R. Ra'e Ga
Curitiba, v.46, N. 2, p. 74 –87 , Mai/2019

DOI: 10.5380/raega
eISSN: 2177-2738

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA NUVEM TÓXICA GERADA COM A EXPLOSÃO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES NA CIDADE DE CUBATÃO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

NUMERICAL SIMULATION OF THE TOXIC CLOUD BEHAVIOR GENERATED BY THE EXPLOSION OF THE FERTILIZER INDUSTRY IN CUBATÃO CITY, STATE OF SÃO PAULO, BRAZIL

Marina Aires[1], Jorge Luiz Fernandes de Oliveira[2], José Maria de Castro Junior[3],

RESUMO

O presente artigo analisa o comportamento da atmosfera entre os dias 05 e 06 de janeiro de 2017 no município de Cubatão, litoral do estado de São Paulo, pois ocorreu um incêndio de grandes proporções na Vale Fertilizantes, que originou uma nuvem tóxica devido ao vazamento de gases derivados de amônia que, ao reagirem com a água da chuva ocasionaram uma série de explosões, emissão de poluentes e a contaminação do Rio Perequê, vizinho à fábrica. O incêndio se iniciou após uma explosão na área de armazenamento da unidade e mobilizou bombeiros da própria cidade e quartéis das cidades de Santos, Guarujá e São Vicente. A nuvem tóxica gerada com o incêndio atingiu cidades da Região Metropolitana da Baixada Santista e provocou a mobilização da população residente no entorno da empresa. O presente artigo tem como objetivo apresentar as simulações realizadas com o modelo numérico BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System), inicializado com a Reanálise 1 disponibilizada pelos National Center for Environmental Prediction (NCEP) e National Center for Atmospheric Research (NCAR) para simular o campo de vento e a partir deste inicializar o modelo de Trajetória Cinemática 3D (TC3D) para calcular as trajetórias seguidas pelos poluentes emitidos com as explosões. As simulações do BRAMS mostraram que o comportamento da atmosfera no horário da explosão minimizou a exposição da população aos gases tóxicos. As trajetórias dos poluentes calculadas com o TC3D mostraram que os poluentes atingiram o Oceano Atlântico adjacente em baixa altitude.

Palavras-chave: Poluição Atmosférica, Nuvem tóxica, BRAMS, TC3D.

ABSTRACT

This article analyzes the behavior of the atmosphere between January 5th and 6th, 2017, in the municipality of Cubatão, on the coast of the state of São Paulo due to a large fire at Vale Fertilizantes, which caused a toxic cloud due to the leakage of gases derived from ammonia that when reacted with the rainwater caused a series of explosions, emission of pollutants and the contamination of the Perequê River, next to the factory. The fire started after an explosion in the storage area of the unit and mobilized city firefighters and barracks from the cities of Santos, Guarujá and São Vicente. The toxic cloud generated by the fire hit cities in the Metropolitan Region of Baixada Santista and caused the mobilization of the resident population around the company. The present paper aims to present the simulations carried out with the Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS), initialized with Reanalysis 1 provided by the National Center for Environmental Prediction (NCEP) and the National Center for Atmospheric Research (NCAR) to simulate the wind field and from there to initialize the 3D Kinematic Trajectory (TC3D) model to calculate the trajectories followed by the pollutants emitted with the explosions. The BRAMS simulations showed that the behavior of the atmosphere at the time of the explosion minimized the exposure of the population to toxic gases. The trajectories of the pollutants calculated with TC3D showed that pollutants reached the adjacent Atlantic Ocean at low altitude.

Key-words: Atmospheric Pollution, Toxic cloud, BRAMS, TC3D.

Recebido em: 07/02/2018

Aceito em: 16/04/2019

[1] *Universidade Federal Fluminense, Niterói/Rio de Janeiro, e-mail: marinageouff@gmail.com*
[2] *Universidade Federal Fluminense, Niterói/Rio de Janeiro, e-mail: jorgeo@id.uff.br*
[3] *Universidade Federal Fluminense, Niterói/Rio de Janeiro, e-mail: jmcjunior@id.uff.br*

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA NUVEM TÓXICA GERADA COM A EXPLOSÃO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES NA CIDADE DE CUBATÃO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

1. INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, a poluição atmosférica tem se tornado um fator de risco extremamente perigoso para a saúde humana, especialmente nos centros urbanos industrializados. A partir de meados do século XX, medidas foram adotadas em diferentes países para controle das emissões de poluentes atmosféricos, objetivando, inicialmente, a redução de episódios com elevada concentração de poluentes. Os padrões de qualidade do ar adotados a princípio estabeleciam níveis de concentração de poluentes mais elevados. Entretanto, com o aumento do número de pesquisas epidemiológicas, observa-se que mesmo com concentrações abaixo do limite de segurança estabelecido pela legislação vigente, os poluentes atmosféricos podem acarretar efeitos deletérios à saúde humana (BRAGA *et al*., 2011). "Estudos realizados nos Estados Unidos demonstraram que pessoas asmáticas sofrem mais com a doença quando estão expostas a poluentes" (BAIRD e CANN, 2008).

A indústria de fertilizantes, que pertence ao setor petroquímico, produz uma larga gama de compostos químicos e são conhecidas como geradoras de efluentes contendo uma larga gama de compostos químicos (UNEP, 1998). A produção de fertilizantes ocasiona a emissão atmosférica de material particulado: tetrafluoreto de silício (SiF_4), fluoreto de hidrogênio (HF), amônia (NH_3), óxidos de enxofre (SOx), óxidos de nitrogênio (NOx). Dentre esses compostos, a amônia é utilizada para a produção de fosfato de amônio juntamente com os ácidos sulfúrico, fosfórico e nítrico, que constituem matérias-primas básicas largamente utilizadas nos processos de produção de fertilizantes.

Os fertilizantes estão definidos na legislação brasileira (Decreto 86.955, de 18 de fevereiro de 1982) como substâncias minerais ou orgânicas, naturais ou sintéticas, fornecedoras de um ou mais nutrientes para as plantas. Os fertilizantes nitrogenados têm em sua composição o nitrogênio como nutriente principal e se originam da fabricação da amônia anidra (NH_3), matéria-prima básica de todos os nitrogenados sintéticos. O fosfato de monoamônio (MAP) e o fosfato de diamônio (DAP) são os principais compostos utilizados na indústria de fertilizantes e resultam da reação de neutralização do ácido fosfórico pela amônia, que pode ser utilizada também na produção de superfosfato simples amoniado (DIAS e FERNANDES, 2006). Essa indústria desenvolve inúmeras atividades que vão desde a extração de matéria-prima até a produção de compostos que serão diretamente aplicados na atividade agrícola (FEAM, 2010).

Segundo Costa & Oliveira e Silva (2012), as primeiras fábricas de fertilizantes surgiram em 1940. Até o início da década de 1960 as importações atendiam à demanda interna de matérias-primas. A partir de 1970 foi implementado o I Plano Nacional de Fertilizantes, quando se iniciou uma nova fase com incentivos do governo. Nos anos 1990 ocorreu a primeira privatização do setor. No Brasil apenas quatro empresas têm acesso às matérias-primas básicas para a produção dos fertilizantes básicos e intermediários. A Petrobras é a única fornecedora de gás natural como matéria-prima para a indústria e a principal produtora de amônia destinada à produção de fertilizantes, dividindo o mercado com a Vale Fertilizantes.

A amônia é um dos insumos mais consumidos no mundo (LUYBEN, 2012), dada a sua utilidade em diversos setores econômicos. Em termos comerciais, a amônia se apresenta na forma anidra ou em solução aquosa e precisa ser armazenada a baixas temperaturas ou em altas pressões devido sua alta volatilidade. A relevância mundial da amônia para vários setores econômicos inclui a base para produtos de limpeza doméstica e industrial, produção de fertilizantes nitrogenados e síntese de fármacos (LUYBEN, 2012). A amônia anidra representa 82% de toda matéria prima necessária para a produção de

fertilizantes nitrogenados, críticos no cultivo das principais culturas do país (PRATA *et al*., 2015).

A amônia tem odor forte e característico e é irritante às mucosas (Resolução nº 382, de 26 de dezembro de 2006). A sua inalação provoca efeitos graves à saúde humana, principalmente ao aparelho respiratório, causando dificuldade respiratória, queimaduras nas mucosas da boca, faringe, laringe, constrição, dor torácica e salivação, além de provocar irritação extrema nos olhos (FOSFÉRTIL, 2014). A inalação de material particulado derivado da amônia ao serem respirados se dirige aos alvéolos pulmonares, desencadeando doenças respiratórias graves, como bronquite crônica, asma e o quadro respiratório pode evoluir com edema e espasmo da glote, asfixia, cianose, edema pulmonar, parada respiratória e morte (BORSARI, 2014). Dependendo do tempo e do nível de exposição, podem ocorrer problemas graves na pele, causando queimaduras. Pode causar ainda danos à fixação de oxigênio pela hemoglobina devido ao aumento no pH do sangue (BORSARI, 2014).

Atualmente o desenvolvimento tecnológico e a urbanização têm gerado impactos crescentes no meio-ambiente. Energia e poluentes são lançados nos ecossistemas, onde podem causar impactos consideráveis, podendo ser irreversíveis. A modelagem ambiental tem se desenvolvido desde o século passado não somente devido ao desenvolvimento tecnológico, mas também pela importante necessidade de quantificação. O desenvolvimento computacional, o melhor entendimento dos problemas relativos à poluição e seus impactos contribuíram para o desenvolvimento dessa ciência (REZENDE & DIAS, 2005).

Os modelos para estudos da química da atmosfera são adaptados para solucionar problemas complexos, como por exemplo, a dispersão de poluentes sobre topografia complexa ou a difusão de poluentes reativos. Eles se baseiam na resolução numérica sobre uma grade espaço-temporal fixa da equação da conservação de massa de uma espécie química poluente. Os principais modelos são os Eulerianos, Lagrangeanos e Gaussianos (MOREIRA & TIRABASSI, 2004).

Entre os modelos Eulerianos, o modelo box constitui a aproximação matemática mais simples porque ignora a estrutura espacial do fenômeno. O poluente presente no box provém da fonte interna, da contribuição externa transportada pelo vento ou flui através do topo em consequência da variação de altura do box, que geralmente coincide com a altura da camada limite

> Os modelos Lagrangeanos se diferenciam dos Eulerianos porque utilizam um sistema de referência que segue o movimento da atmosfera. Inicialmente, com o termo Lagrangeano indicava-se somente o modelo box com box "móvel", que segue a trajetória do vento médio. Atualmente, compõem esta classe todos os modelos que acompanham a nuvem de poluentes em "elementos" discretos, como segmento "puff" ou partículas fictícias. Nos modelos de partículas, a dispersão de um poluente é simulada através do movimento de partículas cujas trajetórias permitem calcular o campo de concentração da substância imersa, a partir da hipótese básica de que a trajetória destas partículas simula o percurso das partículas do ar situado na mesma posição no instante inicial. Os movimentos destas partículas podem ser reproduzidos de modo determinístico e em modo estocástico (MOREIRA & TIRABASSI, 2004).

Sabendo-se da importância da atmosfera como receptora, modificadora e transmissora de poluentes o objetivo deste artigo é calcular o campo de vento e calcular a trajetória dos poluentes gerados no incêndio ocorrido na empresa Vale Fertilizantes, localizada na cidade de Cubatão, em 05 de janeiro de 2017, utilizando um modelo atmosférico de área limitada e um modelo de trajetórias cinemáticas.

A cidade de Cubatão, situada no Estado de São Paulo, é um dos polos industriais mais importantes do país, composto por indústrias do setor petroquímico, siderúrgico e

de fertilizantes. Na década de 1970 e 1980, ficou conhecida como uma das cidades mais poluídas do mundo em função das grandes emissões industriais, do relevo acidentado e de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes (FREITAS *et al*., 2013).

2. ÁREA DE ESTUDO

Cubatão (Figura 1) faz parte da Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS), juntamente com os municípios de Santos, Bertioga, Guarujá, Itanhaém, Mongaguá, Peruíbe, Praia Grande e São Vicente. O município possui território de aproximadamente 142 km^2, que se estende desde o mar, no Estuário de Santos, até o Planalto Paulista, abrangendo uma diversidade geomorfológica que inclui extensos manguezais, pequenos morros, montanhas e escarpas da Serra do Mar, compreendendo uma amplitude altimétrica que vai do nível do mar até montanhas entre 700 e 1.000 metros (DAEE, 2010; ALVES, 2013).

Figura 1 – Localização do município de Cubatão (SP).

A respeito das estações de monitoramento do município, FREITAS *et al*. (2009), ressalta que:

> As três estações de monitoramento da qualidade do ar operadas pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e localizadas na área industrial (Vila Parisi); no centro da cidade; e no Bairro Vale do Mogi, medindo as concentrações horárias de material particulado (PM10), ozônio (O3), dióxido de nitrogênio (NO2), dióxido de enxofre (SO2) além da medição de variáveis meteorológicas, como a temperatura e a umidade.

A industrialização da Cidade de Cubatão se iniciou com as indústrias pioneiras no setor agrícola na primeira metade do século XX. Nos anos de 1940, com a construção da Via Anchieta, o desenvolvimento industrial da região começou a se desenvolver e a chegada de empreendimentos foram registrados, como a implantação da Refinaria Presidente

Bernardes, inaugurada em 1955, e da Companhia Siderúrgica Paulista, em 1959, e a formação do primeiro Polo Petroquímico Brasileiro, com a instalação de quatro grandes indústrias transnacionais. Na década de 1960 a cidade tinha dezoito grandes indústrias, sendo uma refinaria, uma siderúrgica, sete de fertilizantes e nove de produtos químicos (IBGE, 2019). IBGE (2019) ressalta que Cubatão possui vinte e cinco empresas de grande porte, próximas ao Porto de Santos e ao sistema rodoviário Anchieta-Imigrantes, sendo o maior Polo Industrial da América Latina.

Durante o início da década de 80 a cidade era mundialmente conhecida como "Vale da Morte", sendo apontada pela Organização das Nações Unidas (ONU) como o município mais poluído do mundo. Em 1984 um incêndio na Vila Socó e em 1985 o vazamento de amônia na Vila Parisi obrigaram as autoridades a adotar políticas públicas mais restritivas para a emissão de poluentes (BRAGA *et a*l., 2011).

Segundo Ferreira (2006), Cubatão foi um marco na politização da questão ambiental no Brasil por dois motivos: em primeiro lugar, por apontar a dimensão e a gravidade dos riscos ambientais de processos produtivos em países desenvolvimentistas daquele período histórico; em segundo, por desnudar um acordo social perverso, que agregava ricos e pobres, direita e esquerda, governantes e governados, em torno do descaso por políticas de controle ambiental durante a implantação da industrialização no país. O cruzamento desses dois motivos fez de Cubatão o símbolo de um *turning point* nas condutas coletivas e no comportamento político frente à questão ambiental no país.

3. O INCÊNDIO

O incêndio na Unidade 2 da Vale Fertilizantes, na tarde do dia 05 de janeiro de 2017 em Cubatão, atingiu o litoral do Estado de São Paulo. O fogo começou após uma explosão na área de armazenamento da unidade e mobilizou bombeiros da própria cidade e quartéis das cidades de Santos, Guarujá e São Vicente. Às 16 horas a própria Vale confirmou um vazamento de nitrato de amônio (NH4NO3) e os trabalhadores da fábrica foram evacuados emergencialmente do local. Uma nuvem tóxica de cor amarela (Figura 2) foi observada em algumas cidades da RMBS. O incidente foi causado por um incêndio iniciado em uma correia transportadora que alimenta o armazém da unidade de nitrato de amônia (Jornal A Tribuna, 2017). O incêndio consumiu 10 mil toneladas do produto por mais de cinco horas. Mais de 150 familiares da comunidade da Vila Mantiqueira precisaram ser retirados de casa. A empresa Vale Fertilizantes foi multada em R$ 8 milhões, em decorrência da emissão de poluentes na atmosfera e pelo lançamento de efluentes com nitrato de amônio, em curso de água (CETESB, 2017), além da formação de chuva ácida, que contaminou a vegetação da área, segundo os técnicos da CETESB (G1, 2017).

Figura 2 – Imagens do incêndio ocorrido na Unidade 2 da Vale Fertilizantes. (Fonte: http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2017/01/incendio-atinge-unidade-da-vale-fertilizantes-em-cubatao-sp.html).

A Vale Fertilizantes (Figura 3) está situada na Rodovia Cônego Domênico Rangoni (SP-055), importante via de ligação entre os municípios de Santos e Guarujá, no litoral paulista. De acordo com a prefeitura de Cubatão, o incêndio teve início depois das 15 horas, após uma explosão na Planta 2. Segundo a Ecovias, concessionária que administra o Sistema Anchieta-Imigrantes (SAI), por conta do vazamento de produto perigoso em área fora do trecho de concessão, o acesso à Avenida Plínio de Queiroz, que leva à Margem Esquerda do Porto, no Km 248, foi bloqueado nos dois sentidos durante a tarde e liberado no início da noite (G1, 2017).

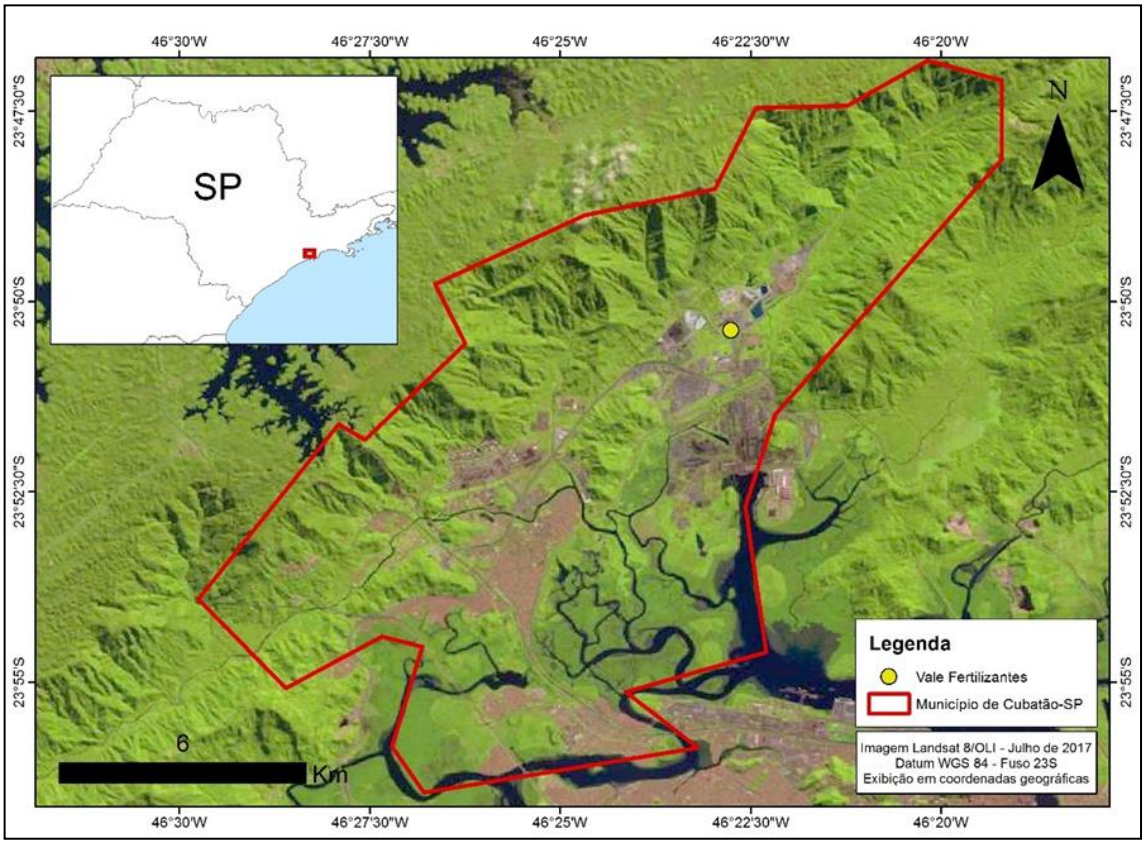

Figura 3 – Localização da Vale Fertilizantes, situada no município de Cubatão (SP).

4. MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia deste trabalho se baseou em duas etapas. Na primeira, realizou-se o levantamento de dados observacionais do comportamento sinótico e de mesoescala para o período entre 05 e 06 de janeiro de 2017, utilizou-se as análise sinóticas, bem como as imagens setorizadas para a Região Sudeste do satélite GOES – 13, no canal de temperatura realçada, disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Ciências Espaciais (CPTEC/INPE) no seguinte endereço eletrônico http://satelite.cptec.inpe.br/home/index.jsp.

Na segunda etapa, realizou-se um experimento numérico com o modelo *Brazilian Regional Atmospheric Modelling System* (BRAMS). Utilizou-se as reanálises baixadas do *National Center for Environmental Prediction e do National Center for Atmospheric Research* (KALNAY *et al.*, 1996). Estes dados estão disponíveis no endereço http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/ e tem informações em quatro horários diários (00, 06, 12 e 18 UTC), médias diárias e médias mensais. No presente artigo, utilizou-se 2 horários, das 18h UTC do dia 05 de janeiro de 2017, o horário do incêndio noticiado pela mídia e das 00h do dia 06 de janeiro de 2017, seis horas após o incêndio.

Para a simulação das condições sinóticas e de mesoescala, utilizando o modelo BRAMS, realizou-se um experimento numérico. O modelo foi inicializado com as reanálises baixadas, com o tempo de integração de 24 horas. Utilizou-se a relaxação Newtoniana, como forma do modelo assimilar os dados no centro, nas laterais e no topo do domínio modelado (*nudging*). A camada limite foi refinada com taxa de *strech* de 1.2. Para o presente artigo, optou-se em utilizar 3 grades

aninhadas, com resoluções de 40 x 40 km (Grade 1), 10 x 10 km (Grade 2) e 2.5 x 2.5 km (Grade 3), centradas nas coordenadas -23.83 S e -43.37 W e o *nudging* de 21.600 na fronteira lateral, 43.200 no centro e 21.600 no topo do domínio. O modelo calculou o campo de vento no nível de 1000 hPa, nos dias 05 e 06 de janeiro de 2017.

A Tabela 1 mostra as configurações das grades utilizadas na pesquisa, juntamente com o passo de tempo e os espaçamentos entre os pontos de grade para manter a estabilidade da simulação.

Número da Grade	Número de pontos em X	Número de pontos em Y	Δx = Δy (km)	Δt (s)
Grade 1 (G1)	35	35	40	60
Grade 2 (G2)	34	34	10	15
Grade 3 (G3)	78	78	2,5	3,75

Tabela 1 – Resumo das Configurações de Grades utilizadas no modelo.

O campo de vento simulado pelo BRAMS foi utilizado para inicializar o modelo de trajetória cinemática 3D (TC3D) (FREITAS, 1999) e calcular as trajetórias seguidas pela nuvem tóxica nos dias 05 de janeiro de 2017 às 18 UTC e no dia 06 de janeiro de 2017 às 00 UTC. As Figuras referentes aos campos de vento simulados com o BRAMS foram elaboradas com auxílio do programa Grid Analysis and Display System (GrADS) (DOTY, 1995).

A análise sinótica foi realizada a partir dos dados do CPTEC/INPE (Análise sinótica e imagens de satélite com temperatura realçada do GOES – 13).

O BRAMS é um modelo regional desenvolvido a partir do Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), sendo um modelo de circulação prognóstico desenvolvido na Universidade do Colorado (EUA), a partir do modelo de mesoescala de PIELKE (1974) e do modelo de nuvens de TRÍPOLI & COTTON (1980). Ele é fundamentado na integração das equações diferenciais, de conservação de momentum, de massa e de energia, com referência a um sistema de coordenadas que segue o terreno. É um modelo complexo que simula qualquer situação de escoamento. O BRAMS possui algumas funcionalidades inéditas e parametrizações especializadas para os trópicos e subtrópicos.

A "novidade" do BRAMS está na parametrização convectiva de Grell (GRELL & DEVENYI, 2002) e de Cumulus rasos (SOUZA, 1999), tornando o modelo mais completo para ser utilizado no Brasil. Por essa razão, foi adicionada a letra B, de Brazilian, ao seu nome, uma vez que o modelo é adaptado para as condições climáticas do Brasil (ALVES, 2006).

As simulações com o modelo BRAMS são realizadas em três etapas: a fase de pré-processamento, a fase de processamento e a fase de pós-processamento, descritas por Alves (2006):

> Na fase de pré-processamento os arquivos de reanálises são baixados da base de dados globais do NCEP/NCAR ou do CPTEC/INPE, os quais contêm dados de grande escala com informações coletadas de diversas estações meteorológicas em todo o mundo. Na fase posterior os dados são tratados para as áreas de interesses, para alimentar o modelo, o que basicamente consiste em converter essas informações em um formato de arquivo para o modelo processar. Uma vez completada a fase de pré-processamento, inicia-se a fase de processamento quando o BRAMS faz as integrações no tempo das variáveis, nas Grades selecionadas. Nessa fase, o modelo roda com as informações configuradas no RAMSIN, gerando os arquivos de análise que contém os dados simulados para as grades escolhidas no período selecionado. Na fase de pós processamento, os dados contidos nos arquivos de análise são convertidos em arquivos que são visualizados graficamente pelo software GRADS.

Após a fase de pós-processamento os resultados simulados pelo modelo, os campos de escoamento, são utilizados para inicializar o modelo de Trajetória Cinemática 3D.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA NUVEM TÓXICA GERADA COM A EXPLOSÃO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES NA CIDADE DE CUBATÃO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

É chamado de trajetória o caminho percorrido por uma parcela de ar durante um período de tempo determinado. As trajetórias são obtidas utilizando-se o método Lagrangeano, que acompanha o movimento das partículas em um referencial variável, ou seja, fixo nas partículas (OLIVEIRA, 2004). Os modelos de trajetórias calculam a direção das parcelas de ar, baseados nos estudos da dinâmica da atmosfera e têm se mostrado uma importante ferramenta para analisar a dispersão de poluentes na atmosfera, muito utilizados em estudos de climatologia. Para o presente artigo foram calculadas trajetórias à frente (forward) para os dias 05 e 06 de janeiro de 2017, sempre partindo do local do incêndio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na análise da carta sinótica de superfície das 00 UTC do dia 05 de janeiro de 2017 (Figura 4a) se observa um sistema frontal com ramo frio atuando sobre o norte da província de Rio Negro e extremo sul de Buenos Aires (Argentina), prosseguindo pelo Atlântico até um ciclone em oclusão com valor de 988 hPa, posicionado em torno de 50°S/55°W.

Na Figura 4b se observa no nível de 500 hPa às 00 UTC do referido dia um padrão de circulação anticiclônica centrado sobre o oceano Atlântico Sul com uma crista sobre parte da Região Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste. Em parte do Centro-Oeste e do Sudeste a forte atuação termodinâmica à superfície e a difluência em altos níveis auxiliam a formação de convecção sobre o Centro-Oeste, São Paulo (SP) e Minas Gerais (MG).

Na Figura 4c, no campo de escoamento no nível de 250 hPa às 00 UTC, observa-se uma área de circulação anticiclônica, associada a alta da Bolívia (AB), onde uma crista se estende em direção ao Sudeste e Sul do Brasil. Nesta configuração se verifica também difluência em altos níveis que contribui para a formação de nebulosidade entre o norte do Rio Grande do Sul (RS) e sul de Minas Gerais (MG). Além do suporte dinâmico ao sistema frontal em altos níveis observa-se a presença do ramo sul do Jato Polar.

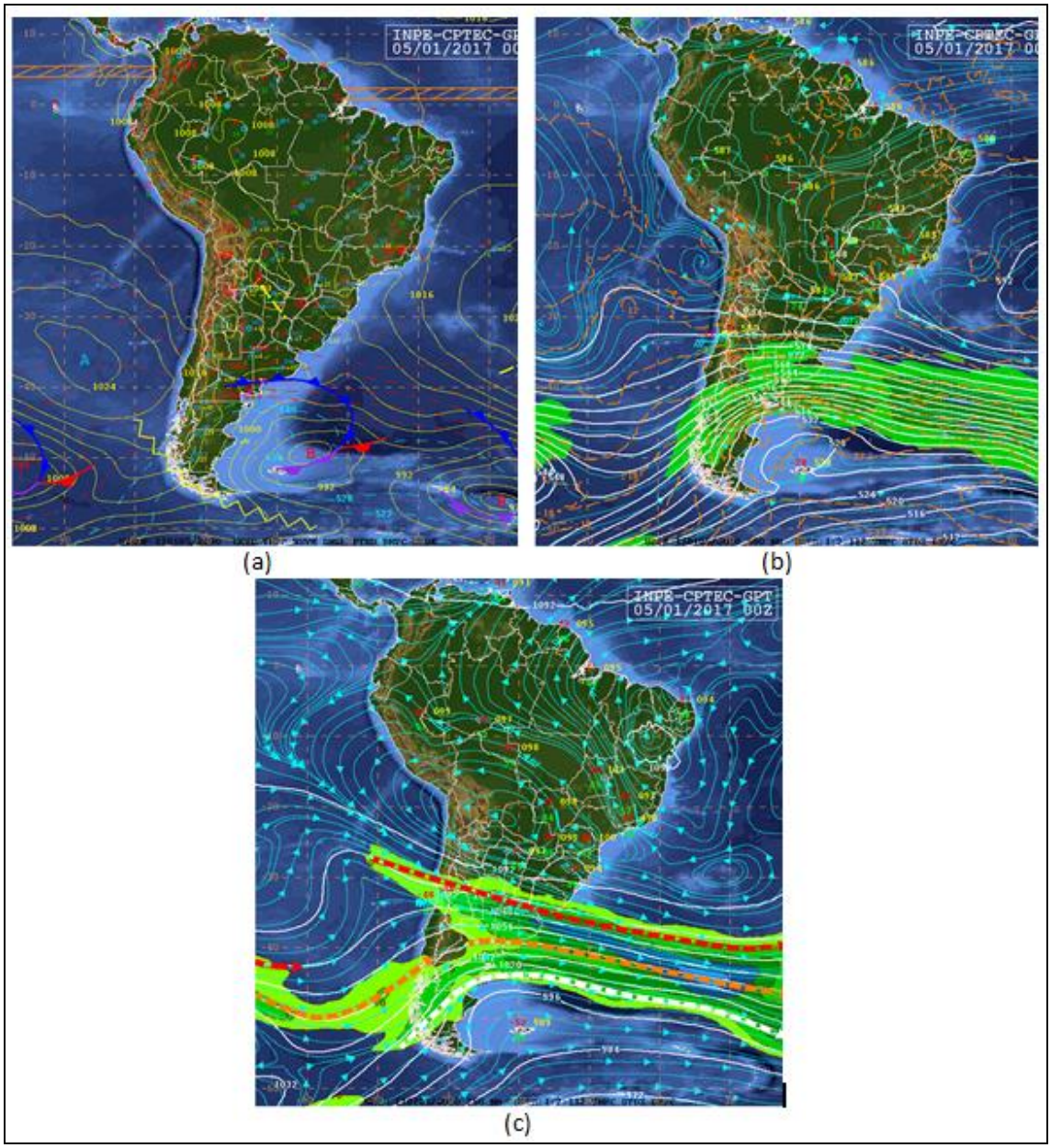

Figura 4 – Cartas Sinótica de Superfície (a), Escoamento em 500 hPa (b), Escoamento em 250 hPa (c) do dia 05 de janeiro de 2017, às 00Z. Fonte: CPTEC/INPE (2017).

Na Figura 6 (A-B), imagens setorizadas para a Região Sudeste do satélite GOES-13 no canal Temperatura Realçada, verifica-se a presença de núcleos convectivos na área de estudo, com temperaturas variando entre -50 e -60°C, indicando presença de nuvens de grande desenvolvimento vertical na RMBS. A presença de nuvens de grande desenvolvimento vertical produziu a precipitação, que contribuiu para a explosão e emissão de derivados de amônio, produto altamente reativo com a água, para a atmosfera.

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPORTAMENTO DA NUVEM TÓXICA GERADA COM A EXPLOSÃO DA INDÚSTRIA DE FERTILIZANTES NA CIDADE DE CUBATÃO, ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

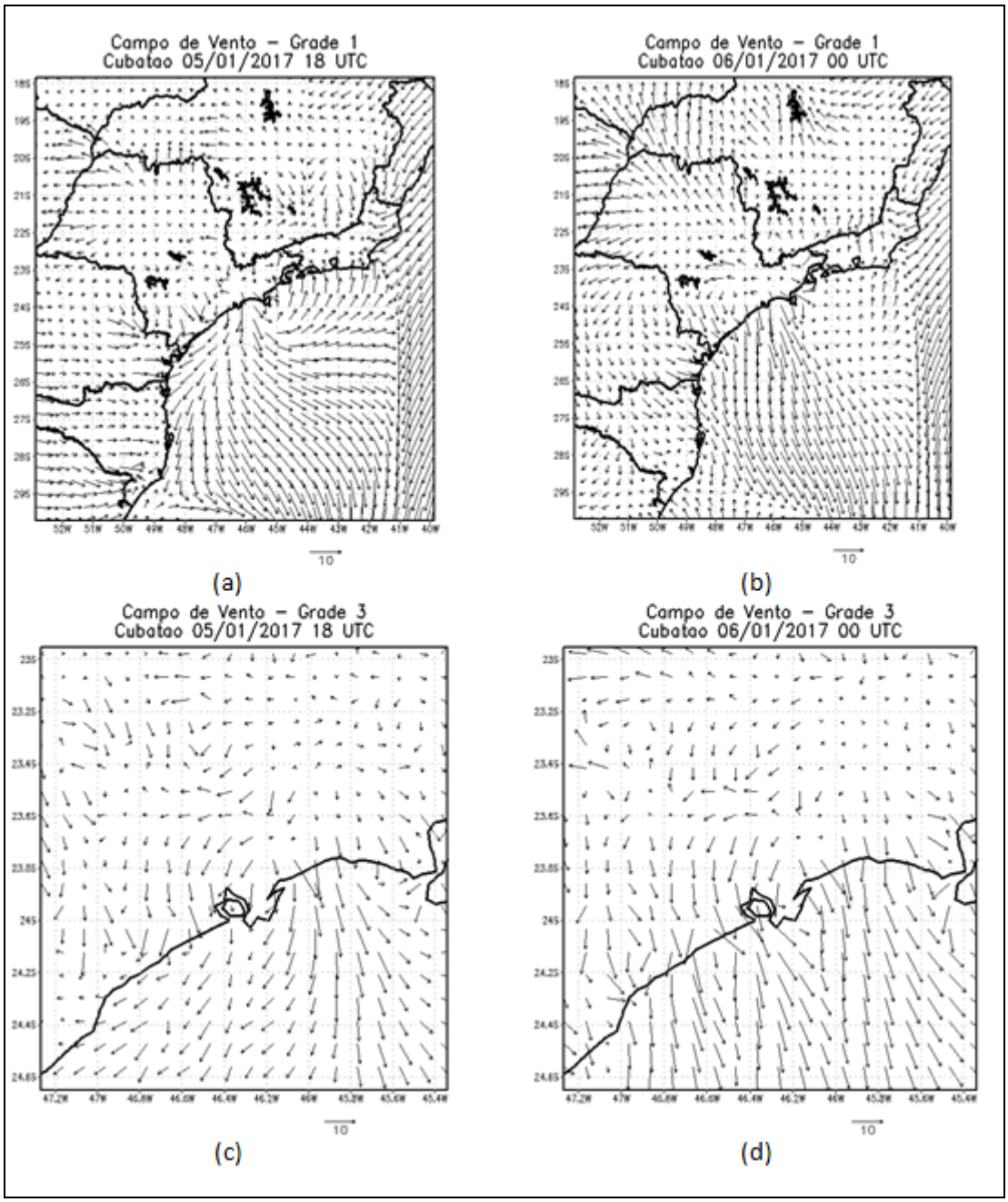

Figura 5 – Campos de Vento na Grade 1 (A; B); Grade 3 (C; D), para os dias 05 e 06 de janeiro de 2017 para os horários das 18 UTC e das 00 UTC, respectivamente.

As trajetórias calculadas, dos poluentes emitidos com a explosão, a partir do campo de vento simulado com o BRAMS, Figura 8 (a - b), seguem o escoamento em direção ao oceano Atlântico Sul em baixa altitude.

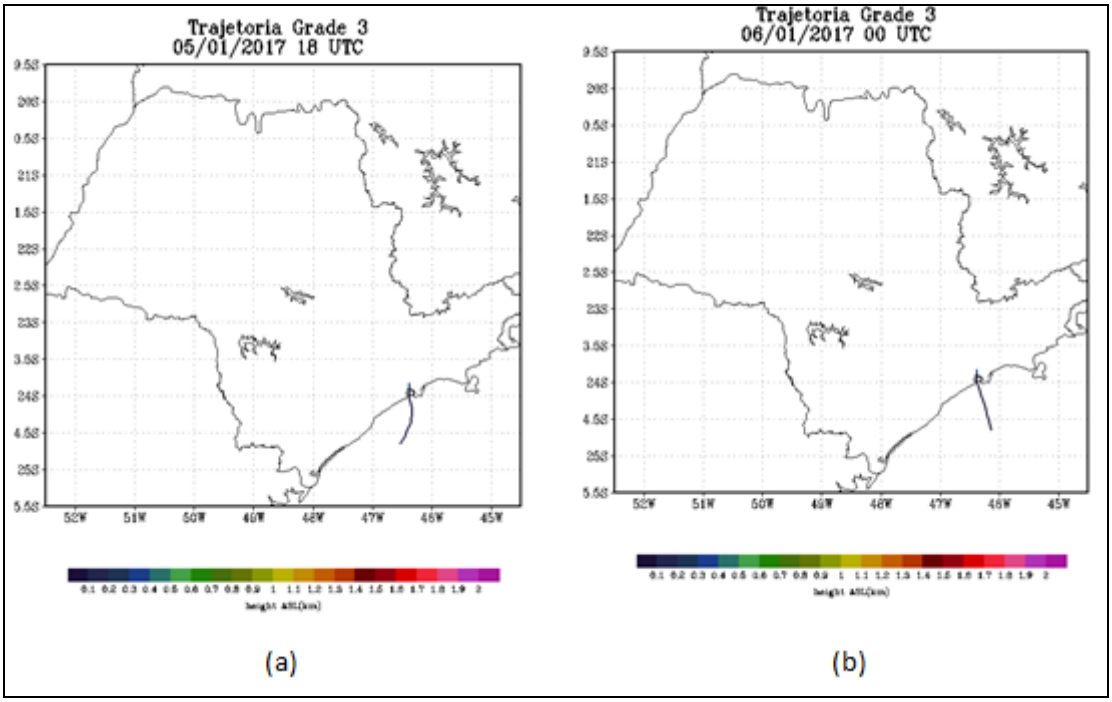

Figura 6 – Trajetória dos poluentes emitidos em Cubatão (a) 18 UTC do dia 05 de janeiro de 2017; (b) 00 UTC do dia 06 de janeiro de 2017.

6. CONCLUSÃO

Considerando a atividade industrial intensa na cidade de Cubatão, é relevante o contínuo monitoramento ambiental desta região, bem como o controle da poluição ambiental e as medidas de controle da mesma para garantir que a operação e manutenção das atividades sejam executadas de maneira segura e eficaz.

O incêndio de grandes proporções registrado na área da Vale Fertilizantes, no dia 05 de janeiro de 2017 por volta das 15 horas, foi iniciado por uma falha em um equipamento, que ocasionou uma série de explosões na área de armazenamento de produtos derivados de amônio, produto tóxico à saúde dos seres humanos e contaminante das águas e solos. Esse acidente mobilizou o Corpo de Bombeiros da Baixada Santista e por medidas de precaução os trabalhadores da unidade e os moradores de uma comunidade próxima à empresa foram retirados da região. Nesse incêndio não houveram vítimas e os acessos à avenida onde está situada a empresa foram bloqueados durante horas.

A condição atmosférica dos dias 05 e 06 de janeiro de 2017, com vento predominante do quadrante norte, possibilitou o transporte da nuvem tóxica, gerada com a explosão, em direção ao oceano, influenciando no pequeno número de atendimento nas unidades básicas de saúde da RMBS.

O padrão de circulação determinado pela Alta Subtropical do Atlântico Sul, indicado pelos padrões sinóticos e de mesoescala presentes nas análises do CPTEC e nas imagens de satélite GOES-13 e capturado a partir dos campos de escoamento simulados com o modelo BRAMS, foi de primordial importância para o transporte dos poluentes emitidos pelo incidente, pois foram próximo ao oceano, o que evitou o comprometimento da qualidade do ar local e regional. As trajetórias calculadas pelo modelo TC3D da nuvem tóxica estavam em concordância com o vento predominante de quadrante norte. Os modelos BRAMS e TC3D

utilizados no presente artigo mostraram que são modelos importantes como ferramentas para tomada de decisão.

7. REFERÊNCIAS

ALVES, S. C. – Avaliação do modelo de Kuo para a previsão de chuvas e tempestades

na Região Sul do Brasil: Estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Pelotas (UFPel), 2006.

ALVES, H. P .F. Análise da vulnerabilidade sócioambiental em Cubatão – SP por meio da integração de dados sóciodemográficos e anbientais em escala intraurbana. Revista Brasileira de Est. Pop., v. 30, n.2. Disponível: http://dx.doi.org/10.1590/S0102-30982013000200002, 2013.

BAIRD, C.; CANN, M. Qúimica Ambiental. Bookman, Quarta Edição, 2008.

BORSARI, V. Emissão de amônia de veículo automotor leve e sua importância para a saúde ambiental. Tese (Doutorado em Saúde Pública), Universidade de São Paulo, 2014.

BRAGA, A. L. F.; JASINSKI, R.; PEREIRA, L. A. A. Poluição atmosférica e internações hospi talares por doenças respiratórias em crianças e adolescentes em Cubatão, São Paulo, Brasil, entre 1997 e 2004. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, 27 (11). Disponível: http://dx.doi.org/10.1590/S0102-311X2011001100017, 2011.

CPTEC / INPE – CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS / INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS. Disponível: http://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt. Acessado em 10 de setembro de 2018.

CETESB – Disponível em www.cetesb.sp.gov.br/2017/01/18/cetesb-multa-vale-fertilizantes. Acessado em 20/01/2017.

COSTA, L. M.; OLIVEIRA e SILVA, M. F. A Indústria Química e o Setor de Fertilizantes. Disponível:https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2025/1/A%20ind%C3%BAstria%20qu%C3%ADmica%20e%20o%20setor%20de%20fertilizantes_P_A.pdf. Acessado em 10 de setembro de 2018.

DECRETO 86.955 de 18 de fevereiro de 1982. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-86955-18-fevereiro-1982-436919-publicacaooriginal-1-pe.html Acessado em 05 de abril de 2019.

DIAS, V. P.; FERNANDES, E. Fertilizantes: uma visão global sintética. BNDES Setorial, no 24, 2006.

DOTY, B. Grid Analysis and Display System Grads - V.1.5.1.12. Disponível: http://cola.gmu.edu/grads/, 1995. Acessado em 23 de agosto de 2018.

FEAM – Fundação de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável Proposta de padrões de emissão de poluentes atmosféricos gerados por fontes fixas existentes do setor de fertilizantes em nível nacional. Relatório Técnico 08, 2010..

FERREIRA, L. C.Os fantasmas do Vale: Conflitos em torno do desastre ambiental em Cubatão, SP. Revista de Ciências Sociais, 2006.

FOSFÉRTIL – Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico (FISPQ), 2014. Disponível: http://gastecsc.com.br/d/fispq.pdf . Acessado em setembro de 2017.

FREITAS, C. U.; GOUVEIA, N. C.; JUNGER, W. L.; NARDOCCI, A. C.; PONCE DE LEON, A. C. M. Poluição do ar e doenças respiratórias e cardiovasculares: Estudos de séries temporais em Cubatão, São Paulo, Brasil. Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro, v. 30, n.2. Disponível: http://dx.doi.org/10.1590/0102-311X00150012, 2013.

FREITAS, S. R. Modelagem numérica do transporte e das emissões de gases traços e aerossóis de queimadas no Cerrado e Floresta Tropical da América do Sul. Tese (Doutorado em Meteorologia)- Instituto de Física da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

G1 – PORTAL DE NOTÍCIAS DA GLOBO, 2017. Disponível: http://g1.globo.com/sp/santos-regiao/noticia/2017/01/incendio-atinge-unidade-da-vale-fertilizantes-em-cubatao-sp.html. Acessado em setembro de 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2019. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/biblioteca-catalogo.html?id=447568&view=detalhes Acessado em 15 de abril de 2019.

JORNAL A TRIBUNA, 2017. Disponível: http://www.atribuna.com.br/noticias/noticias-detalhe/cidades/incendio-atinge-unidade-da-vale-fertilizantes-em-cubatao/?cHash=d3c50076d92b8363484983796d06cc26. Acessado em 04 de setembro de 2017.

KALNAY, E., M. KANAMITSUI, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. GANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, A. LEETMAA, B. REYNOLDS, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K.C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, R. JENNE, AND D. JOSEPH, 1996: The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull.Amer. Meteorol. Soc., 77, 437-472.

LUYBEN, W. L. Design and Control of a Cooled Ammonia Reactor. In: Rangaiah, G. P.; KARIWALA, V. (editores). Plantwide Control, Recent Developments and Applications. EUA: John Wiley & Sons, Ltda, 2012.

MOREIRA, D.; TIRABASSI, T. Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: Um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental. Ambiente& Sociedade, v. VII, n°2, 2004.

OLIVEIRA, J. L. F. de. Análise espacial e modelagem atmosférica: contribuições ao gerenciamento da qualidade do ar da bacia aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) COPPE- UFRJ, 2004.

PIELKE, R. E. A. Mesoscale meteorological modeling. Orlando: Academic Press, 612 p.,1984.

PRATA, D.; SILVA, S.; SOUZA, P. Avaliação das Emissões de CO2 na Indústria de Amônia Via Simulação. In: XI CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2015. Disponível: http://www.inovarse.org/sites/default/files/T_15_060_1.pdf.

RESOLUÇÃO Nº 382, DE 26 DE DEZEMBRO DE 2006. Disponível em http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/198FC8A8/JustFertilizantesVerFinal.pdf Acessado em setembro de 2017.

REZENDE, D. A.; DIAS, N. C. Indicadores para gestão ambiental urbana: modelagem e mapeamento. Curitiba, PR, 2005. Disponível em: http://observatorioambiental.iff.edu.br/publicacoes/publicacoescientificas/indicadores_urbanos2.pdf Acessado em janeiro de 2019.

SOUZA, E. P. Estudo Teórico Numérico da Relação entre a Convecção e Superfícies Heterogêneas na Região Amazônica. Tese (Doutorado em Meteorologia), Universidade

de São Paulo, São Paulo, 1999.

TRÍPOLI, G. J., COTTON, W. R. - A numerical investigation of several factors contributing to the observed variable intensity of deep convection over south Florida. J. App. Meteor. v. 19, p. 1037-1063, 1980.

UNEP – United Nations Environment Programme Industry and Environment. Mineral fertilizer production and the environment: the fertilizer industry´s manufacturing procecess and environmental issues. Technical Report n. 26, part 1. United Nations Publication, 1998.