

Artigo

Uso do Modelo WRF-CHEM para a Simulação da Dispersão de Gases no Centro de Lançamento de Alcântara.

Paulo Geovani Iriart¹, Gilberto Fisch²

¹*Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, São José dos Campos, SP, Brasil.*

²*Instituto de Aeronáutica e Espaço, Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial, São José dos Campos, SP, Brasil.*

Recebido: 9/9/2015 - Aceito: 22/1/2016

Resumo

O presente trabalho utiliza o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) acoplado ao seu módulo químico para simular a dispersão dos poluentes emitidos por um Veículo Lançador de Satélites (VLS) lançado a partir do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). Para inserir os dados químicos no modelo foi utilizado o pré-processador PREP-CHEM. As simulações foram feitas para 4 casos a saber: casos dos períodos diurnos e noturnos durante as estações seca e chuvosa. Identificaram-se as regiões afetadas pela emissão de monóxido de carbono (CO), bem como a sua trajetória em função dos ventos. Dentre as regiões atingidas o estacionamento foi o que teve as maiores concentrações de CO, seguido pelo prédio da meteorologia, Vila de Alcântara e Vila Tapireí. Além disso, foi possível verificar em quanto tempo ocorre à dissipação de CO na região do CLA, para cada caso. As simulações do período seco nos casos diurno e noturno levaram 29 min e 1 h 12 min, respectivamente. Para as simulações do período chuvoso, foram de 40 min (caso diurno) e 1 h 30 min (caso noturno). Foi possível identificar que a maior intensidade turbulenta do período diurno, juntamente com ventos mais intensos, são os responsáveis por uma dissipação mais rápida da nuvem de poluentes.

Palavras-chave: qualidade do ar, VLS, tempo de dispersão, monóxido de carbono, química da atmosfera.

Use of the WRF-CHEM Model for Simulation of the Gas Dispersion in Alcântara Launch Center.

Abstract

This work uses the *Weather Research and Forecasting* (WRF) coupled to its chemical module to simulate the dispersion of pollutants emitted by satellite launch vehicle launched from Alcântara space center (CLA). To insert the chemistry data in the WRF was used the PREP-CHEM preprocessor. The simulations were done for 4 cases namely: cases of daytime and nighttime periods of dry and rainy seasons. They were identified regions affected by carbon monoxide (CO) emissions, as well as its trajectory depending on the winds. Among the regions hit the parking was the one with the largest concentrations of CO, followed by the meteorology building, Alcântara village and Tapireí village. Moreover, it was possible to verify how the CO dissipation occurs in the CLA region for each case. The dry period simulations day and night cases took 29 min and 1 h 12 min, respectively. For the simulations of the rainy season, it was 40 min (day case) and 1 h 30 min (nocturnal case). It was possible to identify the largest turbulent intensity of the daytime period, together with stronger winds, are responsible for a faster dissipation of the pollutant cloud.

Keywords: air quality, VLS, dispersion time, carbon monoxide, atmospheric chemistry.

1. Introdução

O Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) é considerado “o portal brasileiro para o espaço”, e devido a suas características (segurança, economia e disponibilidade)

possui um diferencial competitivo que pode torná-lo um dos melhores centros espaciais do mundo (CLA, 2014).

Para que o lançamento dos foguetes seja efetuado com segurança e sucesso, é necessário conhecer previa-

mente as condições do tempo no momento do lançamento. Para isso as ferramentas de previsão do tempo devem ser as melhores e mais modernas existentes. Dentre aquelas existentes podem-se citar dados de radares meteorológicos, imagens de satélite, radiossondagens da atmosfera, dados de estações meteorológicas e Modelos Numéricos de Previsão do Tempo (MNPT), sendo que este último é o único que gera um estado futuro da atmosfera. Atualmente, o avanço tecnológico da área de informática possibilitou a utilização de vários modelos, globais e regionais, tanto para pesquisa quanto para previsão operacional do tempo. Dentre os MNPT de escala regional, o que mais vem se destacando no cenário mundial é o *Weather Research and Forecasting model* (WRF). O WRF é considerado o estado-da-arte em modelos numéricos (Prabha e Hoogenboom, 2008; Skamarock *et al.*, 2008; Wang *et al.*, 2011; Carvalho *et al.*, 2012; Yahya *et al.*, 2015; Zabkar *et al.*, 2015).

Um dos principais motivos do modelo WRF ter um grande destaque e ter sido escolhido para o presente trabalho é o fato de seu código incluir uma estrutura modular, onde podem ter módulos acoplados ou não. Alguns dos módulos que o WRF possui são o de previsão do tempo (REAL), químico (CHEM), idealizado de alta resolução (LES), queimadas (FIRE) entre outros. Estes módulos podem ser utilizados de forma integrada e *on line*, ou seja, os dois módulos funcionam ao mesmo tempo, como é o caso do CHEM e do REAL.

O WRF-CHEM tem sido utilizado para diversos estudos sobre qualidade do ar e/ou poluição. Por exemplo, Cuchiara *et al.* (2014) que avaliaram as previsões do modelo WRF-Chem V. 3.5 para quantificar as diferenças encontradas nas previsões para a região de Houston-Tx quando se altera uma parametrização de camada limite planetária. As parametrizações analisadas foram a Yonsei University (YSU), Asymmetric Convective Model versão 2 (ACM2), Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) e a Quase-Normal Scale Elimination (QNSE). Os autores encontraram resultados com altos coeficientes de correlação para as variáveis meteorológicas (temperatura, temperatura potencial, razão de mistura de vapor d'água, entre outros), mas não encontraram uma parametrização melhor para a região estudada. Entretanto para a predição de Ozônio a parametrização YSU apresentou os valores mais próximos dos observados. Chen *et al.* (2013) que utilizaram o modelo para avaliar NO_x e O₃ sobre a região Los Angeles (EUA). Esta região apresenta valores diferentes de NO_x e O₃ para os dias de semana e fins de semana. O modelo superestimou os valores de NO_x e subestimou O₃ para todos os dias.

Chapman *et al.* (2009) avaliaram a influência de fontes pontuais de aerossóis levando em consideração os efeitos indireto e direto dos aerossóis, aproveitando o sistema *on-line* de simulação. Eles abordaram principalmente os efeitos da retroalimentação do modelo nos aerossóis das nuvens e na radiação incidente, demonstrando a necessidade deste sistema para uma descrição mais realista da

atmosfera. Klich e Fuelberg (2014) estudaram o papel das resoluções horizontais do modelo WRF-CHEM no transporte de CO. Para isto os autores utilizaram a versão 3.4 com 3 resoluções espaciais diferentes sendo elas 45, 15 e 5 km. As parametrizações das 3 grades foram idênticas, com exceção para a grade menor (de 5 km), onde a parametrização de *Cumulos* foi desligada a fim de ser resolvida explicitamente pelo modelo. O caso estudado foi o de um ciclone extratropical que passou sobre o leste da Ásia sobre uma região com valores maiores que 400 ppbv de CO. Eles focaram o estudo em um transporte vertical do CO na região e identificaram que, na grade de 5 km, o transporte de CO foi mais elevado devido a combinação de uma resolução mais elevada com a parametrização *Cumulos* sendo resolvida explicitamente. Silva Junior *et al.* (2012) avaliaram a eficiência do modelo WRF-CHEM em simular os poluentes fotoquímicos para a região metropolitana de São Paulo - SP utilizando as concentrações de CO e O₃. Para realizar este estudo os autores utilizaram os dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) como inventário de entrada para o modelo WRF-CHEM. O modelo conseguiu representar bem as variações bruscas de CO e O₃ que ocorreram durante o período.

Os foguetes se deslocam na vertical expelindo uma grande quantidade de gás atrás de si, sendo que esse gás é proveniente da queima de seu combustível, quer seja sólido ou líquido. A combustão geral destes propelentes gera composto de poluentes como CO, CO₂, HCl, Al₂O₃, sendo que a sua exposição humana durante longos períodos a pequenas concentrações ou curtos períodos a grandes concentrações pode causar sérios danos nos animais, vegetais e seres humanos (WHO 2000; Lacerda *et al.*, 2005;). Algumas agências espaciais já trabalham com programas de previsão e análise do impacto da dispersão de poluentes atmosféricos. Por exemplo, nos Estados Unidos da América (EUA) a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) utiliza o programa *Rocket Exhaust Effluent Diffusion Model* (REEDM) (Bjorklund *et al.*, 1982), que tem a capacidade de traçar a trajetória de uma pluma, expelida por um foguete, utilizando uma hipótese de transporte em linha reta. A França utiliza o modelo *Stratified Atmosphere Rocket Release Impact Model* (SARRIM) para avaliação da qualidade do ar em evento de lançamentos de foguetes no Centro Espacial da Guiana. O SARRIM primeiramente calcula o tamanho e a altura da pluma, após calcula as concentrações de gases e partículas para curtas distâncias e por fim calcula as concentrações de gases e partículas para longas distâncias (Cencetti *et al.*, 2011).

Recentemente, o programa espacial indiano utilizou o modelo *Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory* (HYSPLIT) para simular e prever a dispersão de uma nuvem de poluentes e sua concentração a partir do solo. Como o modelo HYSPLIT não possui um modelo prognóstico, para a parte meteorológica foi utilizado o modelo atmosférico regional MM5 (Rajasekhar *et al.*,

2011). No caso específico do Brasil, pode-se citar os trabalhos desenvolvidos por Moreira *et al.* (2011) e Nascimento *et al.* (2014) para a região do CLA. Os primeiros autores utilizaram o Modelo Simulador da Dispersão de Efluentes de Foguetes (MSDEF) o qual apresenta a solução através da transformada de Laplace que considera a camada limite atmosférica sendo multicamada para a equação de advecção-difusão. Os outros autores utilizaram o modelo *Community Multi-scale Air Quality* (CMAQ) com o *input* de dados meteorológicos obtidos do modelo WRF.

O presente trabalho tem o objetivo principal de analisar a trajetória dos poluentes liberados pela queima do combustível de um foguete lançado no CLA, através de simulação numérica do modelo atmosférico regional WRF e acoplado com o seu módulo químico (CHEM).

2. Metodologia

2.1. Centro de Lançamento de Alcântara (CLA)

A localização do CLA foi escolhida por ser próximo do Equador, fato este que fornece uma grande vantagem operacional para os lançamentos de veículos com satélites geostacionários. Esta localização sofre grande influência dos ventos em baixos níveis provenientes do oceano devido a sua proximidade com o mesmo. A vegetação do CLA é típica de região de restinga (Magnago, 2010). Além disso, existe uma falésia no local de aproximadamente 50 m. Estes fatores influenciam fortemente no vento sobre a região, sendo este um dos elementos climáticos de maior importância para o lançamento de foguetes. O vento nos primeiros 5 km é responsável por mais de 90% das correções de trajetória dos Veículos Lançadores de Satélites (VLS), sendo que existem diversos artigos científicos que já estudaram o vento sobre o CLA (Gisler, 2009; Pires, 2009; Gomes da Silva, 2013; Iriart *et al.*, 2013) ou a parte de chuva (Barros e Oyama, 2010; Pereira Neto e Oyama, 2011). O CLA apresenta características exclusivas de uma zona de transição entre o oceano e o continente (Medeiros *et al.*, 2013). O CLA apresenta um período de chuvas intensas entre janeiro e junho e um período seco entre julho e dezembro (Fisch, 1999). Sendo que, durante o período seco, o vento é mais intenso do que no período chuvoso. As variações de temperatura e umidade são típicas de uma região tropical.

2.2. Modelo numérico

Para realizar as simulações foi utilizado o modelo WRF (Núcleo ARW) Versão 3.4.1. Ele foi instalado em um servidor Proliant HP DL380 G7 (Fig.8), sendo que este possui 2 processadores Intel Six-core E7520 de 2.93 GHz (totalizando 12 núcleos de processamento), 36 Gb de memória RAM, 4 discos SATA de 1 Tb (para armazenamento), 2 discos redundantes SAS de 300 Gb (para o Sistema Operacional) e 2 fontes redundantes. O SO (Sistema Operacional) utilizado foi o Linux Ubuntu 12.04 LTS 64 bits. O

procedimento de instalação do modelo WRF seguiu os mesmos procedimentos listados em IRIART (2011), sofrendo apenas as alterações necessárias para o SO Linux Ubuntu e para a versão 3.4.1 do modelo. Também foi instalado o módulo químico do modelo (WRF-CHEM) na versão 3.4.1, sendo que esta instalação foi feita seguindo o manual do modelo químico (WRF-CHEM *User's Guide V 3.5* 2013) com as bibliotecas de otimização KPP. A instalação do módulo acoplado do modelo WRF-CHEM foi realizada com êxito. Para que isto tenha sido possível foi necessária a realização de uma série de alterações do código fonte do modelo, bem como nos dados de entrada. Todas as alterações e novos scripts foram elaborados visando à utilização futura do modelo em modo operacional para a previsão da pluma de CO.

Para inicializar o modelo WRF foram utilizados os dados gerados pelo modelo *Global Forecasting System* (GFS), como dados de contorno inicial e possuem resolução espacial e temporal respectivamente de 0,5° e 3 h (disponíveis em <http://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod/>). Os dados de topografia e de cobertura vegetal utilizados foram obtidos do *United States Geological Survey* (USGS) com resolução espacial de 30" de arco (disponíveis em http://www.mmm.ucar.edu/wrf/src/WPS_files/geog.tar.gz). Estes dados de topografia são comumente utilizados para a previsão do tempo. Para a região do CLA a única topografia que o modelo identifica é a que aparece na Fig. 1, com uma elevação máxima de 27 m.

Para uma melhor compreensão das análises, algumas localidades de pontos específicos foram escolhidas, a saber: MET: representa o prédio da Meteorologia do CLA, onde ficam os responsáveis pelas previsões do tempo, bem como os engenheiros do Centro Técnico; EST: representa a portaria de entrada do Setor de Preparação e Lançamento (SPL) e onde ficam militares que fazem a proteção do local; VALC: representa a Vila de Alcântara, onde residem, trabalham e moram os habitantes da cidade de Alcântara e VTAP: representa a Vila Tapireí, onde também existem vários moradores que possuem algum tipo de ligação com o CLA (servidores, familiares, visitantes, etc). Estas localidades podem ser vistas na Fig. 1. Os dados de saída do modelo foram pós-processados no ARWPost, gerando um arquivo binário (dat) e um arquivo descritor do binário (ctl), para que pudessem ser utilizados pelo programa GrADS.

A modelagem foi dividida em duas partes (uma atmosférica e outra química) e as duas foram simuladas na forma *on-line* para se obter melhores resultados, assim como utilizado em Forkel *et al.* (2012). O modelo WRF foi configurado da seguinte maneira: três grades aninhadas e centradas sobre a localização do Setor de Preparação de Lançamento (SPL) com a razão entre grades de 1/3 (*grid_ratio*), sendo apresentado na Fig. 2a. O domínio 1 (denominado de D1) possui 100 pontos de grade nos eixos x e y, com 9 km de resolução horizontal; o domínio 2 (D2)

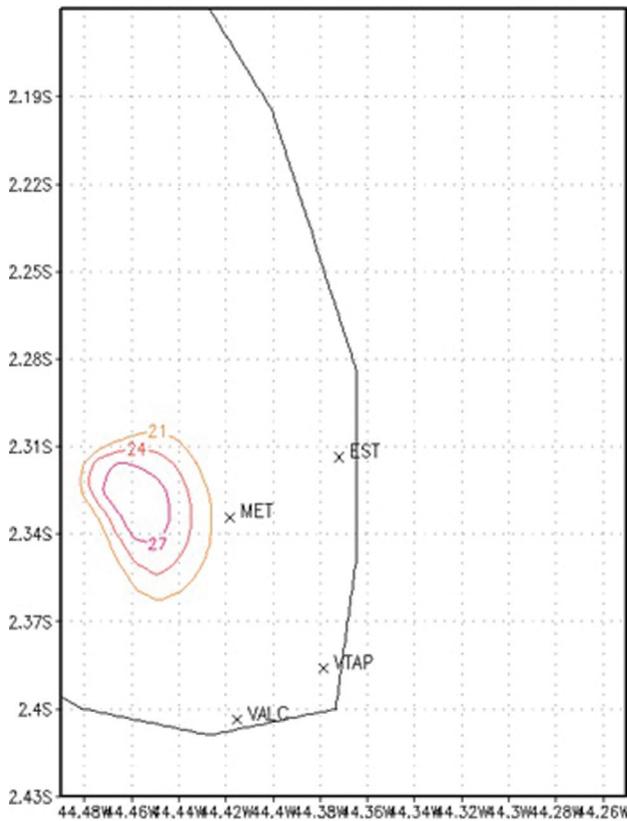


Figura 1 - Figura das localidades EST, MET, VTAP e VALC e da topografia representada pelo modelo WRF para a região do CLA.

possui 60 pontos de grade, com 3 km de resolução horizontal e o domínio 3 (D3) possui 20 pontos de grade com 1 km de resolução horizontal (Fig. 2b). Todos os domínios têm 43 camadas verticais. Trabalhos anteriores (por exemplo Gomes da Silva e Fisch, 2014) já validaram previamente

dados modelados com a mesma configuração para esta região.

Para manter um *spin-up* de pelo menos 6 h para cada grade, o aninhamento entre grades foi dessincronizado temporalmente, ou seja, a grade D1 foi inicializada 12 h antes da emissão do poluente, a grade D2 foi inicializada 6 h antes da emissão e a grade D3 foi inicializada no momento da emissão. Todas as 3 grades mantiveram a parte química ligada, entretanto o *input* da liberação química foi feito apenas na grade D3. As parametrizações foram as mesmas para os três domínios, com exceção do D3 em que a parametrização *cumulus* foi desligada, a saber:

- Microfísica: *WRF Single-Moment 3-class Scheme*, esquema simples e eficiente que contém processos de gelo adaptado para grades de mesoescala.
- Radiação de onda longa: *Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)*, esquema que utiliza a consulta de tabelas de eficiência.
- Radiação de onda curta: *Dudhia scheme*, esquema simples de integração que permite a absorção de radiação em céu claro, pelas nuvens e por espalhamento.
- Camada superficial: *MYNN surface layer*, esquema de Nakanishi e Niimo.
- Superfície: *Noah Land Surface Model*, esquema de temperatura e umidade do solo em 4 camadas.
- Camada Limite Planetária (CLP): *Mellor Yamada Nakanishi and Nimo level 2.5*, esquema com predição de energia cinética turbulenta em termos de sub-grades.
- Cumulos: *Grell 3D*, esquema melhorado de *Grell-Devenyi* que pode ser utilizado para altas resoluções espaciais.

O modelo WRF-CHEM possui diversas opções de cálculos químicos e para este estudo foi selecionado o *Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (RACM)* (Stockwell *et al.*, 1997) com a disponibilidade de utilizar as

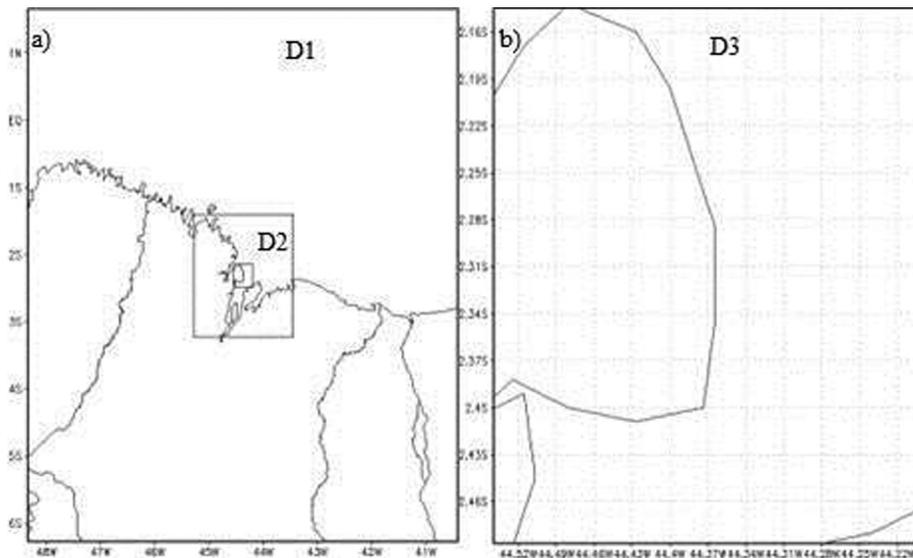


Figura 2 - a) Domínios aninhados e b) Domínio 3.

bibliotecas do *Kinect Pré-Processor* (KPP). Esta opção é utilizada em vários tipos de modelos de química atmosférica para prever a concentração de poluentes no ar (Alonso *et al.*, 2010; Gacita *et al.*, 2010; Gacita, 2011). O RACM possui em seu mecanismo químico a quantidade de 17 espécies de contaminantes inorgânicos estáveis, 4 inorgânicos intermediários, 32 espécies de contaminantes orgânicos estáveis e 24 orgânicos intermediários, o qual inclui 237 reações químicas. O modelo acoplado WRF-CHEM possui uma equação prognóstica, com sumidouros e fontes, para os gases, que leva em conta processos atmosférico de advecção, dispersão e remoção do mesmo, bem como as deposições seca e úmida. O WRF foi inicializado utilizando o módulo de aerossóis.

Para gerar os dados de inicialização do WRF-CHEM utilizado o pré-processador de emissões químicas PREP-CHEM-SRC (Freitas *et al.*, 2011). O PREP-CHEM prepara as emissões de poluentes em formato de grade tornando possível de assimilar as emissões em modelos atmosféricos de previsão do tempo, como por exemplo, o WRF (Grell *et al.*, 2005). O PREP-CHEM possui uma flexibilidade de configurações das grades e das fontes que torna o seu uso simples e fácil para qualquer usuário. Como fontes básicas de poluentes foram utilizados os repositórios *the REanalyses of the TROpospheric Chemical Composition* (RETRO) e *Emission Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR). Estes repositórios foram utilizados apenas para gerar os dados de inicialização da parte química do modelo (arquivos wrfchemi). Estes arquivos foram gerados para cada minuto de simulação do modelo e para cada grade de simulação. Uma vez de posse destes dados foi utilizado um software adequado de leitura e escrita em netCDF para alterá-los, visando torná-lo como a única fonte de poluentes oriunda do VLS. Para isso ser possível, o arquivo teve suas fontes originais, provenientes dos repositórios RETRO e EDGAR, colocadas como zero em todo o domínio, sendo que, em seu ponto central, ponto de lançamento do VLS, estas emissões foram alteradas para serem iguais as aquelas emitidas pelo foguete. Uma vez terminado este processo os arquivos são assimilados pelo modelo WRF e a simulação transcorre normalmente. Salienta-se que a composição dos gases liberados precisa ser melhor avaliada, em função de verdadeira composição química dos propelentes (foi utilizado um caso hipotético). A altura da emissão foi considerada em 50 m, pois segundo Nascimento *et al.* (2014), o nível de 53 m é onde se tem a maior concentração de poluentes emitidos por um foguete para o caso do CLA e foi analisada a pluma em superfície (*“Ground Cloud”*), apesar de a pluma se propagar para outros níveis não foi inserido o poluente liberado pelo VLS de acordo ele ascende na atmosfera.

Para calcular a quantidade de poluentes emitidos pelo VLS foi utilizada uma taxa de emissão de um lançamento normal de um foguete, que é $5,2 \times 10^5$ g/s (Bjorklund *et al.*, 1982). Os maiores poluentes emitidos por um lançamento

de foguete são o Óxido de Alumínio (Al_2O_3), o Monóxido de Carbono (CO) e o Cloreto de Hidrogênio (HCl) com, respectivamente, 28,2, 27,6 e 21,6% do total emitido (Bjorklund *et al.*, 1982). O modelo WRF-CHEM não possui em sua estrutura química as equações de reações para o HCl e o Al_2O_3 . Consequentemente, escolheu-se a variável CO (o segundo maior poluente emitido em um lançamento) como o poluente a ser analisado e como indicador/traçador do gás emitido e pluma formada. É válido salientar que mesmo tendo utilizado o CO como traçador ele foi inserido no modelo como um poluente, ou seja, esta sujeito a todas as reações químicas e fotoquímicas, bem como o “feedback” com a radiação.

O CO é um gás incolor, inodoro e extremamente tóxico, sendo, em sua maioria, liberado na atmosfera em virtude da queima incompleta de combustíveis. Ele possui um tempo de residência na atmosfera por volta de 2 meses e é pouco reativo, reage mais com os hidróxidos (OH) (Seinfeld, 2006). O CO quando inalado é absorvido rapidamente pelos pulmões e liga-se a hemoglobina formando a carboxihemoglobina (COHb). A COHb é transportada pelas vias circulatórias e atinge todos os tecidos do corpo, causando uma diminuição do oxigênio nos tecidos e desta forma causa diminuição da visão, do aprendizado, da capacidade de executar serviços manuais e pode levar, em casos extremos de concentração, a morte (Arbex, 2001). A Organização Mundial de Saúde (sigla em inglês *WHO*) apresenta valores de concentração máxima por determinado intervalo de tempo que uma pessoa pode ser exposta ao CO, sem que se tenham grandes problemas fisiológicos (Tabela 1). De modo geral, assumindo-se uma métrica simples e linear, esta Tabela apresenta um valor de 1500 ppm.min como um limite máximo de exposição.

3. Resultados

As simulações realizadas (4 simulações) possuem as mesmas características, sendo que as diferenças entre elas é o horário da liberação dos poluentes (00 e 12 UTC), representando as características diurnas (convectivas) e noturnas (estáveis), respectivamente, bem a variação sazonal, através de simulações para os períodos seco (dados obtidos no ano de 2008) e chuvoso (ano de 2010).

Tabela 1 - Concentração máxima de CO em ppmv com tempo máximo de exposição recomendado.

Concentração (ppmv - ppm)	Tempo
1551,89-1500	1 min
93,11-90	15 min
51,72-50	30 min
25,86-25	1 h
10,34-10	8 h

Adaptado de WHO 2000.

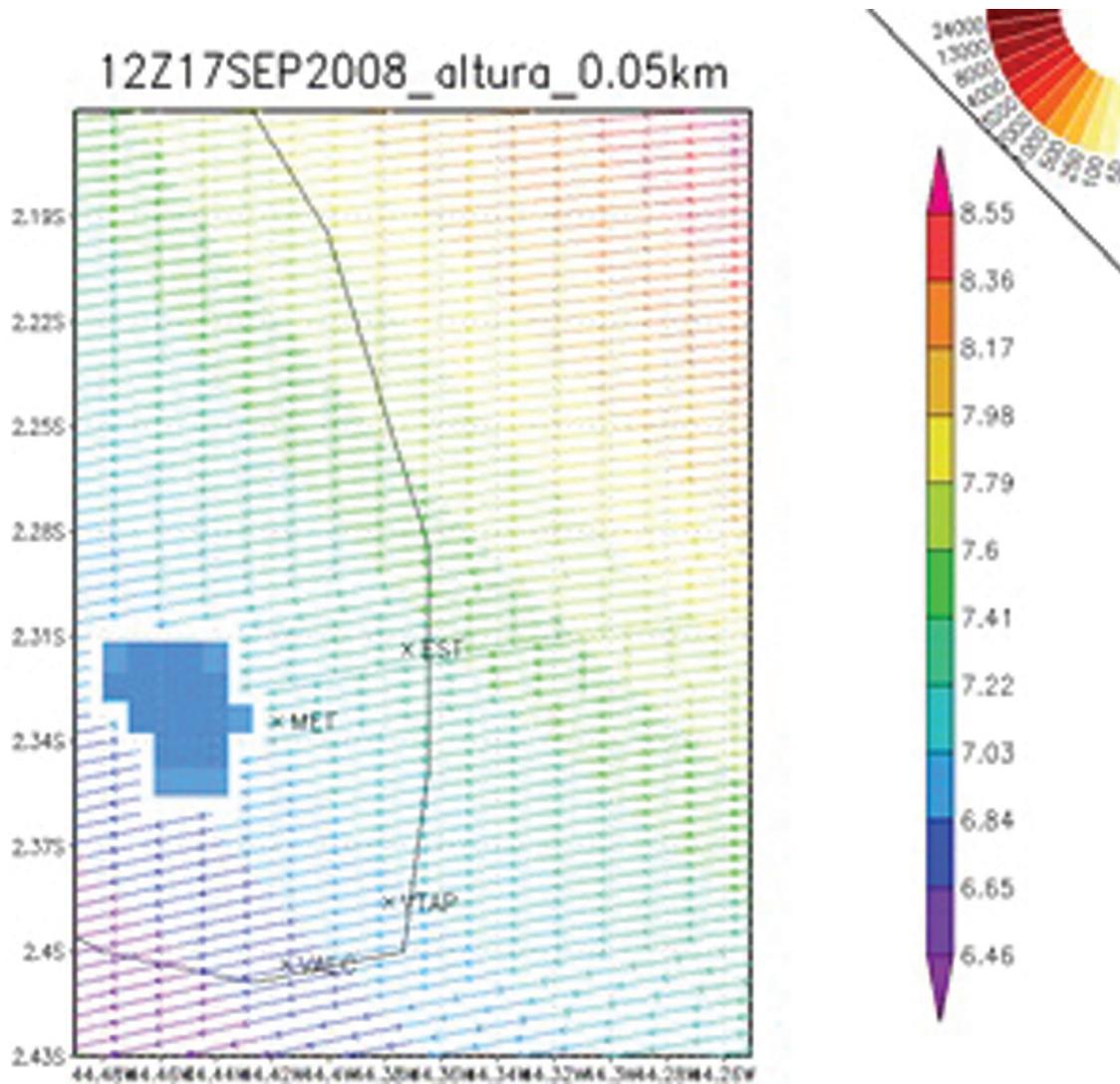


Figura 3 - Variação espacial da concentração de CO₂, barra em leque no canto superior direito, e linhas de corrente, barra vertical a direita, para o dia 17/09/2008 as 12:00 UTC.

A Fig. 3 mostra o momento da liberação da pluma de CO para o dia 17 de setembro de 2008, representando a liberação diurna do período seco, as 12 UTC. Nesta figura, assim como as subsequentes, o vento está representado por linhas de fluxo e seus valores instantâneos estão na barra vertical à direita da figura. Os valores das concentrações de CO estão representados na barra em leque, direita superior. A área em azul representa uma topografia do tipo de colina a oeste do prédio da meteorologia. Nesta figura se nota que o vento tem uma orientação de leste e possui velocidades de 8,5 m/s sobre o oceano.

A Fig. 4 mostra o minuto seguinte à liberação da pluma de CO. Nesta figura se percebe que a pluma apresenta um formato quase oval com deslocamento de CO em todas as direções. Nota-se que a pluma cobre toda a localidade EST e suas proximidades. Os maiores valores de CO se deslocam no mesmo sentido do vento, sendo que o vento

apresenta a mesma direção da figura anterior, porém com uma intensificação da velocidade.

A Fig. 5 mostra a evolução da pluma de CO no segundo minuto após a sua liberação. É possível perceber que a pluma aumentou a sua área e se deslocou para oeste, seguindo o sentido do vento. A direção do vento se manteve a mesma e sua velocidade apresentou um pequeno aumento.

A Fig. 6 mostra a evolução da pluma de CO para 3 min após a sua liberação. A pluma continua sua expansão e segue seu deslocamento de acordo com a direção do vento e, desta forma, se aproxima da localidade MET. A direção do vento se mantém a mesma observada anteriormente e a velocidade máxima continua aumentando, chegando a 10,5 m/s.

A Fig. 7 mostra a evolução da pluma passados 4 min de sua liberação. Na figura se percebe que a localidade EST ainda está sob a pluma, mas os valores são bem menores. A

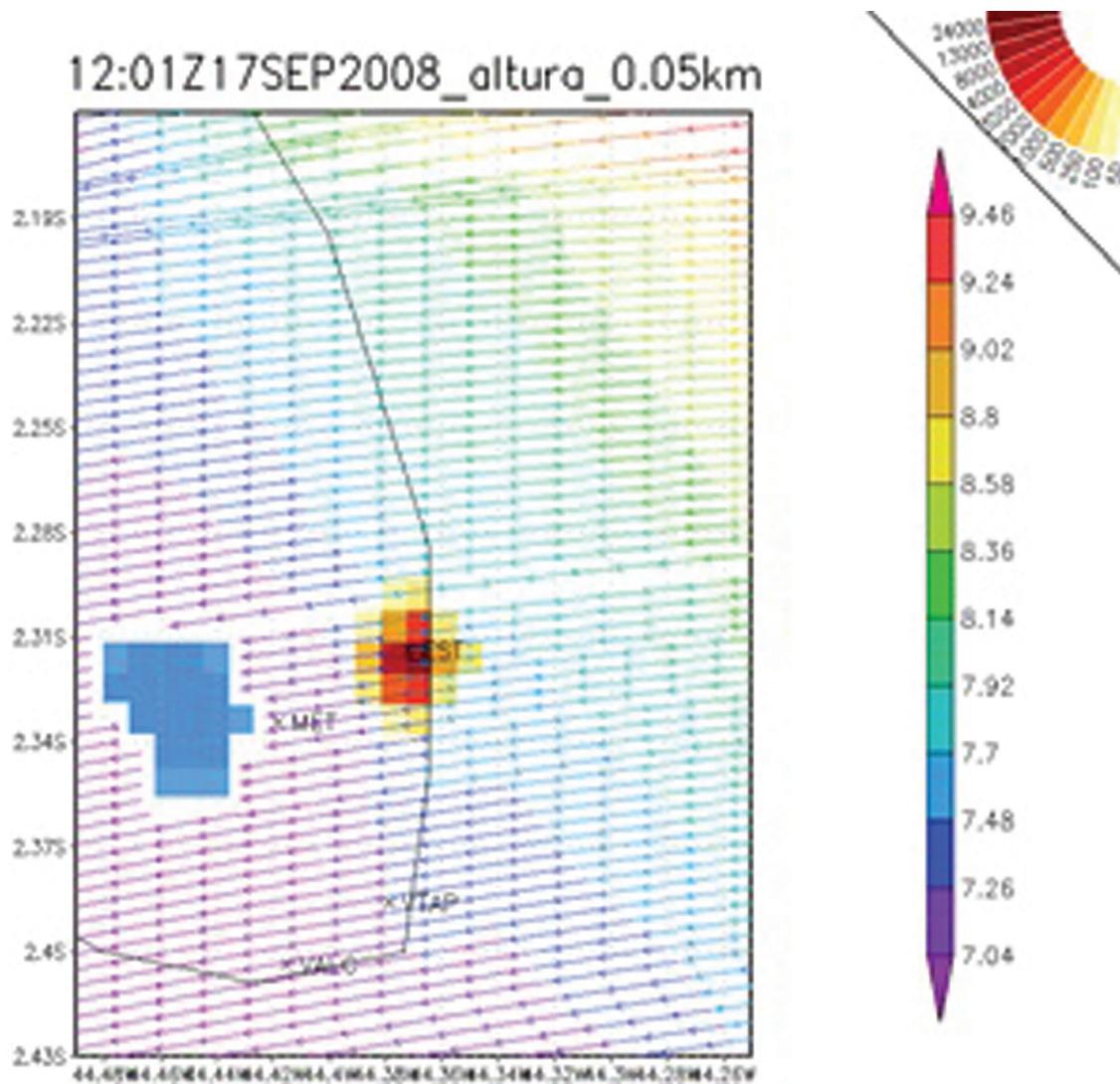


Figura 4 - Variação espacial da concentração de CO₂, barra em leque no canto superior direito, e linhas de corrente, barra vertical a direita, para o dia 17/09/2008 as 12:01 UTC.

pluma apresentou uma grande redução de seus valores de máxima concentração, pois no primeiro minuto apresentava valores de 24000 ppmv (Fig. 1) e no quarto minuto apresenta valores de 2000 ppmv (Fig. 6). A pluma ainda segue se deslocando para o oeste e o vento é praticamente constante.

A Fig. 8 mostra a pluma após se passarem 10 min. desde a sua liberação. Na figura é possível notar que a localidade MET se encontra sob a influência da pluma de CO com valores de concentração de 500 ppmv. A localidade EST ainda está sob influência da pluma, porém em uma região de concentração de 50 ppmv. O deslocamento da pluma continuou seguindo a direção do vento. A velocidade máxima do vento atingiu 11,7 m/s. Nesta figura ainda é possível notar que a pluma atinge a topografia do tipo colina e acaba ficando bloqueada por ela.

A Fig. 9 mostra a pluma após 20 min. de sua liberação. A localidade EST já está livre influência da pluma. A

localidade MET está sob influência de valores menores de CO (50 ppmv). Se nota que a pluma está sob a topografia de colina. A velocidade máxima do vento atingiu o valor de 12,1 m/s. A pluma seguiu se deslocando de acordo com a direção predominante do vento.

A liberação da pluma as 12:00 UTC do período seco teve características distintas das outras como, por exemplo, o deslocamento e a dissipação da pluma ser mais rápidos. Além disso, ainda foi a única que possuiu um deslocamento quase que totalmente zonal. A velocidade do vento atingida foi a maior, chegando a 12,6 m/s. As outras liberações (figuras não mostradas) de poluentes apresentaram um deslocamento da pluma de nordeste para sudoeste. A Tabela 2 mostra os valores das máximas velocidades dos ventos com suas direções predominantes juntamente com o tempo que a pluma levou para dispersar completamente. Na Tabela 2 pode-se perceber que as liberações de dispersão mais rápida foram as que apresentaram valores mais elevados de

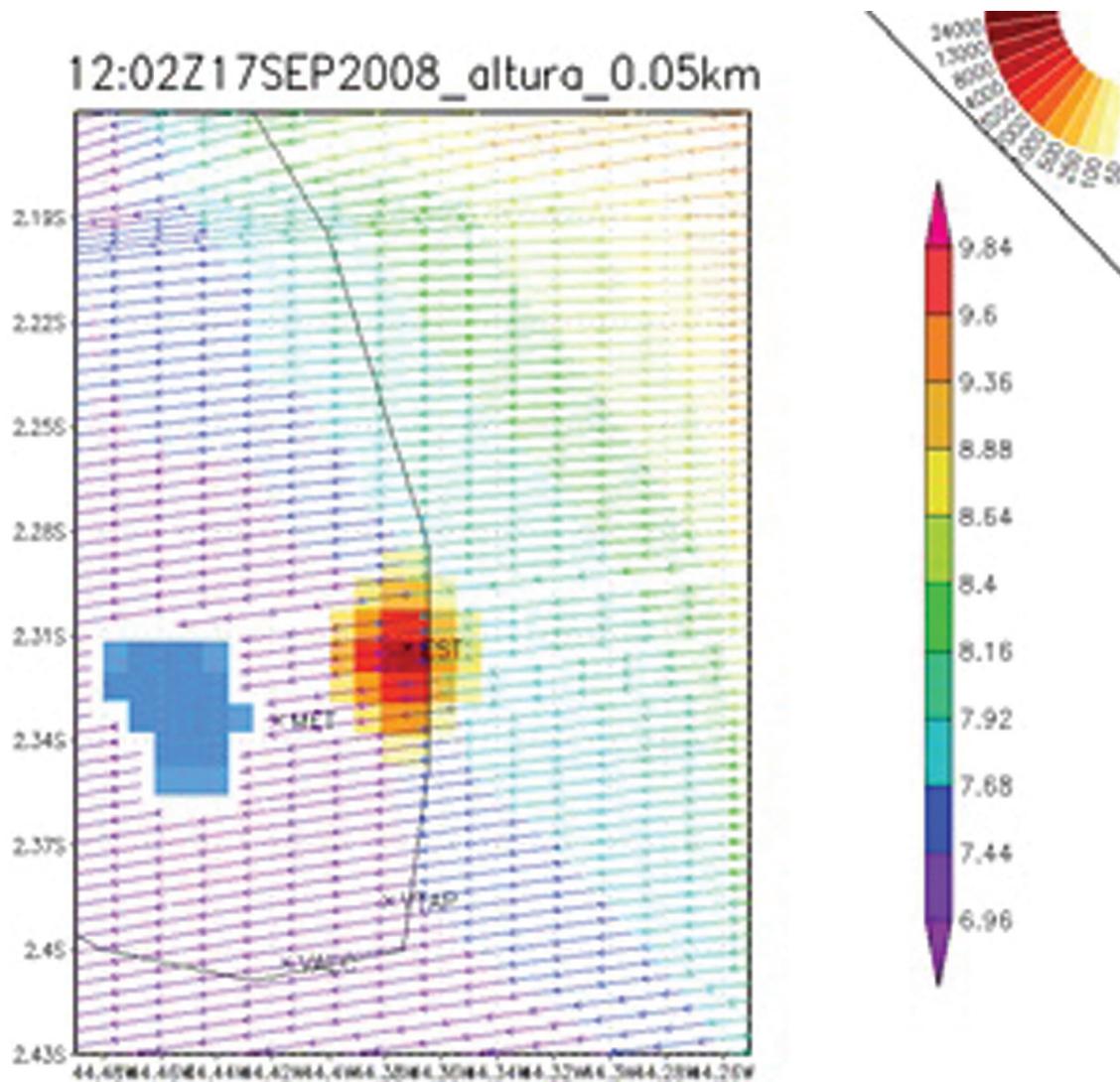


Figura 5 - Variação espacial da concentração de CO₂ (barra em leque no canto superior direito) e linhas de corrente (barra vertical a direita) para o dia 17/09/2008 as 12:02 UTC.

velocidade máxima do vento. A direção do vento foi semelhante em todos os casos com exceção da liberação as 12 UTC do período seco, a qual foi a mais rápida dispersão da pluma dentre as 4 liberações. Ainda é importante salientar que a liberação as 00 UTC do período chuvoso foi a que necessitou de um tempo maior para dispersar e, devido a orientação do vento, a pluma também atingiu a vila de

Alcântara com valores elevados de CO por pelo menos 63 min.

A Fig. 10 mostra os valores de CO plotados em uma escala logarítmica para as localidades EST (linha azul), MET (linha vermelha), VALC (linha verde) e VTAP (linha roxa). A localidade EST é a mais próxima da região do SPL e sofre com valores mais elevados de CO. Na Fig. 9 no primeiro minuto os valores chegam a um pico de aproxi-

Tabela 2 - Direção, velocidade máxima do vento e tempo total de dispersão de CO por horário de liberação.

Período	Horário	Tempo total (Min)	Velocidade do vento (m/s)	Direção do vento
Seco	00 UTC	70	10,8	NE
	12 UTC	30	12,8	E
Chuvoso	00 UTC	90	8,4	NE
	12 UTC	40	12,8	NE

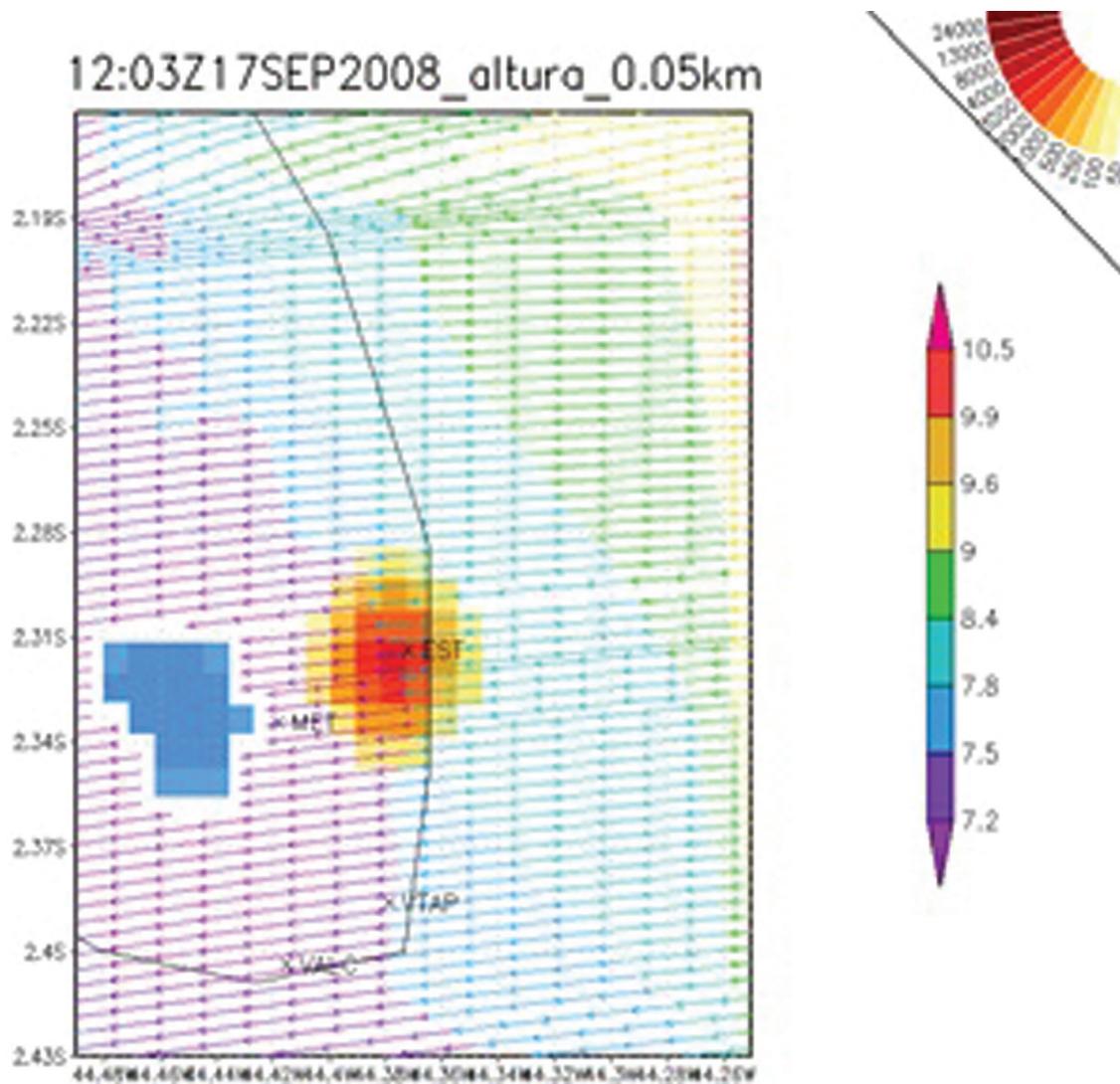


Figura 6 - Variação espacial da concentração de CO₂ (barra em leque no canto superior direito) e linhas de corrente (barra vertical a direita) para o dia 17/09/2008 as 12:03 UTC.

madamente 28000 ppmv. Valores acima de 5000 ppmv ficam sobre EST durante os 4 primeiros minutos após a liberação da pluma. O CO apresentou valores inferiores a 1 ppmv após passados 32 min de sua liberação. A localidade MET foi a que teve a segunda maior concentração de CO registrada. As concentrações chegam a aproximadamente 600 ppmv em 17 e 18 min após a liberação da pluma. A pluma levou 6 min desde a sua liberação para atingir esta localidade. Valores acima de 100 ppmv ficam sobre esta localidade durante 32 min, o que é extremamente prejudicial a saúde humana (ver Tabela 1). As concentrações de CO chegam a valores inferiores a 1 ppmv depois de passados 72 min desde a liberação da pluma.

A localidade VALC registrou os menores valores de CO dentre as 4 localidades: o máximo valor de CO foi de aproximadamente 8,5 ppmv aos 32 min após a liberação da pluma. Valores acima de 1 ppmv ficaram sobre esta região durante 51 min. A pluma levou 9 min desde a sua liberação

para alterar as concentrações de CO sobre esta localidade. A localidade VTAP apresentou valores máximos de 18 ppmv de CO. Assim como a localidade VALC, a localidade VTAP teve uma alteração de CO por tempo prolongado, aproximadamente 33 min. A pluma levou 7 min desde a sua liberação para atingir esta região e os valores foram menores que 1 ppmv somente após 45 min da liberação da pluma.

A Fig. 11 mostra os valores de CO para as localidades EST, MET, VALC e VTAP. Os valores máximos de CO para a localidade EST foram de aproximadamente 20000 ppmv, sendo que este valor ocorre 1 min depois da liberação do poluente. Os valores superiores a 1000 ppmv ficam sobre esta região por 5 min e a concentração chega a 0 ppmv após 8 min da liberação da pluma. A localidade MET apresenta uma concentração máxima de CO menor do que a atingida na localidade EST, a qual ficou em aproximadamente 300 ppmv. Este valor é atingido ao se

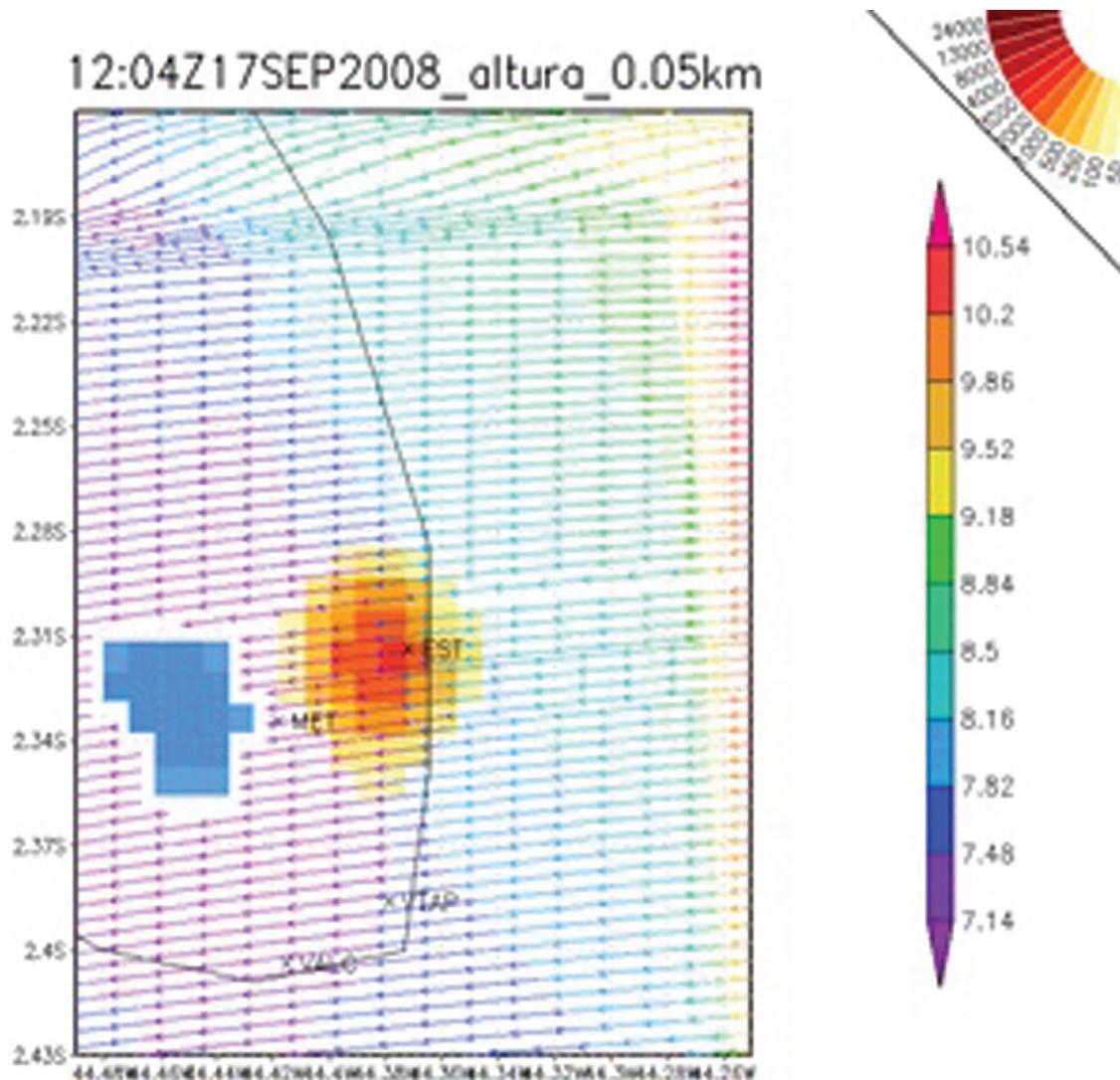


Figura 7 - Variação espacial da concentração de CO₂ (barra em leque no canto superior direito) e linhas de corrente (barra vertical a direita) para o dia 17/09/2008 as 12:04 UTC.

passar 11 min desde a liberação da pluma. A pluma levou 4 min para atingir esta localidade e os valores superiores a 100 ppmv ficam sobre a região por 14 min. Os valores chegaram a 0 ppmv depois de passados 30 min desde a liberação da pluma. Assim como a simulação com liberação da pluma as 00 UTC, a localidade MET foi a segunda localidade a apresentar os valores mais elevados de CO. As localidades VALC e VTAP apresentaram uma pequena variação de CO. É importante salientar que nas figuras mostradas anteriormente para a liberação da pluma as 12 UTC a trajetória dela foi praticamente de leste para oeste e os valores de maior concentração de CO ficaram distantes destas duas localidades. Entretanto quando se observou pontualmente os dados nota-se para estas localidades estes valores não chegaram a 1 ppmv. Este resultado sugere que as partículas de CO se espalham para, até mesmo, regiões que estão fora da trajetória da pluma. Nestes dois casos os

valores são pequenos e provavelmente não causariam nenhum problema de saúde na população local.

A Fig. 12 mostra a distribuição logarítmico dos valores de CO para as localidades EST, MET, VALC e VTAP. A localidade EST é atingida pelos maiores valores, logo no primeiro minuto de simulação, de CO que são de aproximadamente 30000 ppmv. A localidade MET registrou os valores mais altos de CO depois da localidade EST. Os valores de CO chegaram a aproximadamente 650 ppmv em 17 min depois da liberação da pluma. A pluma atinge esta localidade 8 min depois de liberada, permanecendo até 72 min depois de sua liberação, quando os valores chegam a menos de 1 ppmv. Valores superiores a 50 ppmv permaneceram sobre a MET por 37 min. A localidade VALC, diferente da liberação da pluma as 00 UTC do período seco, registrou o terceiro maior valor de concentração de CO. Estes valores foram de aproximadamente 120 ppmv e ocor-

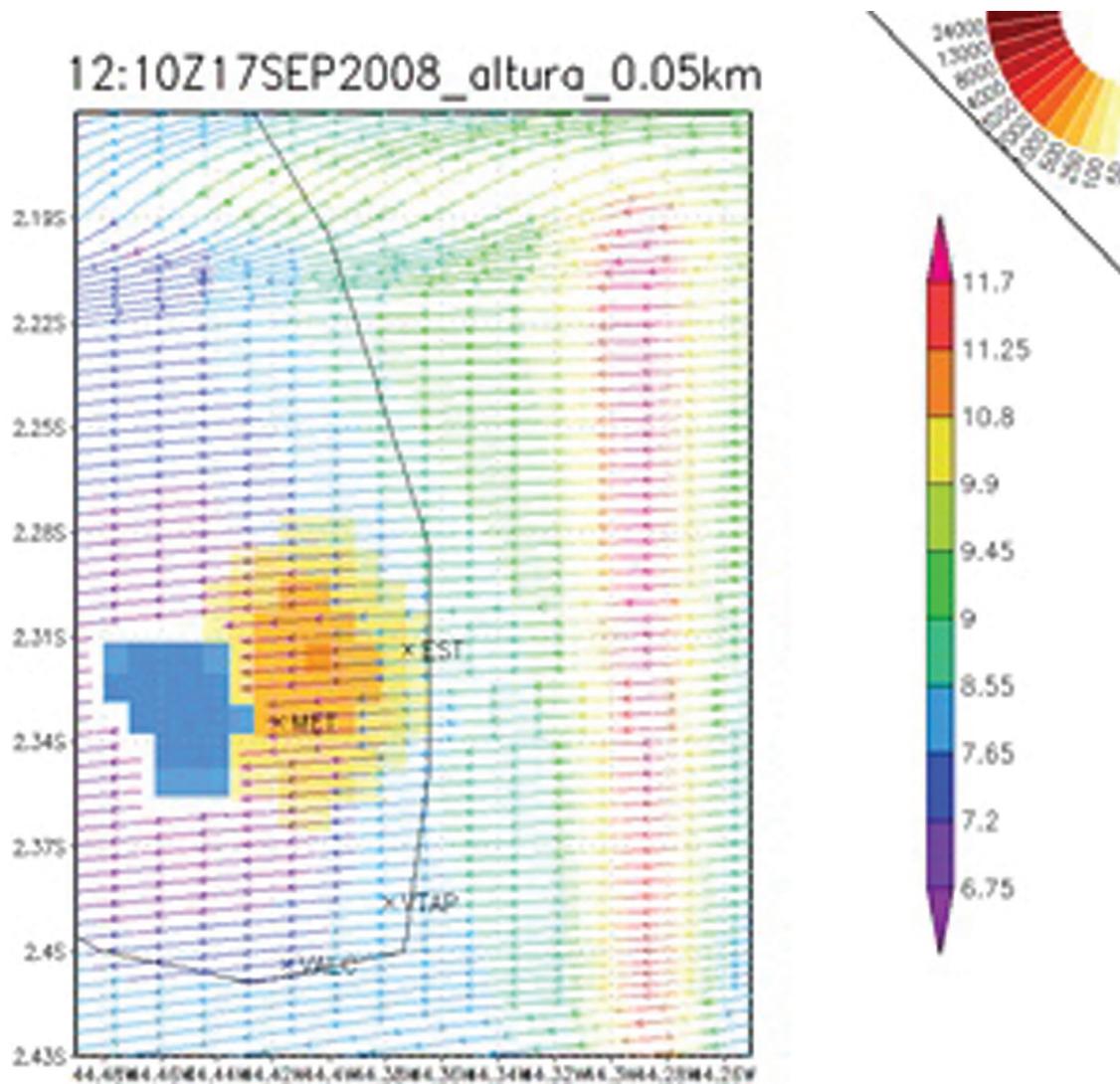


Figura 8 - Variação espacial da concentração de CO₂ (barra em leque no canto superior direito) e linhas de corrente (barra vertical a direita) para o dia 17/09/2008 às 12:10 UTC.

reram depois de 35 min da liberação da pluma. A pluma atinge a VALC depois de 15 min de sua liberação e permanece sobre a região até 83 min. Valores superiores a 50 ppmv foram registrados depois de 23 min da liberação da pluma, permanecendo até o 50 min. A localidade VTAP registrou os menores valores de CO para a liberação às 00 UTC do período chuvoso. Os valores máximos de concentração foram de aproximadamente 37 ppmv e ocorreram 25 min depois da liberação da pluma. A pluma atingiu esta localidade 11 min depois de liberada e ficou sobre ela até 50 min. Valores superiores a 10 ppmv ficaram sobre esta localidade por 21 min.

A Fig. 13 mostra a distribuição logarítmica dos valores de CO para as localidades EST, MET, VALC e VTAP. Nota-se que a localidade EST atinge no início da simulação o valor de máxima concentração de CO, de aproximadamente 20000 ppmv. Valores acima de 1000 ppmv ficam

sobre EST durante 4 min. A pluma deixa de influenciar na concentração de CO depois de 10 min de sua liberação. Como já visto em todas as liberações anteriores, a localidade EST foi a que registrou os maiores valores de CO. A localidade MET, assim como as liberações anteriores foi a segunda a registrar os valores mais altos de concentração de CO. Os valores mais altos registrados foram de aproximadamente 380 ppmv e eles ocorreram 13 min depois da liberação da pluma. Valores superiores a 50 ppmv ficaram sobre esta localidade por 20 min. A pluma atingiu a MET depois de 5 min de sua liberação, permanecendo até 35 min. A liberação diurna da pluma durante o período chuvoso teve valores de concentração maiores que a liberação diurna da pluma durante o período seco. A localidade VALC, assim como a liberação noturna do período chuvoso e diferente das liberações do período seco registrou as terceiras maiores concentrações de CO. Os valores máximos

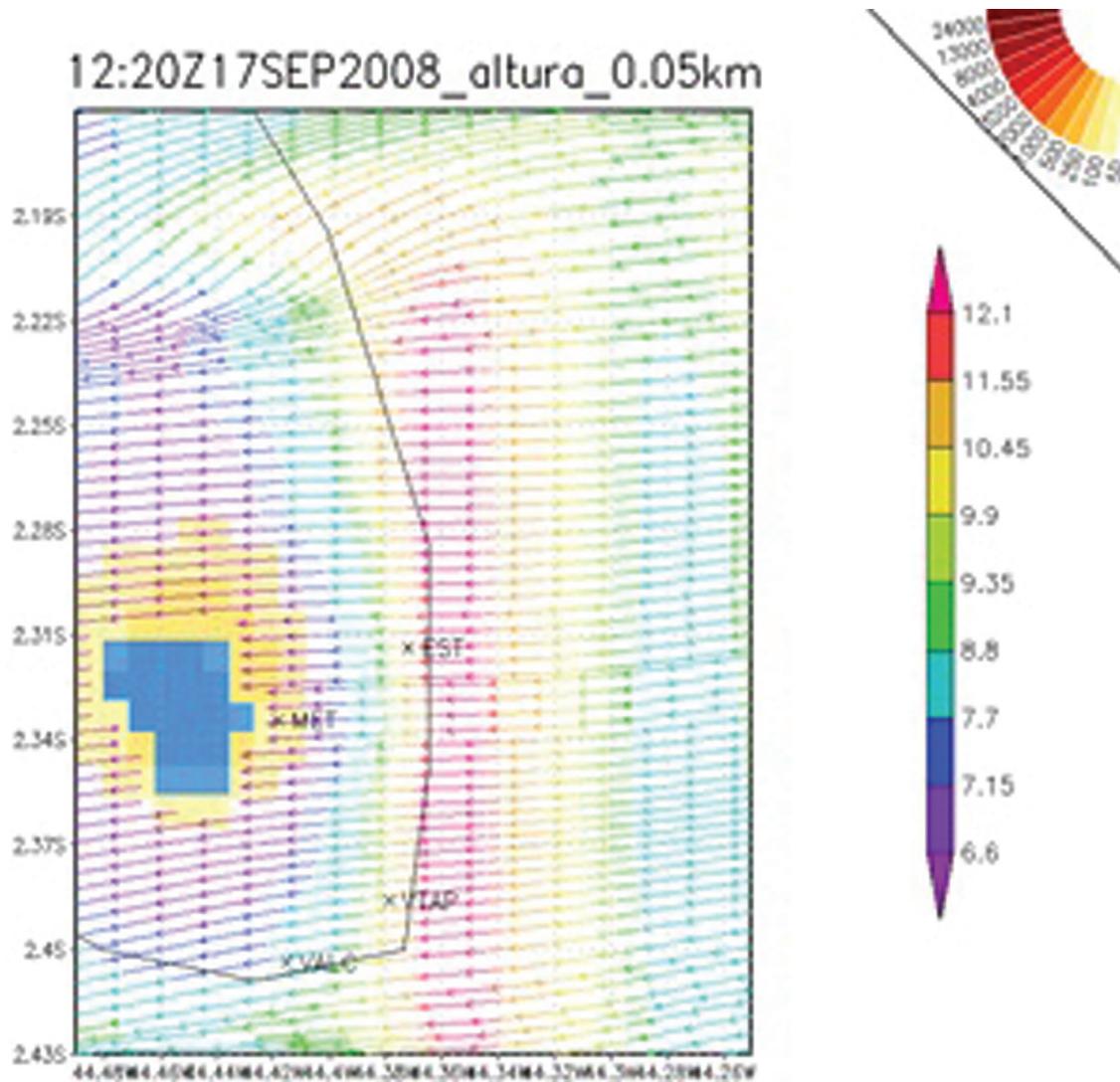


Figura 9 - Variação espacial da concentração de CO₂ (barra em leque no canto superior direito) e linhas de corrente (barra vertical a direita) para o dia 17/09/2008 as 12:20 UTC.

foram de aproximadamente 17 ppmv e ocorreram 22 min depois da liberação da pluma. A pluma atingiu esta localidade 9 min depois de sua liberação e permanecendo sobre ela até 42 min. Os valores superiores a 10 ppmv ficaram sobre a localidade por 18 min. Mesmo com as figuras espaciais mostrando que valores superiores a 50 ppmv não atingiram a localidade VALC, ocorreram variações nas concentrações de CO nesta região. A localidade VTAP, assim como a localidade VALC não foi atingida por valores superiores a 50 ppmv de CO, entretanto uma elevação do CO sobre a VTAP foi notada. O valor mais elevado de CO registrado foi de aproximadamente 6,2 ppmv, sendo este valor registrado 14 min após a liberação da pluma. Esta alteração de CO sobre a VTAP foi registrada 4 min após a liberação da pluma e sua variação durou por 31 min. A localidade VTAP foi a que registrou os menores valores de CO para a liberação diurna da pluma

4. Conclusões

Este trabalho permitiu analisar a trajetória de uma nuvem de gás (no caso, representado pelo poluente CO) liberado pela queima de combustível de um foguete lançado no CLA, utilizando o modelo atmosférico regional WRF acoplado com o módulo químico (CHEM). Foram simulados casos representativos das variações das condições meteorológicas para as escala de tempo diária (liberação diurna e noturna) e sazonal (liberação no período chuvoso e seco).

O vento é o elemento meteorológico que mais influenciou na dispersão da pluma. Inicialmente, fez-se uma avaliação do comportamento das simulações do modelo WRF-CHEM com relação a dados observados *in situ*. Os resultados e métricas obtidos indicam que o modelo previu os dados de vento com uma boa acurácia, permitindo o seu uso para os cálculos de dispersão e trajetória.

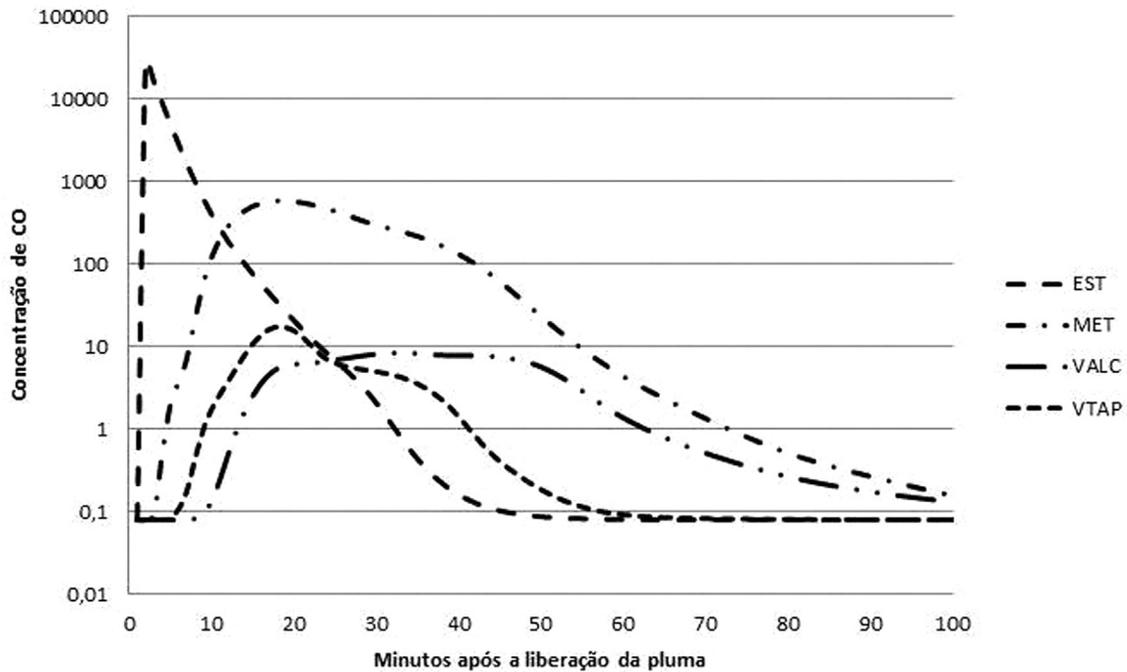


Figura 10 - Distribuição logarítmica da concentração de CO para as quatro localidades, para a liberação da pluma as 00 UTC do dia 17/09/2008.

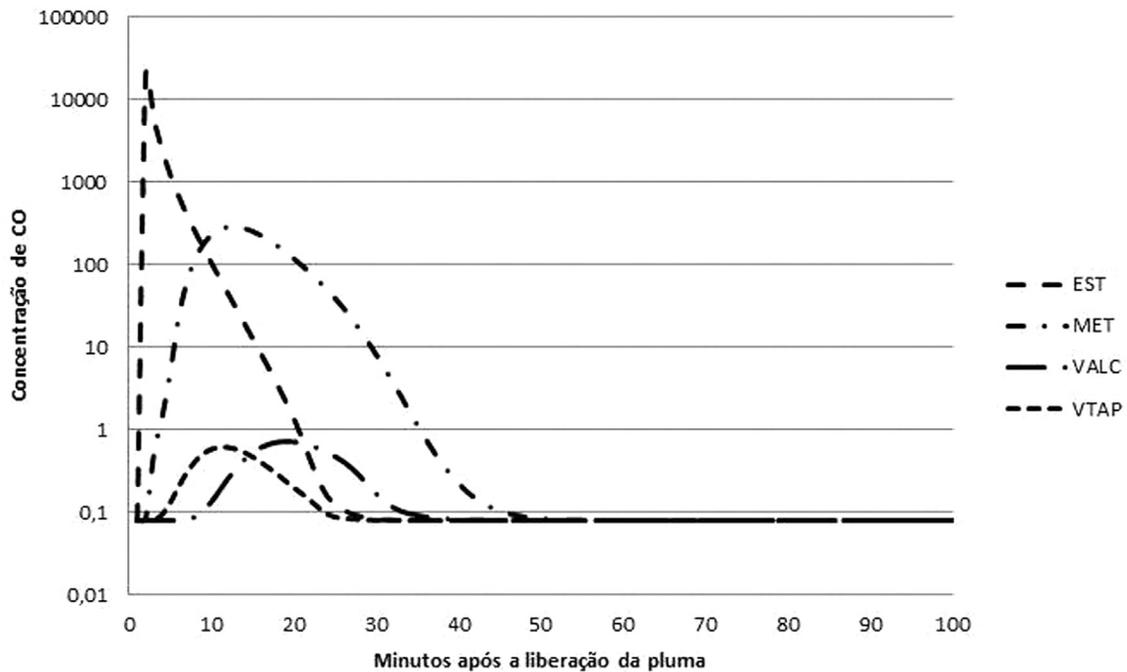


Figura 11 - Distribuição logarítmica da concentração de CO para as quatro localidades para a liberação da pluma as 12 UTC do dia 17/09/2008.

Com os resultados das simulações, foi possível realizar uma análise sobre a variabilidade espacial (trajetória da nuvem na região do CLA) e temporal (tempo de permanência do poluente acima de valores considerados críticos). Com relação ao deslocamento espacial da pluma, as localidades mais próximas do SPL (EST e MET) foram as que apresentaram os maiores valores, sendo que as concen-

trações no EST foram duas ordens de grandeza maiores do que as da MET. Assumindo o valor crítico de 1500 ppmv/min como um limite suportável para seres humanos, nota-se que este é superado nestas duas localidades, recomendando-se que as pessoas fiquem abrigadas e protegidas nos primeiros 10 min do lançamento no EST, e entre 10 e 30 min na MET e vizinhanças (incluindo o Centro

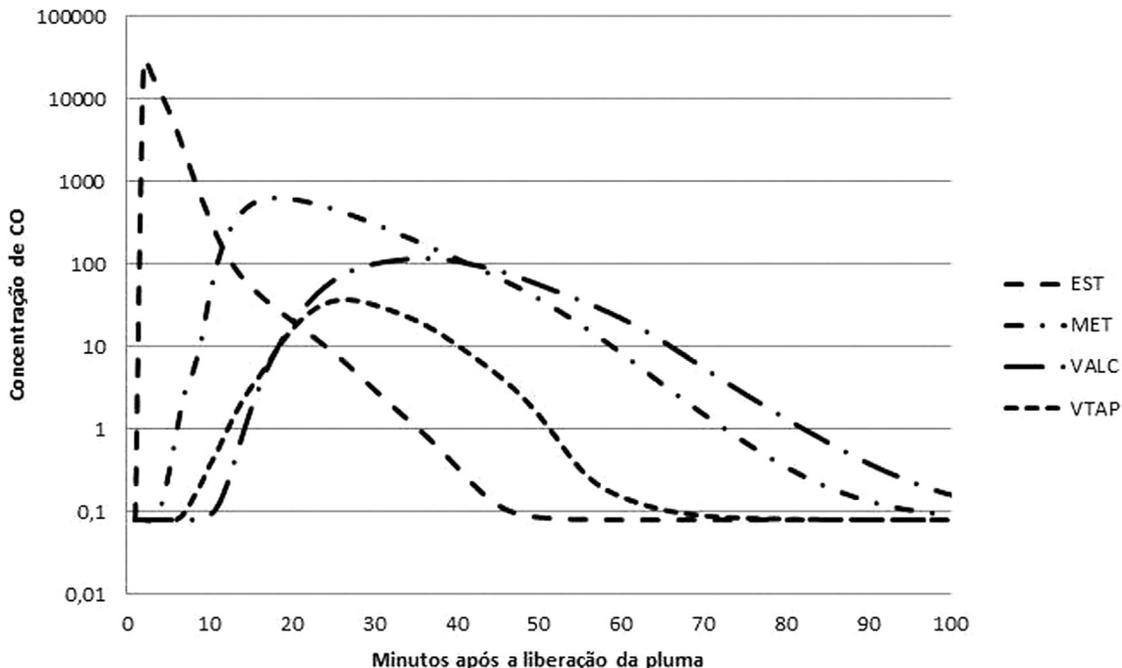


Figura 12 - Distribuição logarítmica da concentração de CO para as quatro localidades para a liberação da pluma as 00UTC do dia 20/03/2010.

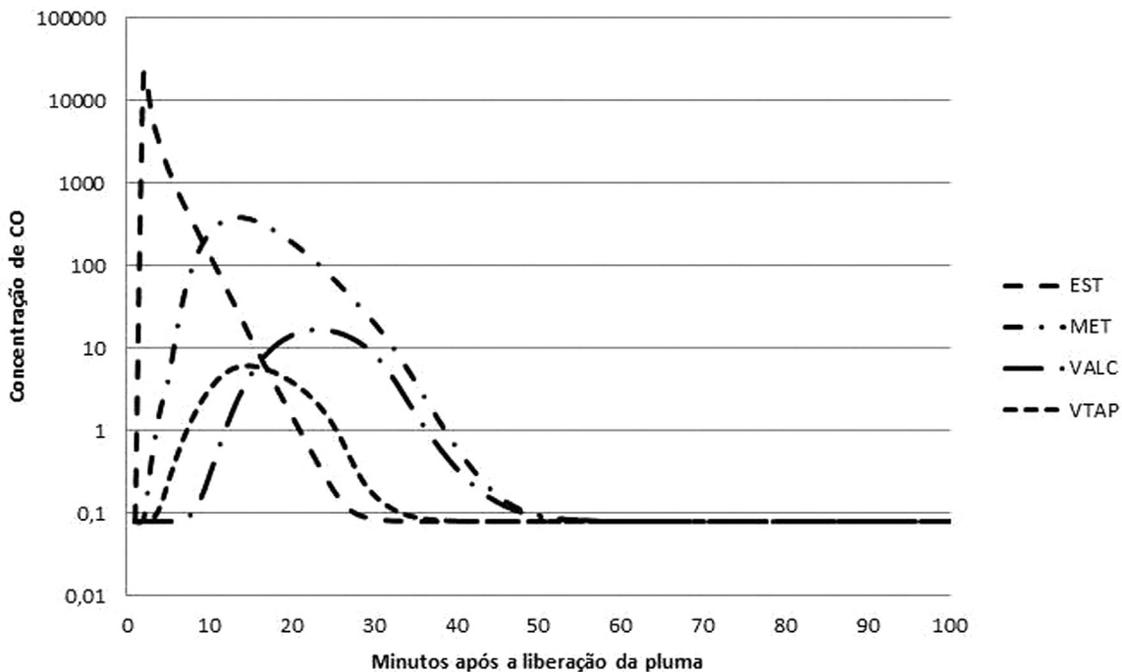


Figura 13 - Distribuição logarítmica da concentração de CO para as quatro localidades para a liberação da pluma as 12 UTC do dia 20/03/2010.

Técnico do CLA). Um outro resultado interessante é que a direção do vento é fundamental para a pluma atingir (ou não) as localidades que possuem pessoas não relacionadas com a campanha de lançamento (por exemplo VTAP e VALC). Este fato pode ser melhor explorado e ser considerado como um critério (GO ou NOGO) para o lançamento do veículo ocorrer, garantindo-se a segurança ambiental de

toda a região. A dispersão total da pluma é variada (depende das condições meteorológicas), mas oscilou entre 30 min (caso diurno no período seco) para 90 min (caso noturno no período chuvoso).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo apoio através do projeto PRO-ESTRATEGIA (número 2240/2012) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa PQ 308011/2014-7 para o segundo autor (GF). Os autores também agradecem aos colegas Daniel A. Schuch e Vinicius C. Milanez, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho. Agradecimentos aos dois revisores anônimos que contribuíram para a melhoria deste trabalho.

Referencias

- ALONSO, M.F.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; FONSECA, R.M.; MARECAL, V.; PIRRE, P.; KLENNER, L.G.; An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. **Atmospheric environmental**, v. 44, n. 39, p. 5072-5083, 2010.
- ARBEX, M.A.; **Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana de açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara-SP**. 2001. 204 f. Tese (Doutorado em medicina), Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CLA, Portal oficial <http://www.cla.aer.mil.br/index.php/beneficios>; acessado em 20/05/2014.
- BARROS, S.S.; OYAMA, M.D.; Sistemas meteorológicos associados à ocorrência de precipitação no centro de lançamento de Alcântara. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 3, p. 333-344, 2010.
- BJORKLUND, J.R.; DUMBAULD, J.K.; CHENEY, C.S.; GEARY, H.V.; **User's Manual for the REEDM (Rocket Exhaust Effluent Diffusion Model) Computer Program**, Huntsville, AL: NASA 1982 (contractor report 3646).
- CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMES-GESTEIRA, M.; SANTOS, C; A sensitivity study of the WRF model in Wind simulation for an area of high wind energy. **Environmental Modeling & Software**, V.33, p. 23-34, 2012.
- CENCETTI, M.; VEILLEUR, V.; ALBERGEL, A.; OLYR, C; SARRIM: A tool to follow the rocket releases used by the CNES Environment and Safety Division on the European Spaceport of Kourou (French Guyana), **International Journal of Environment and Pollution**, vol. 44, n. 1/2/3/4 pp. 87-95, 2011, doi: 10.1504/IJEP.2011.038406.
- CHAPMAN, E.G.; GUSTAFSON JR., W.I.; BARNARD, J.C.; GHAN, S.J.; PEKOUR, M.S.; FAST, J.D.; Coupling aerosol-cloud-radioactive processes in the WRF-Chem model: Investigating the radiative impact of large point sources. **Atmos. Chem. Phys.**, v. 9, p. 945-964, 2009.
- CHEN, D.; LI, Q.; STUTZ, J.; MAO, Y.; ZHANG, L.; PIKELNAYA, O.; TSAI, J.Y.; HAMAN, C.; LEFER, B.; RAPPENGLÜCK, B.; ALVAREZ, S.; NEUMAN, J.A.; FLYNN, J.; ROBERTS, J.M.; NOWAK, J.B.; GOUW, J.; HOLLOWAY, J.; WAGNER, N.L.; VERES, P.; BROWN, S.S.; RYERSON, T.B.; WARNEKE, C.; POLLACK I.B.; WRF-CHEM simulation of NO_x and O₃ in the L.A. basin during CalNex-2010. **Atmospheric Environment**, v. 81, p. 421-432, 2013.
- CUCHIARA, G.C.; LI, X.; CARVALHO, J.; RAPPENGLUCK, B.; Intercomparison of planetary boundary layer parametrization and its impacts on surface ozone concentration in the WRF/Chem model for a case study in Houston/Texas. **Atmospheric Environment**, v. 96, p. 175-185, 2014.
- FORKEL, R.; WERHAHN, J.; HANSEN, A.B.; MCKEEN, S.; PECKHAM, S.; GRELL, G.; SUPPAN, P.; Effect of aerosol-radiation feedback on air quality - A case study with WRF/Chem. **Atmospheric Environment**, v. 53, p. 202-211, 2012.
- FREITAS, S.R.; LONGO, K.M.; ALONSO, M.F.; PIRRE, M.; MARECAL, V.; GRELL, G.; STOCKLER, R.; MELLO, R F.; SANCHEZ-GÁACITA, M.; PREP-CHEM-SRC - 1.0: a preprocessor of trace gas and aerosol emission fields for regional and global atmospheric chemistry models, **Geosci. Model Dev.**, 4, 419-433, 2011.
- GACITA, M.S.; **Estudos numéricos de química atmosférica para a região do Caribe e América Central com ênfase em Cuba**. 2011. 106 f., Dissertação (mestrado em meteorologia). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- GACITA, M.S.; ALONSO, M.F.; LONGO, K.M.; FREITAS, S.R.; Melhoria do Inventário de Emissões para a modelagem da qualidade do ar em Cuba. In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2010, Belém. **Anais... XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Belém 2010.
- GISLER, C.A.F.; **Análise do perfil de vento na camada limite superficial e sistemas meteorológicos atuantes no Centro de Lançamento de Alcântara**. 2009. 143 p. Dissertação (mestrado em meteorologia)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- GRELL, G.A.; PECKHAM, S.E.; SCHMITZ, R.; MCKEEN, S.A.; FROST, G.; SKAMAROCK W.C.; EDER, B.; Fully coupled online chemistry within the WRF model. **Atmos. Environ.**, v. 39, p. 6957-6975, 2005.
- IRIART, P.; SILVA, A.; FISCH, G.; Uso de modelos Atmosféricos de alta resolução para a determinação dos ventos no Centro de Lançamento de Alcântara. **Ciência e Natura**, v. especial/Novembro - VIII Brazilian Micrometeorology Workshop, p. 402-404, 2013.
- IRIART, P.G.; CARVALHO, M.V.C; PEREIRA NETO, A.V.; **Manual de instalação, compilação e execução do sistema de modelagem numérica WRF no ICEA**, São José dos Campos, SP: Instituto de Controle do Espaço Aéreo, Subdivisão de Climatologia e Arquivo Meteorológico (PBCA), 2011 35 p.
- LACERDA, A.; LEROUX, T.; MORATA, T.; Efeitos ototóxicos da exposição ao monóxido de carbono: uma revisão. **Pró-Fono revista de Atualização Científica**, V. 17, p. 403-412, 2005.
- MAGNAGO, R.; FISCH, G.; MORAES, O.; Análise espectral do vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 260-269, 2010.
- MOREIRA, D.M.; TRINDADE, L.B.; FISCH, G.; MORAES, M.R.; DORADO, R.M.; GUEDES, R.L.; A multilayer model to simulate rocket exhaust clouds. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 3, p. 41-52, 2011.
- MEDEIROS, L.E.; MAGNAGO, R.O.; FISCH, G.; MARCIOTTO, E.R.; **Observational Study of the Surface**

- Layer at an Ocean-Land Transition Region.** *J. Aerosp. Technol. Manag.*, v. 5, n. 4, p.449-458, 2013.
- NASCIMENTO, E.G.S.; MOREIRA D.M.; FISCH G; ALBUQUERQUE T.T.A.; Simulation of Rocket Exhaust Clouds at the *Centro de Lançamento de Alcântara* Using the WRF-CMAQ Modeling System, *J. Aerosp. Technol. Manag.*, v. 6, n. 2, p.119-128, 2014.
- PEREIRA NETO, A.V.; OYAMA, M.D.; Mudanças no esquema de convecção profunda Kain-Fritsch para a região do centro de lançamento de Alcântara. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 4, p. 579-590, 2011.
- PIRES, L.B.M.; **Estudo da Camada Limite Interna desenvolvida em falésias com aplicação para o Centro de Lançamento de Alcântara.** 2009. 165 p. (INPE-16566-TDI/1562). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.
- PRABHA, T.; HOOGENBOOM, G. Evaluation of the Weather Research and Forecasting model for two frost events. *Computers and electronics in agriculture*, v.64, n. 2, p. 234-247, 2008.
- RAJASEKHAR, M.; KUMAR, M.D.; SUBBANANTHAN, T.; SRIVASTAVA, V.; APPARAO, B.; RAO, V.S.; PRASAD, M.; Exhaust dispersion analysis from large solid propellant rocket motor firing using HYSPLIT model over Satish Dhawan Space Centre (SDSC SHAR), In: Indo-US Conference-cum-Workshop on “Air Quality and Climate Research”, ASCI Hyderabad, 2011. **Procedins Indo-US Conference-cum-Workshop on “Air Quality and Climate Research”**, ASCI Hyderabad, 2011.
- GOMES DA SILVA, A.F.; FISCH, G.; Avaliação do modelo WRF para a previsão do vento no centro de lançamento de Alcântara. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 29, n. 2, p. 259-270, 2014.
- GOMES da SILVA, A.F.; **Avaliação do modelo WRF ao perfil do vento no centro de lançamento de Alcântara.**, 2013. 76 p., Dissertação (mestrado em meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- KLICH, C.A.; FUELBERG, H.E.; The role of horizontal model resolution in assessing the transport of CO in a middle latitude cyclone using WRF-CHEM. *Atmos. Chem. Phys.*, v. 14, p. 609-627, 2014.
- SEINFELD, J.H.; PANDIS, S.N.; **Atmospheric Chemistry and physics: from air pollution to climate change.** John Wiley & Sons, 2012.
- SKAMAROCK, W.C.; KLEMP, J.B.; DUDHIA, J.; **A description of the Advanced Research WRF version 3.** National Center for Atmospheric Research Technical Note: [S.l: s.n.], 2008, 113 p.
- SILVA JUNIOR, R.S.; ANDRADE, M.F.; Validação de poluentes fotoquímicos e inclusão do inventário de emissões no modelo de qualidade do ar WRF-CHEM, para a região metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 1, p. 105-121, 2013.
- WANG, W.; SHAW, W.J.; SEIPLE, T.E.; RISHEL, J.P.; XIE, Y.; An evaluation of a diagnostic wind model (CALMET). *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 47, n. 6, p. 1739-1756, 2008.
- WHO http://www.who.int/ipcs/publications/ehc/ehc_213/en/; acessado em 04/11/2014.
- YAHYA, K.; WANG, K.; ZHANG, Y.; KLEINDIENST, T. E.; Aplicarion of WRF/Chem over North America under the AQMEII Phase 2- Part 2: Evaluation of 2010 application and responses of air quality and meteorology-chemistry interactions to changes in emissions and meteorology from 2006 to 2010. *Geosci. Model Dev.*, v. 8, p. 2095-2117, 2015.
- ZABKAR, R.; HONZAK, L.; SKOK, G.; FORKEL, R.; RAKOVEC, J.; CEGLAR, A.; ZAGAR, N.; Evaluation of the high resolution WRF-Chem (V3.4.1) air quality forecast and its comparison with statical ozone predictions. *Geosci. Model Dev.*, v. 8, p. 2119-2137, 2015.