e mínima - %)

Os dados recebidos compreendem o período entre 27/05/2007 (data de início de operação da estação) até 29/06/2012 e foram repassados na forma bruta não consistida (sem correções). Para a efetiva utilização dos dados no modelo, de acordo com as recomendações contidas em *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications* (EPA, 2000), faz-se necessária a consistência dos dados e um máximo de 10% de falhas⁸.

Os dados selecionados para verificação de consistência foram:

- Radiação global;
- Precipitação;
- Velocidade do vento;
- Direção do vento; e
- Temperatura do ar média.

O modelo AERMOD necessita de dados de cobertura de nuvens para realizar a simulação. Porém, tal dado não é coletado na estação em questão, fazendo necessária a estimativa do dado com base em outros parâmetros. Adotou-se como base o método da Radiação Solar/delta-T adaptado (EPA, 2000), que utiliza diversos parâmetros (incluindo a cobertura de nuvens) para determinar a classe de estabilidade da atmosfera de Pasquill-Guifford. Essa metodologia foi adaptada de EPA (2000).

Classes de estabilidade são de certa forma uma generalização das características atmosféricas em um determinado momento. Elas variam

⁸ A análise preliminar dos dados apontou baixa quantidade de falhas, com a maior parte dos anos com menos de 10% de dados faltantes. Entretanto, o período compreendido entre 11/12/2011 e 01/03/2012 possui poucos registros, contabilizando três meses de falhas praticamente ininterruptas, inviabilizando a utilização dos registros desse intervalo.

de A a F (sendo A a condição mais instável) de acordo com a instabilidade da atmosfera. As condições mais propícias para dispersão ocorrem com as maiores instabilidades, em períodos diurnos, com altas temperaturas (insolação alta) e ventos fracos ($< 2\text{m/s}$) (EPA, 2000).

O método utilizado, baseado no método de Turner, determina as classes de estabilidade com base na velocidade do vento e radiação solar incidente. Para o período noturno, quando não há radiação incidente, as classes foram determinadas com base na velocidade do vento. As Tabelas 8 e 9 apresentam as classes de estabilidade.

Tabela 8 - Classes de estabilidade para o período noturno (EPA, 2000).

Classes de estabilidade - Noite	
Vel. Do Vento (m/s)	Classe de Estabilidade
<2	F
$2 < v < 2,5$	E
$>2,5$	D

Tabela 9 - Classes de estabilidade para o período diurno (EPA, 2000).

Classes de estabilidade - Dia				
Vel. Do vento (m/s)	Radiação incidente (W/m^2)			
	>925	925-675	675-175	<175
<2	A	A	B	D
2-3	A	B	C	D
3-5	B	B	C	D
5-6	C	C	D	D
>6	C	D	D	D

Finalmente, para a estimativa de cobertura de nuvens fez-se uma associação de décimos de céu encoberto, com as classes de estabilidade (EPA, 2000). Para períodos com atividade pluviométrica o valor

definido foi 10 (céu encoberto)⁹ e períodos com classe “A” definiu-se valor zero (céu sem nuvens). A

Tabela 10 apresenta todos os valores adotados.

Tabela 10 - Cobertura de nuvens com base na classe de estabilidade.

Classe de estabilidade	A	B	C	D	E	F	Precipitação
Cobertura de nuvens	0	2	4	6	4	2	10

Para aumentar a confiabilidade dos dados deve ser realizada uma análise de consistência e validação dos dados meteorológicos. A validação dos dados meteorológicos baseia-se em determinadas regras que visam corrigir falhas dos aparelhos de medição. Por exemplo, um anemômetro defeituoso que registra várias horas consecutivas de calmaria. Com vistas a corrigir tais erros adotou-se uma série de medidas, baseadas nas recomendações de EPA (2000), a saber:

- A velocidade do vento não varia mais do que 0,1 m/s por três horas consecutivas – substitui-se o valor central pela média das duas horas consecutivas e anteriores;
- A velocidade do vento não varia mais do que 0.5 m/s por 12 horas consecutivas – marca-se uma observação;
- Velocidade do vento igual à zero – adota-se a direção como sendo zero para que o modelo trate como período de calmaria;
- Direção do vento não varia mais que 1° por mais que três horas consecutivas – substitui-se o valor central pela média das duas horas consecutivas e anteriores;
- Direção do vento não varia mais de 10° por 18 horas consecutivas – marca-se uma observação;
- A diferença de temperatura entre duas horas consecutivas é superior a 5°C (para mais ou para menos) – substitui-se o valor da segunda hora pela média dos valores anterior e subsequente;
- Não varia mais do que 0,5°C por 12 horas consecutivas – marca-se uma observação;
- Precipitação é superior a 100 mm em um período de 24h – marca-se uma observação;

⁹ Normalmente, para cobertura de nuvens, divide-se o céu em oitavos. Esta divisão em dezena foi proposta pela Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications – EPA, 2000.

- Precipitação é maior que 25 mm em uma hora – marca-se uma observação;
- Pressão é superior a 952 mb ou inferior a 832 mb (limites estabelecidos com base em EPA, adaptados para a cota 860) – substitui-se o valor pelo limite ultrapassado; e
- Variação de pressão entre duas horas consecutivas é superior a 6 mb – substitui-se o último valor pela média dos valores anterior e subsequente.

Diversos “erros” listados acima não foram constatados. Porém, é válido ressaltar que as recomendações acima listadas são sugestões, prevalecendo sempre o bom senso e decisões de um técnico experiente, o qual deve executar tais correções.

Excluindo-se o já citado período faltante, tem-se um período que compreende quatro anos completos (quatro períodos de 365 dias). Embora o recomendado para modelagens seja de cinco anos, optou-se por prosseguir com os dados recebidos para não perder representatividade, visto que não há outras estações meteorológicas próximas ao local de estudo.

Após a transposição dos dados selecionados, formatação apropriada e validação dos mesmos deu-se início o preenchimento de falhas. EPA (2000), lista os procedimentos recomendados para tanto, com vistas à modelagem. Dentre eles, o que apresenta a menor probabilidade de erro é a chamada “persistência”, onde se preenche uma hora de dado faltante com o registro do último período (hora), com cautela nos intervalos de transição entre dia e noite. A Tabela 11, abaixo, apresenta o percentual de falhas em cada período considerado, antes e depois do preenchimento das falhas pelo método da persistência.

Tabela 11 - Percentual de dados faltantes para os períodos de modelagem.

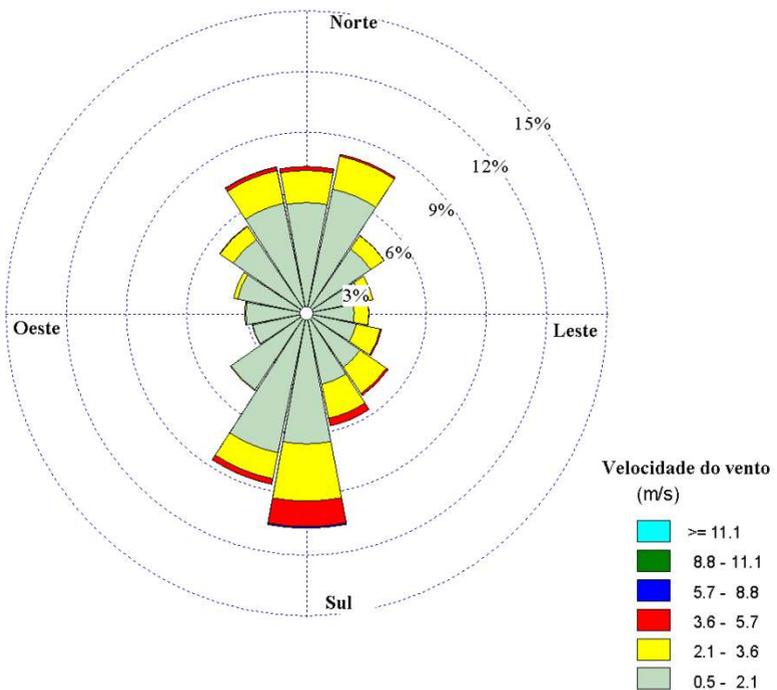
Período	% falhas - dado bruto	% falhas - preenchido
2007-2008	1.95	1.37
2008-2009	0.45	0.01
2009-2010	0.79	0.31
2010-2011	0.53	0.12

Para os intervalos de mais de uma hora, onde há falhas nos dados, utilizam-se médias sazonais da seguinte forma (EPA, 2000):

- Temperatura: substitui-se cada hora faltante pela média do horário, característica da estação (verão, outono, inverno ou primavera);
- Velocidade do vento: substitui-se cada hora faltante pela respectiva média mensal;
- Direção do vento: substitui-se cada hora faltante pela média anual; e
- Cobertura de nuvens: substituiu-se os valores faltantes pela média mensal obtida em normais climatológicas (INMET).

A Figura 5, abaixo, apresenta a rosa dos ventos dos dados já processados.

Figura 5- Rosa dos ventos.



Fonte: autor

5.2.2. Dados de terreno

O item 4.4.1 apresenta a importância dos dados de terreno para a modelagem de dispersão. Tais dados foram obtidos no formato apropriado (extensão .hgt) para a utilização no modelo, através do site www.webgis.com, que disponibiliza gratuitamente dados topográficos do satélite SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), com resolução de 90 metros.

Os dados de uso e ocupação do solo são inseridos durante o processamento dos dados meteorológicos e referem-se ao uso do entorno da UTE. Por meio de análise visual, constatou-se que o uso do solo em um raio de 3 km da estação meteorológica é relativamente semelhante ao uso do solo nas proximidades da futura UTE, basicamente de solo cultivado, com manchas urbanas na região oeste.

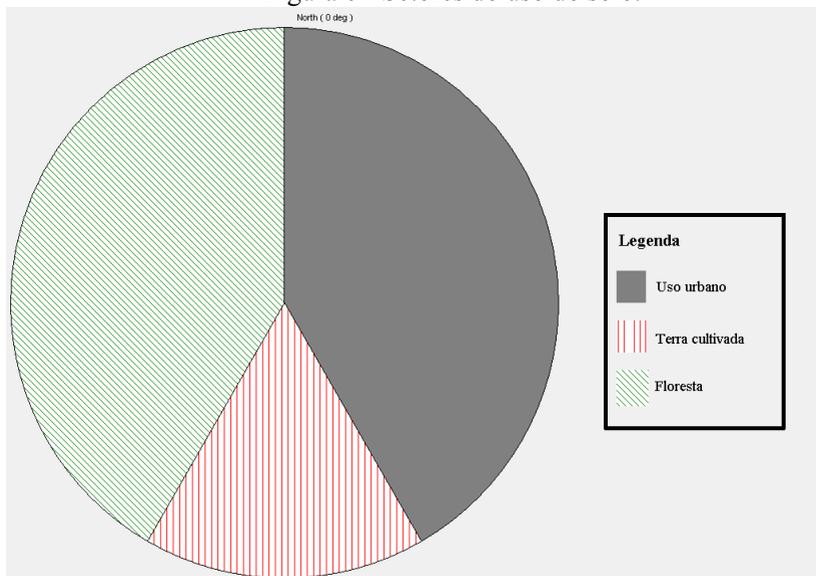
A informação de uso do solo é gerada a partir de setores a fim de completar uma circunferência ao redor da estação meteorológica, para o qual as informações de albedo, rugosidade superficial e razão de Bowen são associadas. Os ângulos que formarão os setores e usos do solo devem ser coerentes com as características encontradas.

A Tabela 12, abaixo, apresenta as características dos setores utilizados no presente estudo, definidos com base em análise visual de imagens de satélite. A Figura 6 apresenta os referidos setores para uma melhor visualização.

Tabela 12 - Características do uso do solo no entorno da área

Setor	Ângulos limitantes	Uso do solo	Albedo	Razão de Bowen	Rugosidade Superficial
1	0 – 150	Urbano	0,208	1,625	1
2	150 – 210	Terra cultivada	0,280	0,750	0,07
3	210 – 360	Floresta	0,215	0,875	0,9

Figura 6 - Setores do uso do solo.



Fonte: autor

5.2.3. Dados da fonte

Com relação à fonte propriamente dita, faz-se necessário uma série de dados para a modelagem de dispersão atmosférica, a saber:

- Localização da fonte emissora;
- Localização georreferenciada da chaminé;
- Plano volumétrico das principais estruturas com vistas ao cálculo do efeito de *downwash*;
- Uso e ocupação do solo no entorno da estação meteorológica;
- Altura da chaminé;
- Diâmetro interno da chaminé;
- Velocidade de saída, ou vazão de saída dos gases;
- Equipamentos de controle de poluição atmosférica;
- Rotina de operação dos equipamentos.

Para alimentar o modelo com informações de uso e ocupação do solo, recorreu-se ao banco de imagens de satélite do Google Maps, para um raio de cerca de três quilômetros. O restante das informações foi extraído do Plano Básico Ambiental (PBA) da usina.

Os dados utilizados estão condensados no item 5.3.2 para facilitar a consulta.

5.3. Preparação do modelo

A preparação do modelo consiste na síntese das informações levantadas, que servirão de base para os cálculos realizados. Como já mencionado, trabalhou-se com a interface desenvolvida pela *Lakes Environmental*[®]. Tal interface facilita a estruturação do modelo ao tornar a interação homem-computador mais intuitiva e rápida.

5.3.1. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos a serem utilizados devem estar no formato correto para entrada no modelo. O pré processador AERMET foi utilizado para analisar os dados validados anteriormente e gerar o arquivo com as informações necessárias para a modelagem.

5.3.2. Dados da fonte e cenários de modelagem

Para a modelagem, definiram-se dois cenários de emissões, sendo um deles conservador, onde adotou-se os fatores de emissões mais pessimistas encontrados na literatura (Cenário 01), e outro cenário com os fatores de emissão médios (Cenário 02) de usinas com equipamentos de controle de emissões indicados por EPA (2003).

O Cenário 01 justifica-se pela possibilidade de existirem falhas nos equipamentos de controle, ou eventuais acidentes que levem à emissões mais significativas do que as previstas inicialmente. O Cenário 02 tende a representar melhor a realidade, visto que o projeto da usina contempla a instalação de mult ciclone e lavador de gases.

Os dados da fonte utilizados na modelagem, podem ser vistos nas Tabelas 13 a 16, abaixo.

Tabela 13 - Características da UTE

Características da UTE	
Coord. X ¹⁰	230360
Coord. Y ²	8872950
Altura	20 m
Comprimento	50 m
Largura	70 m

Tabela 14 - Características da chaminé

Características da chaminé	
Coord. X	230388.12
Coord. Y	8873006.44
Altura	45 m
Diâmetro interno	2825 mm

Tabela 15 - Características das emissões

Características da emissão		
Velocidade de saída dos gases	13	m/s
Vazão média	325,93	m ³ /s
Temperatura de saída	383,15	K
Poder calorífico superior (PCS)	22,31	MJ/kg
Capacidade de combustão	1350	Kg/h

¹⁰ Coordenadas estimadas, projeção WGS84, para o canto Sudoeste do retângulo.

Tabela 16 - Fatores de emissão (EPA, 2003)

Emissões		Fator de emissão	Emissão	Qmass ¹¹
		kg/J ¹²	g/kg ¹³	g/s
Cenário 1	MP	1.72E-10	3.84	1.44
	NO _x	2.11E-10	4.70	1.76
	SO _x	1.08E-11	0.24	0.14
	CO	2.58E-10	5.76	2.16
Cenário 2	MP	9.46E-11	2.11	0.79
	NO _x	9.46E-11	2.11	0.79
	SO _x	1.08E-11	0.24	0.09
	CO	2.58E-10	5.76	2.16

Os dados de emissão de poluentes foram obtidos com base nas médias recomendadas pelo EPA (item 4.1.2). Tais valores têm como base de cálculo o poder calorífico superior (PCS) do combustível, de modo que adotou-se os seguintes valores para o cálculo:

- Madeira de eucalipto (reflorestamento) picada;
- Poder calorífico inferior (PCI): 19,4 MJ/kg (JENKINS *apud* NOGUEIRA, 2003);
- PCS = 1,15 PCI

5.3.3. Dados de saída

Para a saída dos dados gerou-se uma grade cartesiana de receptores composta por 3721 pontos, espaçados entre si por 100 m, formando uma malha quadrada de 61x61 pontos, abrangendo um raio de cerca de 3 km ao redor da fonte. Rodou-se preliminarmente uma simulação mais abrangente, com uma malha cartesiana de receptores de 20 km, por não apresentar picos significativos de concentração nas áreas mais afastadas optou-se por focar o presente estudo na área da mancha urbana da cidade de Aripuanã.

¹¹ Vazão mássica do poluente pela chaminé, em gramas de poluente por segundo.

¹² Quilograma de poluente emitido por Joule de calor adicionado.

¹³ Grama de poluente emitido por quilograma de combustível queimado.

A Tabela 17, abaixo, apresenta as opções selecionadas para o formato de saída dos dados. Optou-se por selecionar tais opções para que os resultados possam ser comparados com os parâmetros estabelecidos pela legislação.

Tabela 17 - Opções de saída.

Poluente	Cenário 01	Cenário 02
CO	8h	8h
	1h	1h
Partículas inaláveis (MP ₁₀)	Anual	Anual
	24h	24h
NO _x	Anual	Anual
	1h	1h
SO _x	Anual	Anual
	24h	24h

Além dos mapas de isoconcentração, serão expostos os dez maiores valores de concentrações encontrados em cada modelagem. Esses valores refletem, de maneira simplificada, a frequência de ocorrência de altas concentrações.

Para a elaboração dos mapas de isoconcentração, estabeleceu-se um limite de abrangência equivalente a 10% do padrão primário de qualidade do ar para cada poluente. Nos casos onde essa concentração não for atingida focar-se-á na área que corresponde a mancha urbana próxima da fonte.

6. Análise dos Resultados

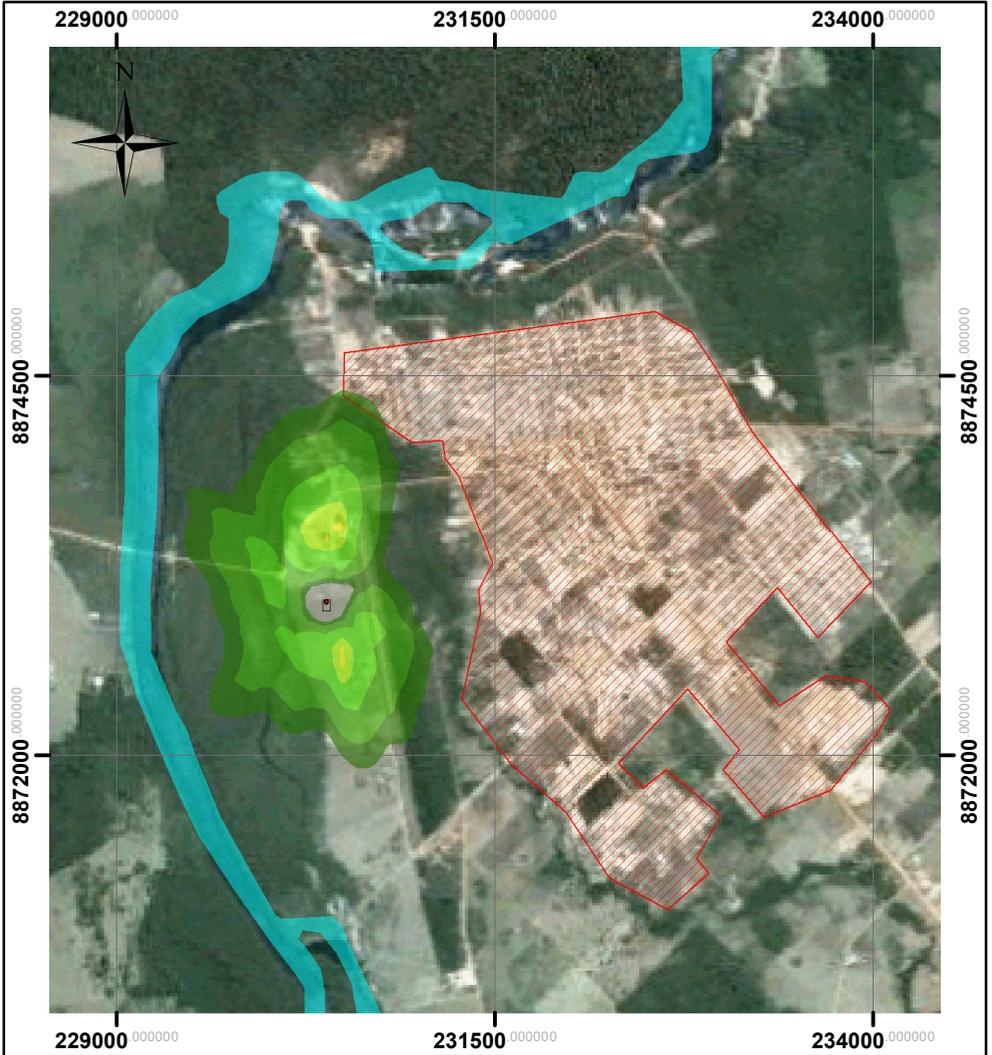
A Tabela 18 apresenta os dez maiores valores de concentrações encontrados nas simulações do Cenário 01 para cada poluente. Na sequência, apresentam-se os mapas de isolinhas de concentrações para a área modelada.

Os valores abaixo representam os picos de concentração atingidos cada qual em um único receptor, em algum momento compreendido nos quatro anos modelados.

Tabela 18 - Maiores concentrações modeladas para o Cenário 01
(em $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Ordem	SO _x	NO _x	MP ₁₀	CO
1	0.1406	12.6073	10.3151	15.4726
2	0.0984	9.5002	7.7729	11.6594
3	0.0965	6.1856	5.0609	7.5914
4	0.0943	5.0942	4.1680	6.2520
5	0.0923	4.3679	3.5737	5.3606
6	0.0916	4.3522	3.5609	5.3413
7	0.0908	4.2708	3.4943	5.2415
8	0.0907	4.2638	3.4885	5.2328
9	0.0906	4.2262	3.4578	5.1868
10	0.0895	4.2175	3.4507	5.1760

Mapa de isolinhas de concentração de SO_x - Período 24h (µg/m³)

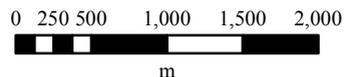


Convenções Cartográficas

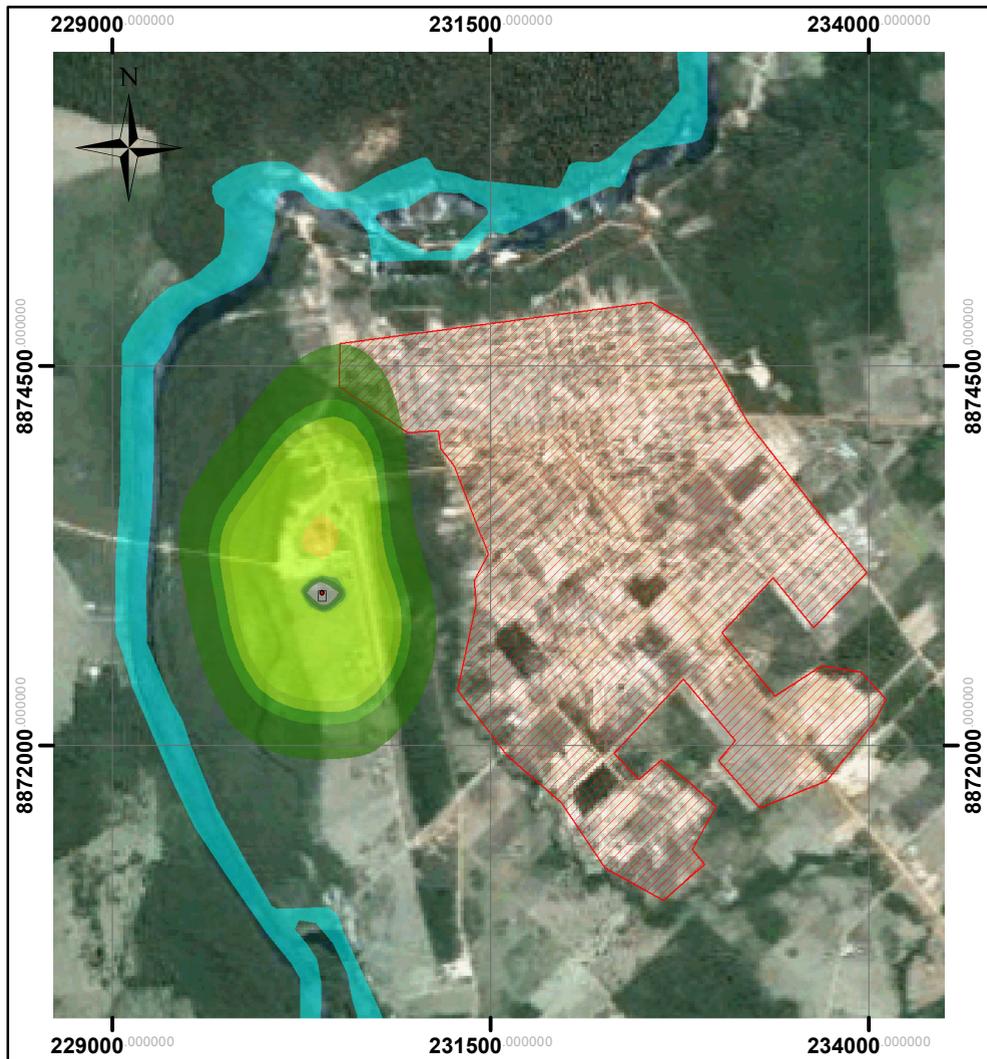
- | | | |
|---|--------------------------|--|
|  | Chaminé - UTE Guaçu | SO _x - 24h (Cenário 01) |
|  | Hidrografia |  0.2 |
|  | Mancha urbana - Aripuanã |  0.1 |
| | |  0.09 |
| | |  0.07 |
| | |  0.05 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de SOx - Período anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

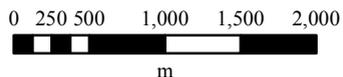


Convenções Cartográficas

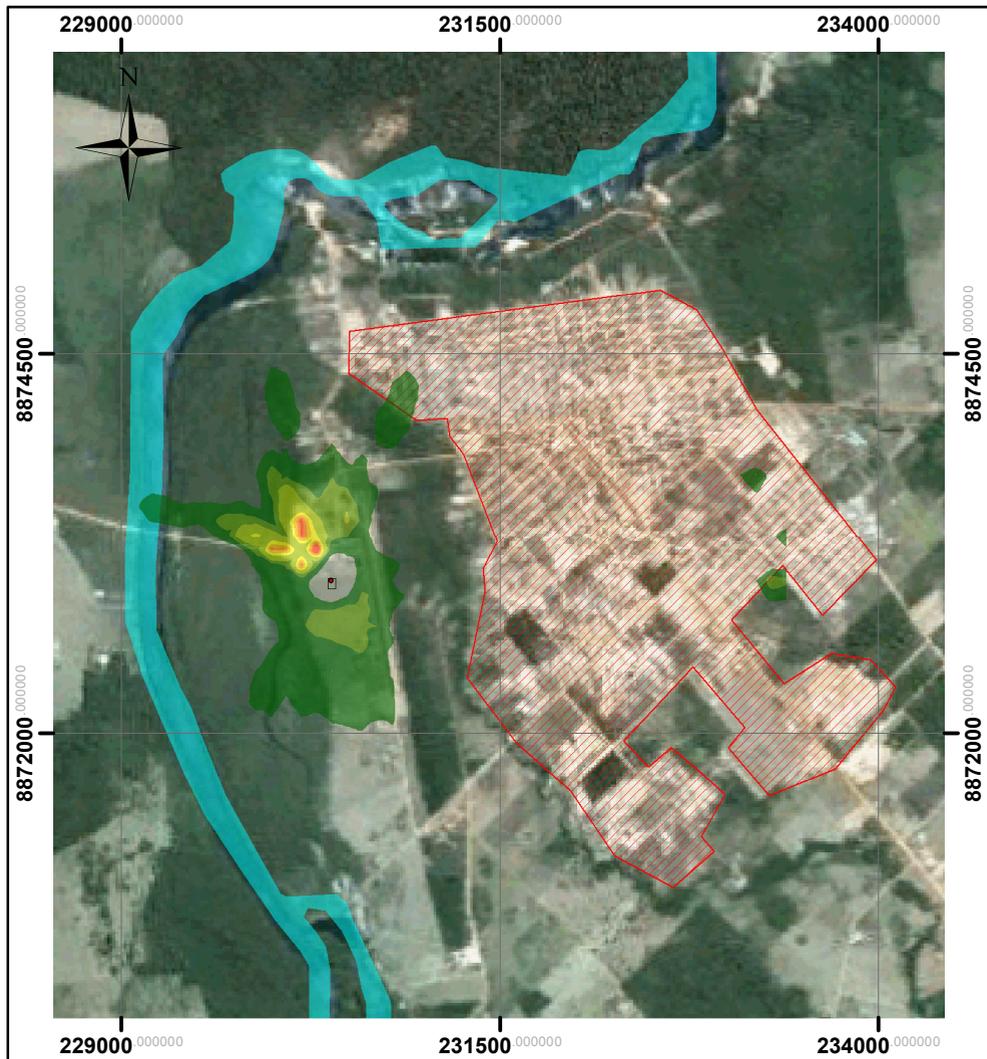
- | | | |
|---|--------------------------|---|
|  | Chaminé - UTE Guaçu | SOx - Anual (Cenário 01) |
|  | Hidrografia |  0.03 |
|  | Mancha urbana - Aripuanã |  0.02 |
| | |  0.01 |
| | |  0.009 |
| | |  0.008 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de NOx - Período de 1h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

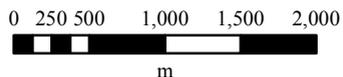


Convenções Cartográficas

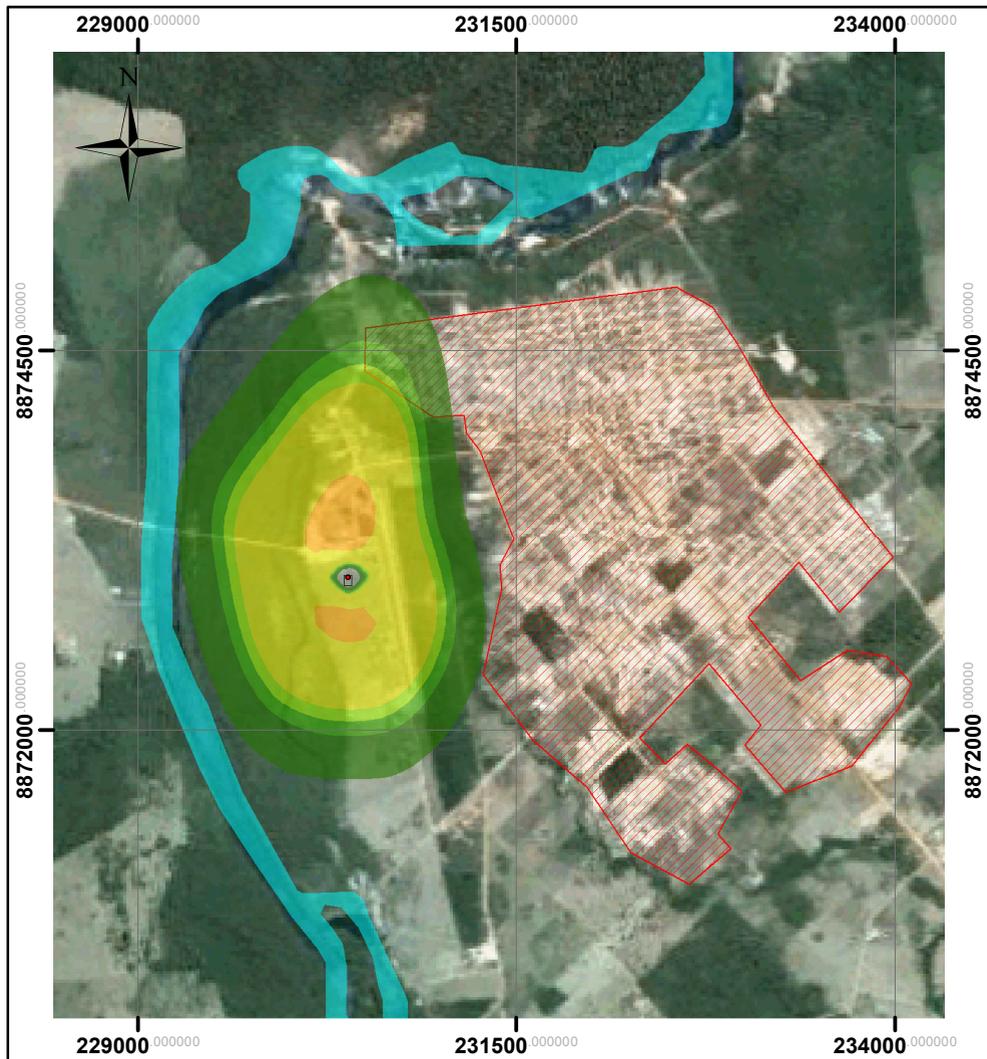
- | | |
|---|--|
|  Chaminé - UTE Guaçu | NOx - 1h (Cenário 01) |
|  Hidrografia |  20 |
|  Mancha urbana - Aripuanã |  10 |
| |  9 |
| |  8 |
| |  7 |
| |  5 |
| |  4 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de NOx - Período anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

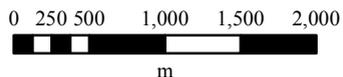


Convenções Cartográficas

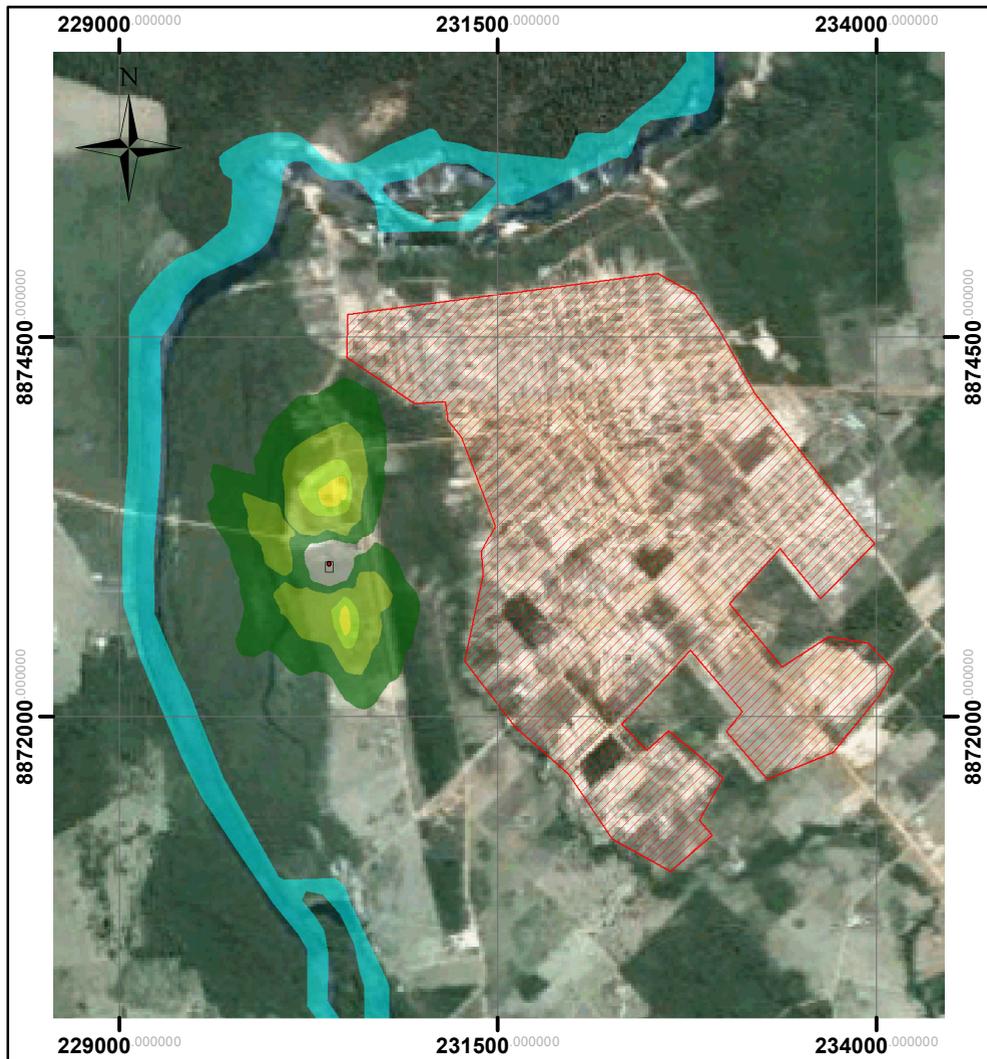
- | | |
|---|--|
|  Chaminé - UTE Guaçu | NOx - Anual (Cenário 01) |
|  Hidrografia |  0.3 |
|  Mancha urbana - Aripuanã |  0.2 |
| |  0.1 |
| |  0.09 |
| |  0.08 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de MP10 - Período de 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

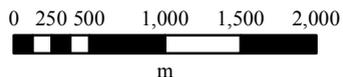


Convenções Cartográficas

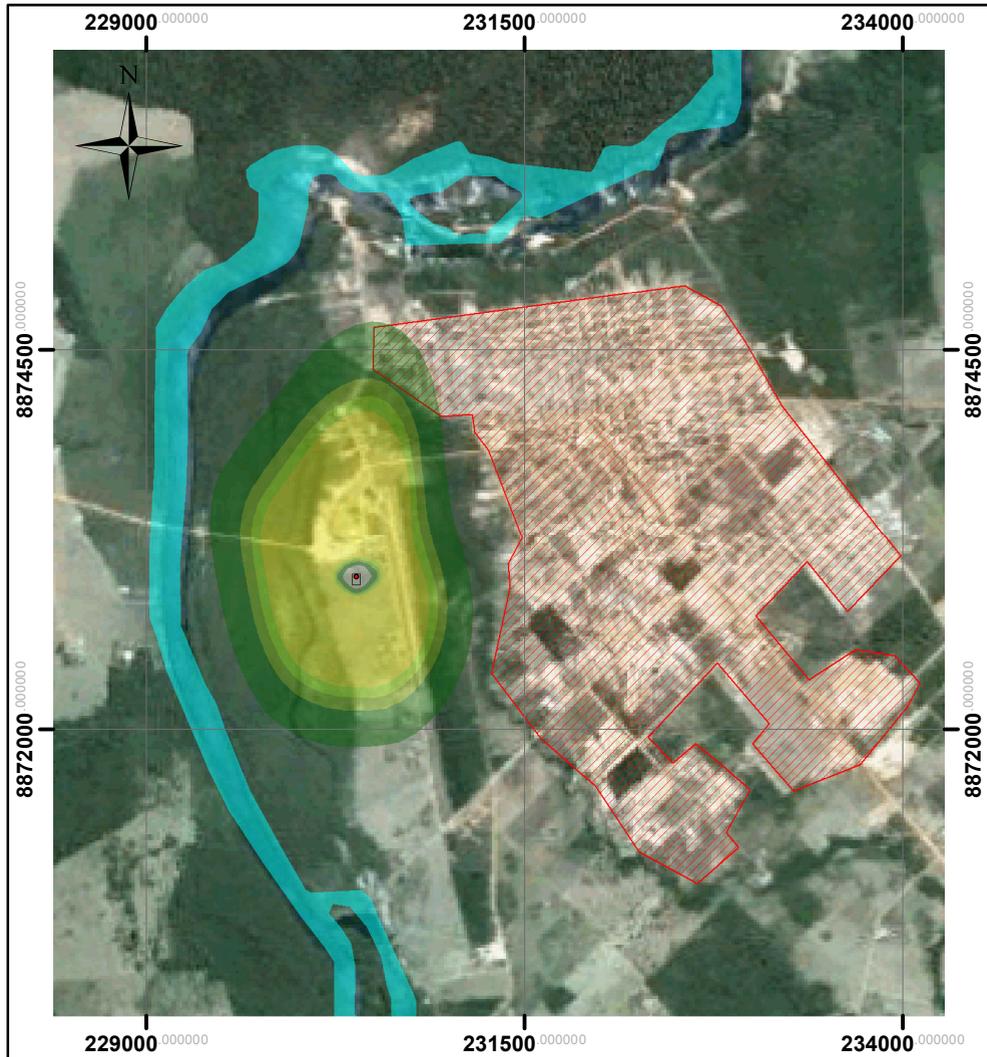
- | | |
|--------------------------|-------------------------|
| ● Chaminé - UTE Guaçu | MP10 - 24h (Cenário 01) |
| Hydrografia | 2 |
| Mancha urbana - Aripuanã | 1 |
| | 0.9 |
| | 0.7 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de MP10 - Período anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

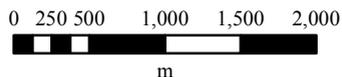


Convenções Cartográficas

- | | |
|--------------------------|--------------------------|
| Chaminé - UTE Guaçu | MP10 - Anual (Cenário01) |
| Hidrografia | 0.3 |
| Mancha urbana - Aripuanã | 0.2 |
| | 0.1 |
| | 0.09 |
| | 0.08 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mesmo sendo o cenário mais crítico, o Cenário 01 apresentou concentrações baixas para todos os poluentes estudados dentro do domínio de modelagem.

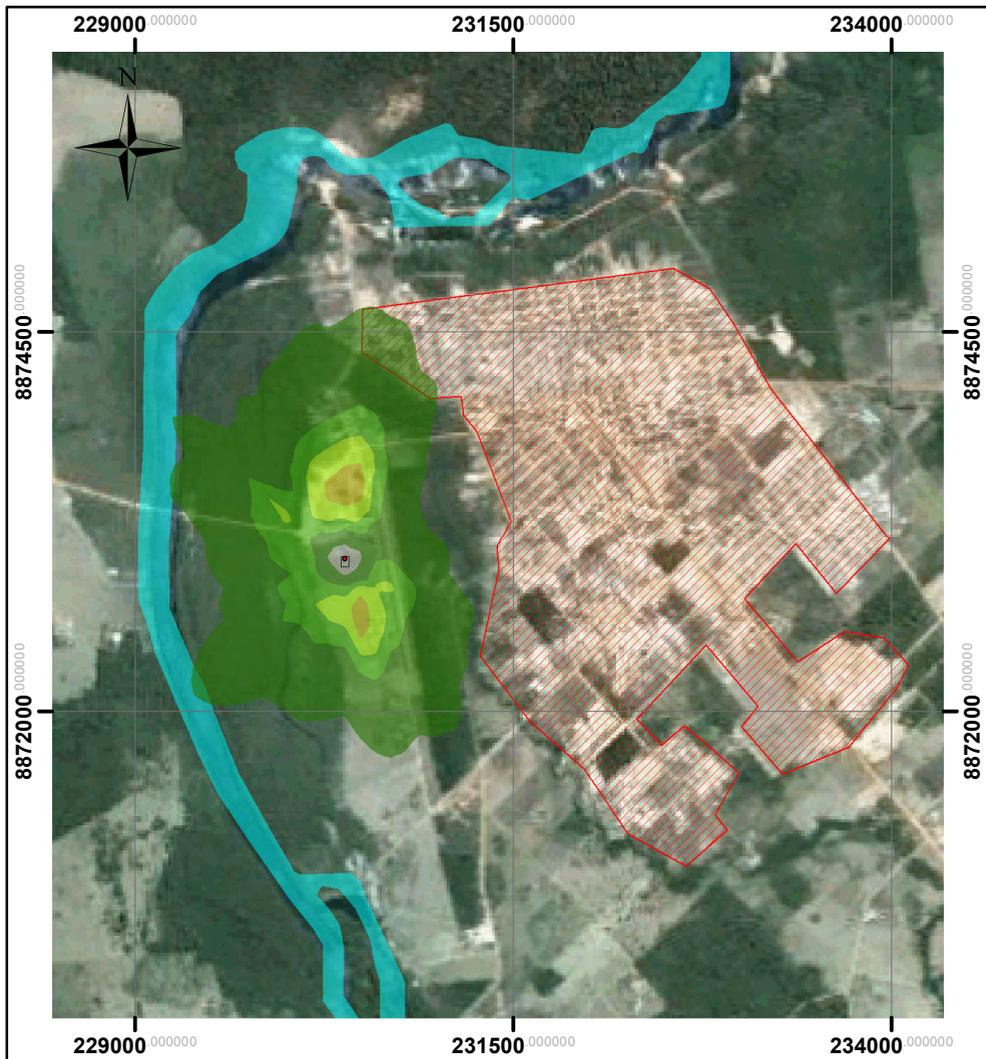
Nenhum dos parâmetros ultrapassou os padrões de qualidade do ar estabelecidos pela legislação, os quais ultrapassados podem apresentar riscos à população. É importante ressaltar que, mesmo relativamente baixas, as maiores concentrações encontradas situam-se fora da mancha urbana da cidade de Aripuanã.

A Tabela 19, abaixo, apresenta as dez maiores concentrações modeladas referentes ao Cenário 02. Na sequência apresenta-se os mapas de isoconcentração.

Tabela 19 - Maiores concentrações modeladas para o Cenário 02

Ordem	SO _x	NO _x	MP ₁₀	CO
1	0.0669	5.6590	0.1328	15.4726
2	0.0633	4.2643	0.1301	11.6594
3	0.0621	2.7765	0.1195	7.5914
4	0.0606	2.2866	0.1173	6.2520
5	0.0593	1.9606	0.1171	5.3606
6	0.0589	1.9535	0.1152	5.3413
7	0.0584	1.9170	0.1120	5.2415
8	0.0583	1.9138	0.1092	5.2328
9	0.0583	1.8970	0.1077	5.1868
10	0.0580	1.8931	0.1075	5.1760

Mapa de isolinhas de concentração de SOx - Período de 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

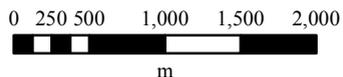


Convenções Cartográficas

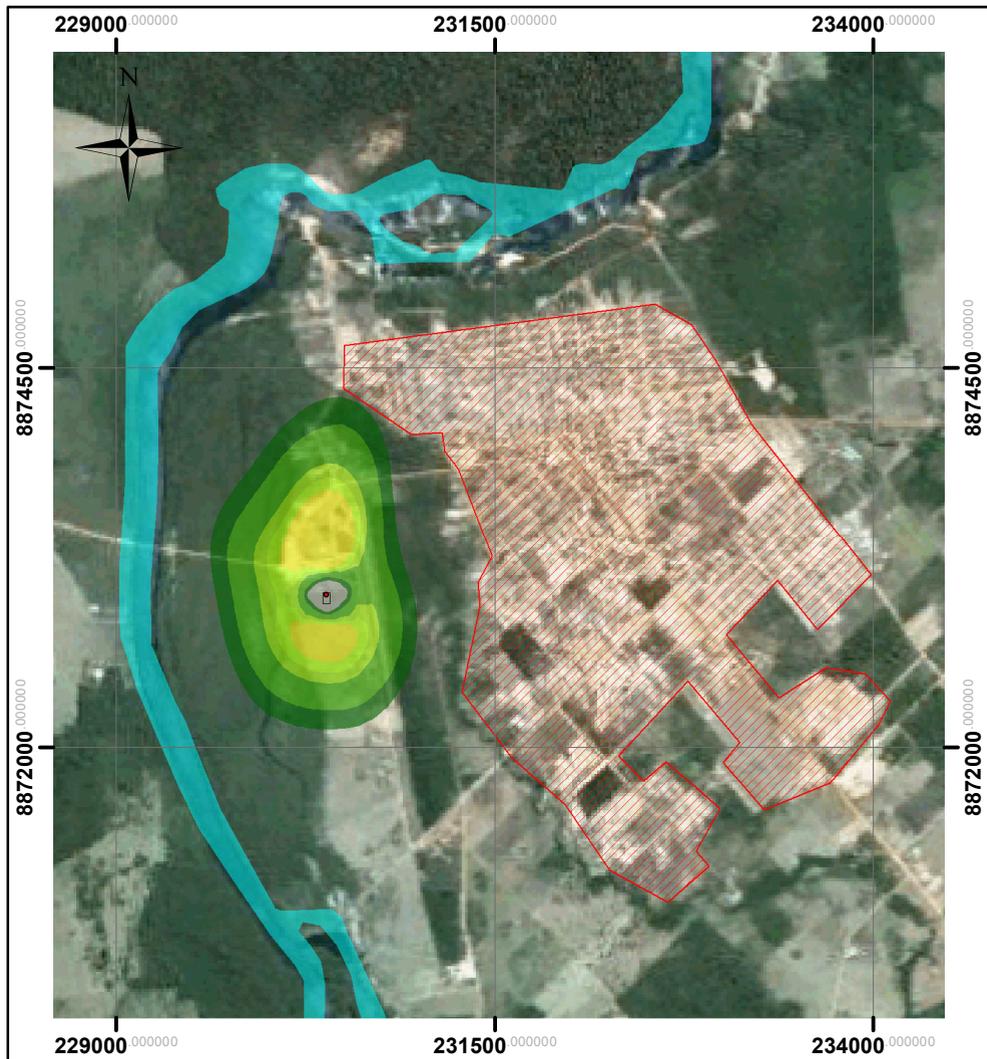
- | | |
|--|--|
|  Chaminé - UTE Guaçu | SOx - 24h (Cenário 02) |
|  Hidrografia |  0.07 |
|  Mancha urbana - Aripuanã |  0.06 |
| |  0.05 |
| |  0.04 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de SOx - Período anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

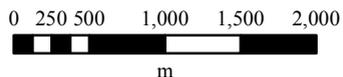


Convenções Cartográficas

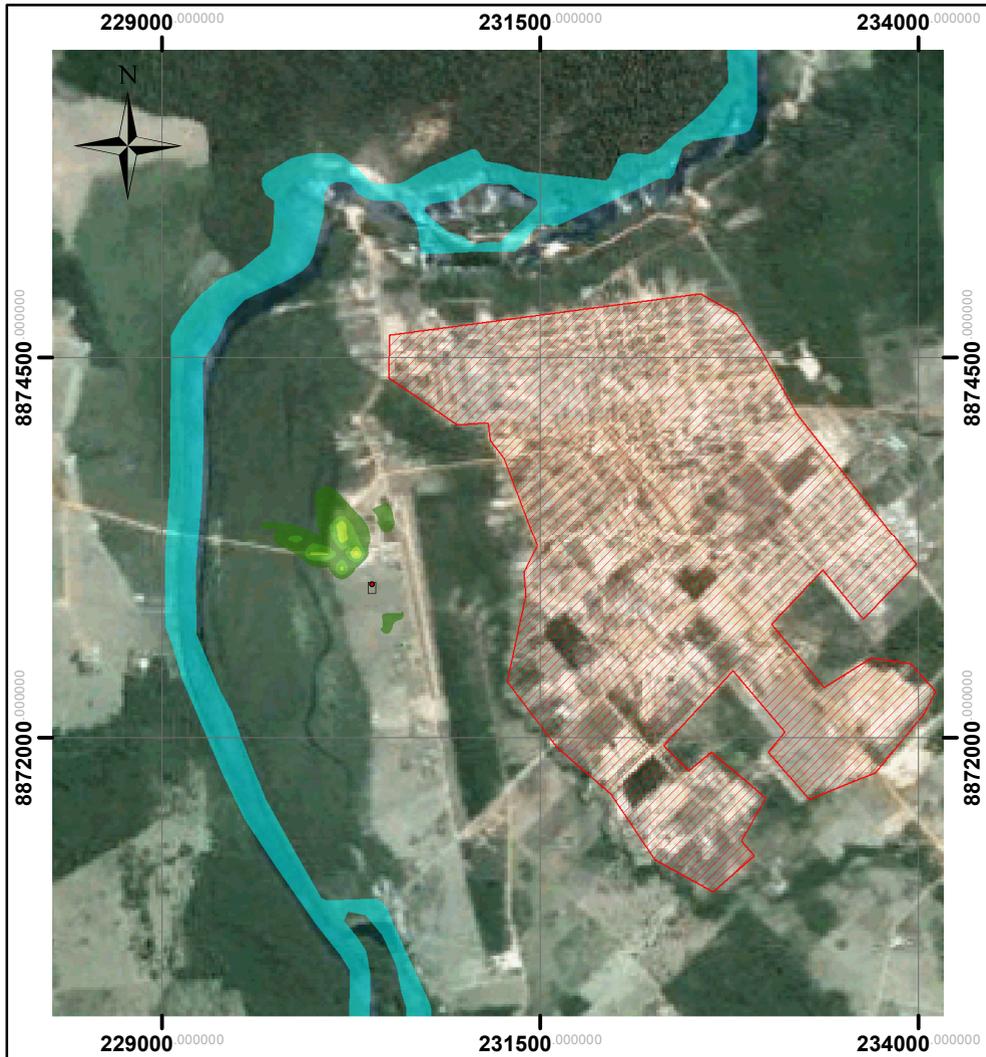
- | | |
|--|---|
|  Chaminé - UTE Guaçu | SOx - Anual (Cenário 02) |
|  Hidrografia |  0.02 |
|  Mancha urbana - Aripuanã |  0.01 |
| |  0.009 |
| |  0.008 |
| |  0.006 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de NOx - Período de 1h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

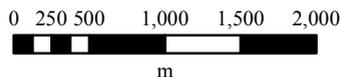


Convenções Cartográficas

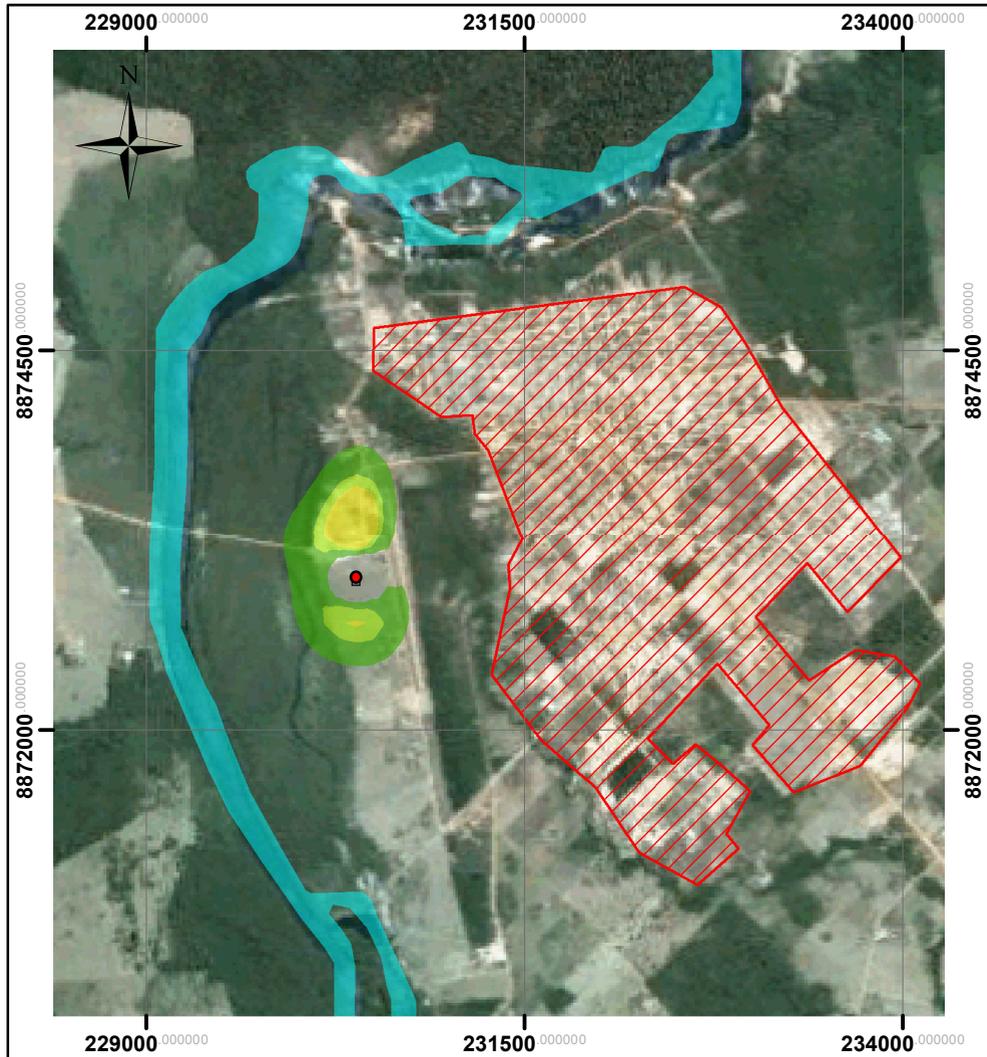
- | | |
|--------------------------|-----------------------|
| Chaminé - UTE Guaçu | NOx - 1h (Cenário 02) |
| Hidrografia | 6 |
| Mancha urbana - Aripuanã | 5 |
| | 4 |
| | 3 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Mapa de isolinhas de concentração de NOx - Período anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

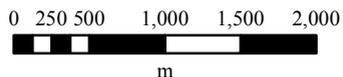


Convenções Cartográficas

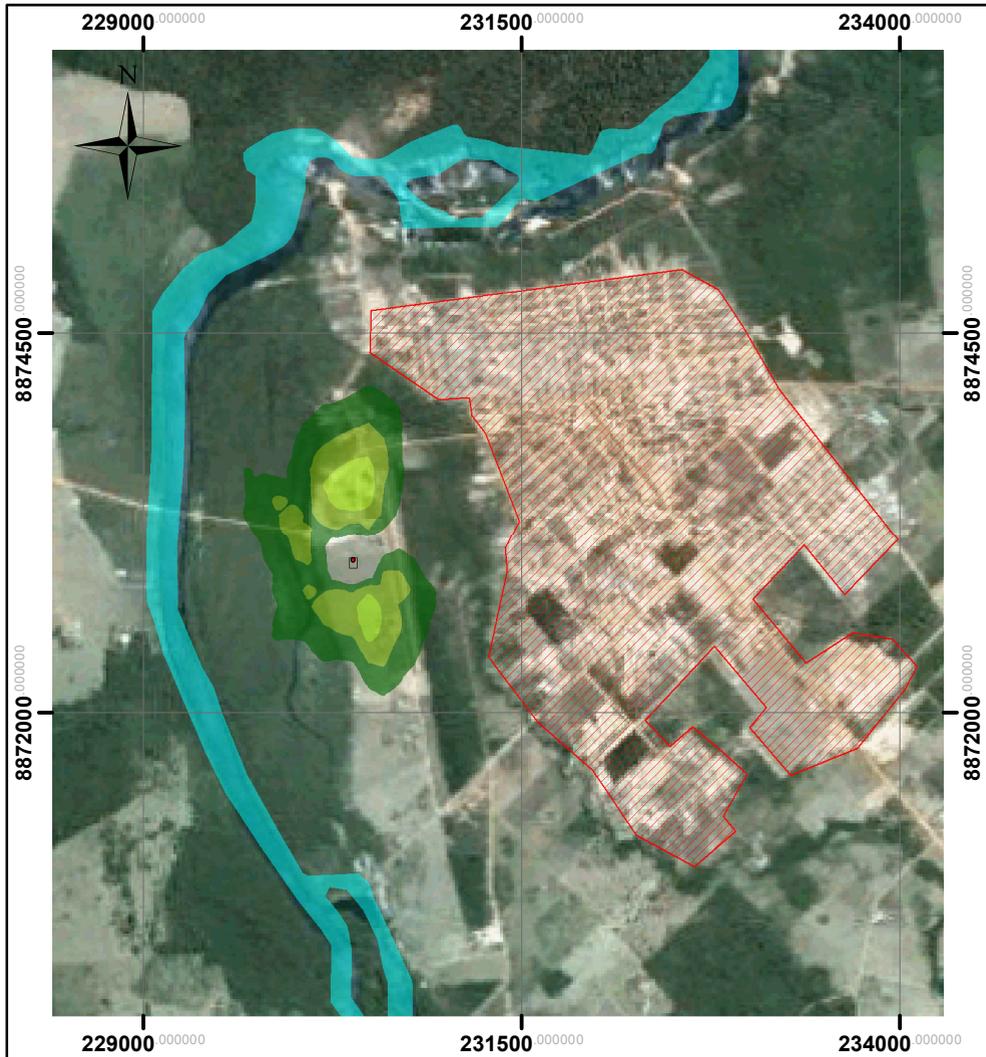
- | | |
|---|--|
|  Chaminé - UTE Guaçu | NOx - Anual (Cenário 02) |
|  Hidrografia |  0.3 |
|  Mancha urbana - Aripuanã |  0.2 |
| |  0.1 |
| |  0.09 |
| |  0.08 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



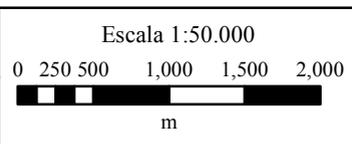
Mapa de isolinhas de concentração de MP10 - Período de 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



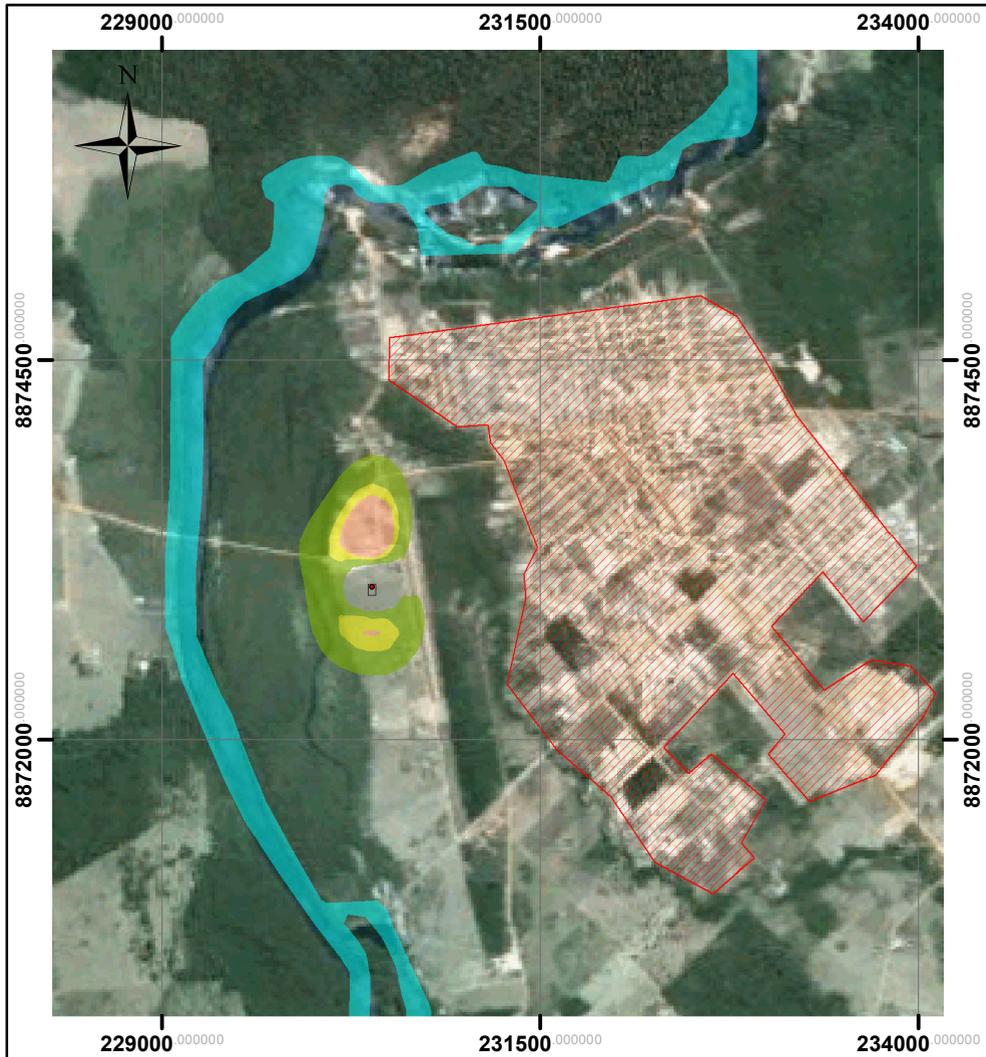
Convenções Cartográficas

- Chaminé - UTE Guaçu
- MP10 - 24h (Cenário 02)
- Hydrografia
- Mancha urbana - Aripuanã
- 0.4
- 0.5
- 0.6

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD



Mapa de isolinhas de concentração de MP10 - Período anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

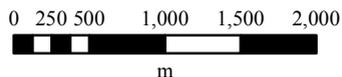


Convenções Cartográficas

- | | |
|--|--|
|  Chaminé - UTE Guaçu | MP10 - Anual (Cenário 02) |
|  Hidrografia |  0.3 |
|  Mancha urbana - Aripuanã |  0.2 |
| |  0.1 |
| |  0.09 |
| |  0.08 |

Fonte dos Dados:
Hidrografia - IBGE (2010)
Imagem - Google, georreferenciada
Saída do modelo AERMOD

Escala 1:50.000



Da mesma forma como no Cenário 01, o Cenário 02 apresentou baixas concentrações dos poluentes estudados. Este fato era esperado visto que os fatores de emissão adotados no Cenário 01 foram mais conservadores.

O Cenário 02 apresentou os fatores de emissão que melhor representam as condições normais de operação da UTE em questão, as baixas concentrações encontradas indicam um impacto ambiental de baixa magnitude, tendo em vista a ordem de grandeza das mesmas face à legislação ambiental vigente.

7. Conclusões e recomendações finais

Os resultados obtidos na modelagem de dispersão da UTE Guaçu indicam uma baixa concentração de poluentes atmosféricos oriundos dessa fonte.

As baixas concentrações encontradas devem-se à (relativamente) baixa potência da usina em conjunto com a altura da chaminé que se mostrou apropriada.

As concentrações de MP_{10} encontradas não ultrapassaram 10% do padrão primário em nenhum momento, sendo que o valor mais alto encontrado foi de $10,32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (média máxima para 1h), equivalente a 21% do padrão primário para as médias anuais. As concentrações de pico apresentam-se nas adjacências da fonte, de modo que a influência sobre a mancha urbana é deveras reduzida.

Para o poluente NO_x , as concentrações encontradas foram baixas. O maior valor encontrado, $12,61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para máximas horárias corresponde a 13% do limite legal para as médias anuais. Da mesma forma como para o MP_{10} , os picos de concentrações situaram-se ao redor da fonte.

A modelagem de SO_x retornou uma concentração de pico de $0,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para todo o período de modelagem. Essa concentração equivale a 2% do padrão primário para as médias anuais, ou seja, praticamente irrelevante. Assim como os outros poluentes modelados, as concentrações de pico de SO_x situaram-se no entorno da fonte, estendendo-se por um raio de cerca de 1km, não atingindo a mancha urbana próxima.

A mais alta concentração de CO encontrada equivale a 0,04% do padrão primário de qualidade do ar para 1h. Por esse motivo considerou-se irrelevante a apresentação dos mapas.

As Tabelas 18 e 19 apresentam as 10 maiores concentrações encontradas em cada modelagem. Percebe-se que os valores diminuíram significativamente nos quatro eventos mais críticos, refletindo uma baixa periodicidade de eventos críticos, salvo em eventos isolados.

Vale ressaltar que os resultados da simulação aqui expostos não refletem a realidade do local, uma vez que não levam em conta a concentração de fundo já existente, tampouco a presença de outras fontes de poluição.

Embora a fonte esteja próxima da cidade, as concentrações mais críticas encontradas situam-se fora da mancha urbana mais densa, de

forma que menor parcela da população será afetada diretamente pela pluma de dispersão na maior parte do tempo.

A dispersão de poluentes tende a seguir a direção predominante do vento, uma vez que as simulações retornaram resultados com as maiores concentrações inexoravelmente a norte da fonte.

Os dados meteorológicos utilizados foram adaptados da estação meteorológica de Cotriguaçu, a cerca de 130 km da fonte. As condições meteorológicas podem variar grandemente com essa distância, de modo que o ideal para a simulação em questão seria realizar um monitoramento meteorológico e de qualidade do ar no local durante um ano completo para obterem-se resultados mais consistentes.

8. Ref. Bibliográficas

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Atlas da energia elétrica do Brasil**. 3 ed. 236p. Brasília: ANEEL, 2008.

BOÇON, Fernando Tadeu. **Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**. 308p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1998.

BOUBEL, Richard William; FOX, Donald L.; TURNER, D. Bruce; STERN, Arthur C. **Fundamentals of Air Pollution**. 3 ed. San Diego: Elsevier, 1994.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº005/1989: Institui o Programa Nacional de Controle da Qualidade do AR (PRONAR)**. Brasília, 1989.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº003/1990: Estabelece os padrões de qualidade do ar**. Brasília, 1990.

CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente). **Resolução nº382/2006: Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas**. Brasília. 2006.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano decenal de expansão de energia – PDE 2020**. Rio de Janeiro, 2011.

EPA (United States Environmental Protection Agency). **AERMOD: Description of Model Formulation**. EPA-454/R-3-004, 91 p., 2004.

EPA (United States Environmental Protection Agency). **Compilation of air pollutant emission factors: External Combustion Sources**. Research Triangle Park, 2003. Cap. 01, seção 02 e 06.

EPA (United States Environmental Protection Agency). **Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications**. EPA-454/R-99-005 Research Triangle Park, 2000.

EPA (United States Environmental Protection Agency). **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS)**. 2011. Disponível em <http://www.epa.gov/air/criteria.html>. Data de acesso: 27/11/2013

EU (União Europeia). Diretiva nº 2008/50/CE, de 21 de Maio de 2008. **Relativa à Qualidade do Ar e à um Ambiente Mais Limpo**. Parlamento Europeu, 2008.

GODOY, Maria Luiza Duarte Pinto. **Avaliação do impacto ambiental causado pela emissão atmosférica de elementos traço pelo complexo termelétrico Jorge Lacerda, Capivari de Baixo, SC**. 169p. Tese (Doutorado em Concentração de Química Analítica Inorgânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro-RJ, 2001.

HOINASKI, Leonardo. **Avaliação de métodos de identificação de fontes emissoras de material particulado inalável (MP₁₀)**. 135p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

JACOBSON, Mark Z. **Fundamentals of Atmospheric Modeling**. 2 ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

MARTINS, Renata Fátima. **Avaliação da qualidade das águas de chuva de Florianópolis, Tubarão, Criciúma e São Martinho, com ênfase na caracterização das influências marinhas e continentais simuladas utilizando o modelo HYSPLIT**. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2008.

MELO, Eloi. **Notas de aula: Fundamentos da modelação matemática da dispersão de poluentes na atmosfera**. 1994.

MENEZES, Paulo Sérgio Ferreira de. **Validação do modelo matemático ISCST3 de dispersão atmosférica a partir das emissões de dióxido de enxofre de uma refinaria**. 175p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2006.

MORAES, Marcelo Romero de. **Ferramenta para a Previsão de Vento e Dispersão de Poluentes na Micro-Escala Atmosférica**. 141p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MOREIRA, Davidson; TIRABASSI, Tiziano. **Modelo matemático de dispersão de poluentes na atmosfera: Um instrumento técnico para a gestão ambiental**. Ambiente & sociedade. São Paulo, ano 2, v. 7, 01 jul. 2004.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta; LORA, Electo Eduardo Silva. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

PEPPER, Ian L.; GERBA, Charles P.; BRUSSEAU, Mark L. **Environmental Pollution Science**. 2 ed. Ariona; Elsevier, 2006.

TADANO, Yara S.; MAZZA, Ricardo A.; TOMAZ, Edson. **Modelagem da dispersão de poluentes atmosféricos no município de Paulínia (Brasil) empregando o ISCST3**. Mecânica computacional. Buenos Aires, p.8125-8148. 15 nov. 2010.

TOTSUN, Ismael. **Modelling in Transport Phenomena: A Conceptual Approach**. 2 ed. Washington: Elsevier, 2006.

WALLACE, John Michael; HOBBS, Peter Victor. **Atmospheric Science: An Introductory Survey**. 2 ed. Washington: Elsevier, 2002.