Artigo

Simulação das Trajetórias de Poluentes em Eventos Naturais e Antropogênicos

Silva, C. M.;* Tsuruta, F.; Rodrigues, J. C.; Vieira, F.; Arbilla, G.

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (6), 1828-1848. Data de publicação na Web: 12 de dezembro de 2018

<http://rvq.sbq.org.br>

Simulation of Pollutant Trajectories in Natural and Anthropogenic Events

Abstract: Several evidences support the idea that the *Homo sapiens* has become a geological force, which may introduce changes not only in human life but also in the life of all living species in the Earth and on the equilibrium of chemical and biochemical process. Nowadays, some anthropogenic events, such as accidents in industrial and energy supplies, mainly nuclear plants, may release huge quantities of pollutants which may affect Earth's life in a similar way than natural events, such as volcanic eruptions. In this work, the trajectory model HYSPLIT (Hybrid Singled-Particle Lagrangian Integrated Trajectory), which has an easy implementation, is presented to simulate the air trajectories. As case studies, a natural event, the Puyehue volcano (Chile) eruption, and a fire episode in the port area of Guarujá (SP, Brasil) were selected. The volcano eruption began on June 04, 2011 and the ashes first reached the region of Bariloche and Villa La Angostura (Argentina). Lately the ashes reached the North of Patagonia and Buenos Aires (Argentina) and finally Uruguay, Paraguay, Bolivia and the South of Brazil (Rio Grande do Sul and Santa Catarina). The fire in Guarujá lasted 37 hours and began in a freight terminal on January 14, 2016. Toxic gases affected the accident area (Vicente de Carvalho District in the city of Guarujá, SP), and diffused in Guarujá, reaching Santos and Cubatão. Using HYSPLIT model, it was possible to reproduce the air masses trajectories in a good agreement with available data for both events. This study shows that the program, which can be used online, provides satisfactory results, consistent with satellite data and information from meteorological and air quality stations, both for natural events, such as volcanic eruptions and natural fires, and, also for accidents in industries, nuclear plants and fires.

Keywords: Anthropocene; particulate matter; atmospheric pollution; pollutants dispersion; HYSPLIT; environmental chemistry.

Resumo

Diversas evidências suportam a ideia de que o *Homo sapiens* tem se transformado em uma força geológica, capaz de introduzir mudanças que afetam não apenas sua própria vida, mas a vida de todas as espécies sobre a Terra e sobre o equilíbrio dos processos químicos e biológicos. Atualmente alguns eventos antropogênicos, como acidentes em fábricas e plantas industriais de geração de energia, especialmente a nuclear, podem liberar grandes quantidades de poluentes e afetar a vida sobre a Terra em forma semelhante a processos naturais, como erupções vulcânicas. Neste trabalho é apresentado o modelo de trajetórias HYSPLIT (*Hybrid Singled-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*), de fácil implementação, para simular as trajetórias de massas de ar. Como estudo de caso, são discutidos um evento natural, a erupção do vulcão Puyehue (Chile) e um incêndio na região portuária de Guarujá (SP, Brasil). A erupção do vulcão se iniciou no dia 04 de junho de 2011 e as cinzas atingiram inicialmente a região de Bariloche e Villa La Angostura (Argentina) e posteriormente o norte da Patagônia, chegando a Buenos Aires (Argentina) e posteriormente a Uruguai, Paraguai, Bolívia e o sul de Brasil (Rio Grande do Sul e Santa Catarina). O incêndio no Guarujá aconteceu durante 37 horas e se iniciou em um terminal de cargas do porto no dia 14 de janeiro de 2016. Os gases tóxicos afetaram a área do acidente (Distrito de Vicente de Carvalho na cidade de Guarujá, SP), se espalhando por Guarujá e chegando a Santos e Cubatão. O modelo HYSPLIT permitiu reproduzir a trajetória das massas de ar em um bom acordo com os dados disponíveis sobre ambos os eventos. O trabalho mostra que o programa, que pode ser utilizado online, fornece resultados satisfatórios, compatíveis com imagens de satélite e informações de agências meteorológicas e de qualidade do ar, tanto para desastres naturais, como erupções vulcânicas e queimadas em florestas, quanto para acidentes industriais, como aqueles em usinas nucleares e incêndios em fábricas.

Palavras-chave: Antropoceno; material particulado; poluição atmosférica; dispersão de poluentes; HYSPLIT; química ambiental.

* Universidade Veiga de Almeida, Campus Maracanã, CEP 20271-020 Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

martins.cleyton@gmail.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20180120](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180120)

Simulação das Trajetórias de Poluentes em Eventos Naturais e Antropogênicos

Cleyton M. da Silva,^{a,b,*} Felipe Tsuruta,^{a,b} João Carlos Rodrigues,^c Flavia Vieira,^c Graciela Arbilla^a

^a Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Departamento de Físico-Química, CEP. 21941-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

^b Universidade Veiga de Almeida, Campus Maracanã, CEP 20271-020 Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

^c Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro, Campus Maracanã, CEP 20271-020, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

* martins.cleyton@gmail.com

Recebido em 30 de outubro de 2018. Aceito para publicação em 30 de outubro de 2018

1. Introdução

- 1.1. A erupção do vulcão Puyehue (Chile)
- 1.2. O acidente no Porto de Guarujá (Brasil)

2. Material e Métodos

- 2.1. Simulação das trajetórias das massas de ar

3. Resultados e Discussão

- 3.1. A erupção do vulcão Puyehue (Chile)
- 3.2. O acidente na Porto de Guarujá (Brasil)

4. Conclusões

1. Introdução

O impacto das atividades humanas sobre o planeta em uma escala global e seu papel central em mudanças ambientais, geológicas e biológicas, levaram ao reconhecimento do homem como uma força geológica capaz de alterar o equilíbrio da Terra.¹ Surgiu assim o conceito de Antropoceno, formalizado em 2000 em uma publicação do biólogo Eugene F. Stoemer e do ganhador do Prêmio Nobel de Química, Paul Crutzen, na *Newsletter* do

International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) do mês de maio.¹

A maioria dessas mudanças estão relacionadas ao crescimento populacional, ao avanço tecnológico e ao aumento no uso da energia e outros recursos naturais.² Pesquisas recentes mostram que o aparecimento do *Homo sapiens* aconteceu há aproximadamente 315.000 anos.³ Só aproximadamente 8.000 anos atrás, com uma população de aproximadamente 18 milhões de pessoas e com o início das práticas de desflorestamento e desenvolvimento da

agricultura, se verificaram as modificações da paisagem e o aumento nas concentrações de CO₂ de origem antrópica.^{2,4} No século XIX se inicia o crescimento acelerado da população mundial, mas é só a partir de 1950, que o crescimento exponencial da população, das atividades econômicas e do uso dos recursos marcam um novo período na história da humanidade, conhecido como a Grande Aceleração, onde as mudanças se tornam globais e, em muitos casos, irreversíveis.⁵

A área de superfície terrestre modificada pelo homem para uso na agricultura e criação de gado, mineração, deposição de sedimentos e resíduos, urbanização, construção de rodovias e redes ferroviárias supera 50 % do planeta, sendo que parte da área restante é de florestas não necessariamente pristinas em regiões polares e desérticas, não apropriadas para a vida humana.⁶ Estima-se que as atividades de mineração deslocam aproximadamente 57.000 Tg ano⁻¹ (sendo 1 T = 10¹²) de sedimentos, valor três vezes superior ao transportado pelos rios e oceanos.⁷ A produção de materiais como alumínio, concreto, plásticos e fibras sintéticas tem crescido exponencialmente nos últimos 70 anos.² A concentração de CO₂ tem aumentado de 285 ppm na época pré-industrial a valores maiores que 400 ppm,⁸ as concentrações de nitrogênio e fósforo em solos têm duplicado nos últimos cem anos devido principalmente ao uso de fertilizantes e seu transporte a rios, lagos e oceanos, e têm afetado a vida nesses compartimentos e a liberação de óxidos de nitrogênio nos processos de combustão também tem modificado os ciclos do nitrogênio.^{2,5}

A modificação do *habitat*, aumento das concentrações de CO₂ e da temperatura média terrestre tem levado ao declínio no número de espécies animais e vegetais e a previsão de “um sexto evento de extinção massiva das espécies”.⁹ Segundo a União Internacional de Conservação da Natureza nos últimos 500 anos foram extintas mais de 600 espécies de vertebrados.¹⁰ O valor considerado de “background” na literatura se encontra, para os mamíferos, entre 1 e 2 espécies por milhão de espécies por ano (1-2

E/MSY) e já foi superado pelo menos em um fator de 100 nos últimos cem anos.¹⁰ São conhecidos cinco eventos massivos de extinção de espécies, três na Era Paleozóica e as duas últimas na Era Mesozóica, assim este seria o primeiro evento causado pelas atividades antrópicas.⁹

Estas e outras evidências suportam a ideia de que o *Homo sapiens* tem se transformado em uma força geológica, capaz de introduzir mudanças que afetam não apenas sua própria vida, mas a vida de todas as espécies sobre a Terra e sobre o equilíbrio dos processos químicos e biológicos.¹¹ Para aprofundar essa comparação entre processos naturais e antrópicos é possível analisar o acontecido em erupções vulcânicas e acidentes em indústrias ou plantas industriais e de geração de energia, onde grandes quantidades de materiais são liberadas no ambiente.

A maior erupção vulcânica nos últimos 10 mil anos foi a do Vulcão Monte Tambora (Ilha de Sumbawa, Indonésia) em abril de 1815. Foram expelidos 140 Gt (onde 1 G = 10⁹) de magma e a pluma do vulcão atingiu 43 km de altitude. Aproximadamente 71.000 pessoas morreram como consequência da explosão em Sumbawa e na ilha vizinha de Lombok, por causa das queimaduras, doenças e fome. A erupção injetou aproximadamente 60 Mt (onde 1 M = 10⁶) de enxofre na atmosfera levando à formação de aerossóis e a perturbações no clima, principalmente no Hemisfério Norte. O ano de 1816 foi conhecido como “o ano sem verão”, culturas agrícolas colapsaram, o gado morreu e muitas pessoas emigraram por causa da fome e as doenças.¹²

Já no dia 26 de abril de 1986 aconteceu o maior acidente nuclear na história do uso civil da energia nuclear, com a explosão e incêndio na central elétrica da Usina Nuclear de Chernobyl (Ucrânia).¹³ Grandes quantidades de iodo (I-131) e cério (Cs-137) radiativo foram liberadas, a maioria nas imediações, mas uma quantidade considerável foi levada pelos ventos através de Europa ocidental e oriental. Segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS), 4000 pessoas morreram pela exposição à radiação, seja em forma direta (50

peças) ou indiretamente, até 2004, pelas sequelas da exposição.¹⁴ Segundo um relatório publicado pela OMS vinte anos após o acidente,¹⁴ aproximadamente 1000 funcionários foram expostos à radiação no primeiro dia e mais de 200 mil pessoas foram expostas durante as operações de emergência posteriores (1986-1987), 5 milhões de habitantes que moram na Bielorrússia, Rússia e Ucrânia foram contaminadas e foram notificados aproximadamente 4.000 casos de câncer de tireoide e 350.000 pessoas se mudaram em uma experiência profundamente traumática, sendo que 100 mil moravam em áreas classificadas como de controle restrito após o acidente.¹⁴

Esses dois eventos, mesmo que não estritamente comparáveis, mostram como as atividades humanas podem levar a consequências tão catastróficas quanto os desastres naturais. Ambos eventos são extraordinários, e não é o objetivo deste artigo discutir as causas e consequências deles. Contudo, eventos de menor magnitude e, portanto, mais prováveis, modificam, também, as condições do local e de seu entorno.

Neste trabalho é apresentado um modelo de trajetórias de fácil utilização para simular as trajetórias de massas de ar. Como estudo de caso são discutidos um evento natural, a erupção do vulcão Puyehue (Chile), em 2011, e um acidente industrial na região de Guarujá (SP, Brasil) em 2016. Através desses exemplos é mostrado que modelos relativamente simples podem fornecer informações valiosas sobre a dispersão de poluentes tanto em eventos naturais como em eventos devidos às causas antrópicas.

1.1. A erupção do vulcão Puyehue (Chile)

O Vulcão Puyehue está localizado no Chile (coordenadas geográficas 40.35° S; 72.07° O), no Parque Nacional Puyehue, cidade de Río Bueno, Província de Ranco, região de Los Ríos,

numa altitude de 2.200 m sobre o nível do mar.¹⁵ Este vulcão, juntamente com o Cordón del Caulle e o Cordilheira Nevada, constituem um sistema vulcânico conhecido por Complexo Vulcânico Puyehue - Cordón Caulle, que forma parte do chamado “Círculo de Fogo do Pacífico”. O Parque Nacional Puyehue é um dos cinco parques naturais da Região de Los Lagos na Patagônia Chilena. Localizado na Cordilheira dos Andes, a 80 km da cidade de Osorno (capital da Província de Osorno, na Região de Los Lagos) tem 10.700 km² e é o parque mais visitado e desenvolvido do Chile.¹⁶

O município de Río Bueno tem uma área de 2.740 km² correspondente a 33,28 % da Província de Ranco (8.232,3 km²) e 14,86 % da região total (18.429,5 km²), dividindo-se em 2.733 km² correspondentes a 99,75 % de área rural e 7 km² de superfície que corresponde a 0,25 % de área urbana. A região é dividida em 10 distritos, dos quais apenas dois são distritos urbanos e os oito restantes rurais.¹⁷

O Chile faz divisa com a Argentina através de parte da Cordilheira dos Andes por 5.308 km. Em lado oposto à Cordilheira e em território Argentino, está o município de San Carlos de Bariloche, pertencente à Província de Río Negro, uma das seis províncias que integram a Patagônia argentina. A cidade, com uma população de aproximadamente 130.000 habitantes, está localizada no Parque Nacional Nahuel Huapi que, com 7.000 km², é um dos mais extensos da Argentina. A Província de Río Negro tem fronteiras naturais, ao norte com o rio Colorado, ao sul pela Província de Chubut, ao leste com o mar Argentino e ao oeste com a Cordilheira dos Andes e o Rio Limay. Sua fronteira sul coincide com o paralelo 42º sul. O território tem área de 203.013 km² e é dividido administrativamente em 13 departamentos.¹⁸

Na Figura 1 é mostrada a localização do Parque Nacional Puyehue (Chile), da cidade de San Carlos de Bariloche e do Parque Nacional Nahuel Huapi (Argentina).

Figura 1. Localização geográfica do Vulcão Puyehue no Parque Nacional Puyehue (Chile) e da cidade de San Carlos de Bariloche e do Parque Nacional Nahuel Huapi (Argentina)

Fonte: GOOGLE MAPS, 2018¹⁹

O vulcão Puyehue é considerado um dos nove vulcões que oferece maior risco no Chile, encontrando-se geralmente em nível de alerta amarelo, que significa que é considerado instável, com frequentes explosões menores. O vulcão iniciou a erupção às 19:15 UTC (*Universal Time Coordinated*) do dia 04 de junho de 2011, segundo o *Servicio Nacional de Geología y Minería* do Chile.²⁰ A altura das cinzas durante a erupção inicial variou de 9 a 16 km; nos dias 04 e 05 de junho estabeleceu-se entre 6 e 16 km. Observações realizadas em 11 de junho demonstraram que altura das cinzas permaneceu entre 4 e 7 km, enquanto no dia 13 as cinzas permaneceram confinadas na faixa entre 5 a 7 km. Já no dia 12 houve uma outra erupção menor, que expeliu cinzas vulcânicas na faixa de altitude entre 9 e 11 km.²¹

As cinzas provenientes do vulcão atingiram os países vizinhos, afetando os voos de Argentina, Chile, Paraguai, Uruguai e Brasil. Os dois principais aeroportos de Buenos Aires (capital da Argentina), o aeroporto de Montevideo (capital do Uruguai) e os

aeroportos da Patagônia permaneceram fechados por vários dias.²² As cinzas vulcânicas continuaram sua dispersão, como consequência da movimentação das massas de ar e no final de junho e início de julho de 2011 alcançaram o sul da África, Nova Zelândia e Austrália.²²

Segundo o CPTEC-INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) e o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia),^{23,24} as cinzas chegaram à atmosfera brasileira no dia 07 de junho, mantendo-se numa faixa de altitude entre 6 e 7 km, porém, foi possível observar as cinzas que precipitaram sobre o território brasileiro, principalmente no Estado do Rio Grande do Sul.

As localidades de Bariloche e Villa La Angostura foram as mais prejudicadas, em detrimento da relativa proximidade com o vulcão (aproximadamente 100 km). O impacto se deu não somente no espaço aéreo, mas também pela precipitação de quantidade significativa de cinzas, formando uma camada espessa sobre o solo, a vegetação, as ruas,

rios, telhados dos imóveis, veículos, dificultando o trânsito de pessoas, tráfego de veículos, e impossibilitando o acesso às estações de esqui, bem como outros parques e pontos turísticos tipicamente localizados ao ar livre, característicos daquela região. Para uma cidade detentora do turismo como atividade econômica principal, a erupção do vulcão Puyehue atingiu o centro da economia local, que depende de esquiadores no

inverno, dos pescadores e praticantes de trilhas durante o verão. Os aeroportos regionais foram paralisados. As reservas nos hotéis permaneceram por mais de seis meses em forte queda e milhares de moradores se mudaram em busca de oportunidades melhores.²² Registros fotográficos e filmagens foram obtidos pelos meios de comunicação, turistas e moradores, como os mostrados na Figura 2.

Figura 2. Cinzas acumuladas na cidade de Bariloche e Lago Nahuel Huapi (Argentina) após a erupção do vulcão Puyehue (Chile) em junho de 2011. Fonte: fotografias cedidas por Vanessa Cristina Olivatti, da operadora de viagens Bariloche Total

Segundo o *Ministerio de Economia y Finanzas Públicas de la Argentina* e o *Instituto Nacional de Estadística y Censos* (INDEC),²⁵ o turismo na região da Patagônia – composta pelas províncias de Chubut, La Pampa, Neuquén, Rio Negro, Santa Cruz e Terra do Fogo – diminuiu em 23,7 % na região, sendo que a província de Rio Negro representou 34,1 % nesta parcela, considerando que a parcela significativa do turismo nesta província, provém da cidade de Bariloche.

Segundo Bermudez e Delpino,²⁶ as cinzas analisadas na região de Bariloche e nas províncias de Neuquén e Chubut, eram formadas por material amorfo proveniente do

arrefecimento de lavas vulcânicas (70 % de sílica) e possuíam as características de depósitos de bombas ou blocos vulcânicos (> 32 mm), lapíli ou bagacina (piroclastos com dimensões 32 – 2 mm), cinzas grossas (2 – 0,062 mm) e cinzas finas (< 0,062 mm). As cinzas maiores (blocos vulcânicos e lapíli) se depositaram em áreas mais próximas a região de Bariloche e Villa La Angostura, enquanto as cinzas menores foram depositadas em áreas mais distantes. Tal fato se deu desta forma, pois as cinzas maiores e conseqüentemente com mais massa, precipitaram mais rapidamente e em regiões mais próximas ao local de erupção, enquanto as menores (especialmente a chamada poeira vulcânica

com diâmetro $< 0,03$ mm) puderam ser transportadas por milhares de quilômetros de distância da fonte, através do regime de suspensão, considerando características importantes como densidade, forma e velocidade da partícula, e principalmente a direção do vento.

Gaytan *et al.* delimitaram a área afetada pelas cinzas nas províncias argentinas de Río Negro e Neuquén,²⁷ baseados na diferenciação de áreas por diferentes níveis de espessura. Entre o 3º e 55º dia de erupção, foram realizadas 276 observações em campo, onde foram feitas medidas das espessuras das cinzas registradas e suas respectivas localizações mediante equipamento de GPS (*Global Position System*). Assim, foi possível determinar que na Província de Río Negro, que foi a mais afetada, 97 % do território (197.000 km^2) foi coberto por cinzas e em 71,6 % do mesmo a espessura foi de até 0,2 cm. Na Província vizinha de Neuquén aproximadamente a metade do território (47.000 km^2) foi afetado, sendo que aproximadamente 3,5 % da superfície foi coberta com 5 a 30 cm de cinzas.²⁷

As cinzas vulcânicas afetam substancialmente as operações aéreas na atmosfera por onde atravessam. As aeronaves muitas vezes são impedidas de seguir rota pela aerovia pré-determinada, em face do acúmulo de cinzas, que provocam diversos problemas em diversas partes da mesma.²⁸ Dentre esses problemas, podem ser citados corrosão da fuselagem e materiais plásticos por ácidos formados a partir de gases ácidos provenientes da erupção; danificação de estruturas das turbinas não somente pelo mecanismo de corrosão, como pela abrasão por vidro vulcânico; entrada de cinzas no sistema Pitot-Estático (sistema utilizado para aferir velocidade e altitude); danificação dos dutos e filtros responsáveis por levar o ar da atmosfera para a cabine; deposição e solidificação das cinzas, vindo a bloquear a entrada de ar e bocal de combustível. Este último representa o principal fator de falha de turbinas aeronáuticas por ações de cinzas vulcânicas.²⁸

Dois dias após a erupção as cinzas tinham sido transportadas 1.400 km em direção NE, chegando à cidade de Buenos Aires (34.54° S , 58.44° O) e resultando na maior interrupção do tráfego aéreo na história dos dois aeroportos internacionais da cidade (Aeroparque e Ezeiza). Até dezembro de 2011 foram registradas cinzas na atmosfera da cidade.²⁹

O Rio Grande Sul, que foi o primeiro estado afetado no território brasileiro, e é delimitado ao sul pelo Uruguai e ao sudoeste e oeste pela Argentina; possui uma superfície de 281.737 km^2 e uma população (segundo o último censo) de 10.693.929 habitantes.³⁰ A capital Porto Alegre possui uma população estimada de 1.409.351 habitantes.³¹

Porto Alegre foi afetada pelas cinzas vulcânicas a partir do dia 07 de junho de 2011, sendo que o dia 09 do mesmo mês, o Aeroporto Internacional de Porto Alegre Salgado Filho, dentre outros do Estado, tiveram suas operações aéreas suspensas, como consequência de 70 % do espaço aéreo do Estado estar fechado.^{32,33} As cinzas foram detectadas na atmosfera, via satélite pelo CPTec-INPE, no dia 10 do mesmo mês e menos intensamente em dias posteriores da segunda quinzena de junho.

Após o Rio Grande do Sul, o Estado de Santa Catarina também foi atingido pelas cinzas. A capital Florianópolis deixou de operar os voos em seu aeroporto no dia 10 de junho por determinação do Centro de Gerenciamento da Navegação Aérea (CGNA).³⁴ Segundo este órgão, as cinzas se concentraram entre 7600 e 9600 m de altitude, que é uma faixa próxima de altitude de cruzeiro utilizada em aeronaves comerciais para voos domésticos e internacionais.

Curitiba e São Paulo foram atingidas pelas cinzas de maneira quase concomitante com Santa Catarina, no dia 10 de junho. As cinzas mantiveram-se na faixa de altitude entre 6000 e 7600 m.^{35,36} de maneira provavelmente mais dispersa, não sendo prejudicial ao tráfego aéreo da capital Curitiba e outras cidades paranaenses, não obstante ser este um estado prejudicado, pois voos tendo como origem e

destino a capital gaúcha, foram cancelados, já que o espaço aéreo deste estado permaneceu fechado neste dia.

Segundo buscas efetuadas em sites de notícias, bem como em órgãos oficiais de meteorologia nacionais e internacionais, o espaço aéreo de São Paulo, bem como a cidade na sua essência, não foi atingido diretamente pelas cinzas vulcânicas, porém diversos voos com origem e destino das localidades afetadas foram cancelados, prejudicando temporariamente as atividades econômicas, comerciais e sociais correlacionadas com estes estados.³⁴

1.2 O acidente no Porto de Guarujá (Brasil)

O Porto de Guarujá (coordenadas geográficas 23.57° S; 46.17° O) está localizado no Distrito de Vicente de Carvalho, no município de Guarujá, no Estado de São Paulo e pertence ao Complexo Portuário de Santos. Segundo o IBGE a população do município de Guarujá, em 2010, era de 290.752 habitantes com uma estimativa de aproximadamente 315.000 pessoas em 2017.³⁷ Ainda segundo o IBGE, em 2016 o salário médio mensal das pessoas ocupadas (17,8 % da população) era de 3 salários mínimos e o produto interno bruto (PIB) era o quarto da microrregião da Baixada Santista e o 241º do Estado de São Paulo.³⁷

O Complexo Portuário de Santos, localizado nos municípios de Santos e Guarujá,

é o maior complexo portuário do Brasil e em 2016 movimentou aproximadamente 110 milhões de toneladas de cargas (11,07 % do total nacional), principalmente contêineres (35 % das cargas), açúcar e soja, aparecendo como o primeiro maior porto organizado brasileiro em movimentação de cargas.³⁸ Na Figura 3 é mostrada a área do acidente e a região do Complexo Portuário.

Aproximadamente às 15:00 horas do dia 14 de janeiro de 2016 houve um vazamento de produtos químicos seguido de incêndio em um terminal de cargas empresarial. O local na área do porto, não tem interface marítima e não abrange áreas de cais, e continha nesse momento 85 contêineres com cargas frigoríficas. Segundo informações da Secretaria Nacional de Portos,⁴⁰ divulgadas no dia seguinte, o Corpo de Bombeiros realizou um trabalho de resfriamento dos contêineres, sem o uso de água e os contêineres depositados no entorno do local onde ocorreu o acidente foram removidos para evitar novos focos de incêndio. O acesso de caminhões até os nove terminais localizados na área do Porto de Santos, na margem esquerda, em Guarujá foi interditado. A Capitania dos Portos de São Paulo interditou das 20:00 horas do dia 14/01/2016 até as 7:00 horas do dia 15/01/2016 a entrada e saída de navios para os terminais localizados no trecho que se estende do Armazém 29 até o Terminal de Granéis Líquidos da Alemoa, porque os ventos levaram a fumaça nessa direção, ocasionando grande transtorno nas atividades portuárias e perdas econômicas.⁴⁰

Figura 3. Local no terminal de cargas de Guarujá onde aconteceu o vazamento de gases tóxicos em 14 de janeiro de 2016. Fonte: Google Earth³⁹

Segundo comunicados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) os contêineres tinham produtos químicos, sendo 90 % deles dicloroisocianurato de sódio dihidratado ($C_3Cl_2N_3NaO_3$), nitrato de potássio, herbicidas, inseticidas, resinas e óleo isolante, e foram emitidos gases tóxicos na atmosfera que atingiram áreas residenciais, comerciais, industriais e portuárias nos

municípios de Guarujá, Santos, São Vicente e Cubatão, tornaram o ar impróprio, nocivo e ofensivo à saúde humana, além de inconveniência ao bem-estar público, colocando em risco a segurança da população, ocasionando evacuações e restrições de deslocamentos, e interrupções de atividades comerciais, de terminais portuárias e outras atividades normais das comunidades.^{41,42} Imagens do acidente divulgadas pela CETESB e a Polícia Militar são mostradas na Figura 4.

Figura 4. Vazamento de gás no terminal de cargas de Guarujá em 14 de janeiro de 2016
Fontes: Foto da direita: CETESB.⁴³ Foto da esquerda: Divulgação/Polícia Militar⁴⁴

Segundo relatos dos meios de informação, foram evacuados centenas de domicílios no Distrito de Vicente de Carvalho, os moradores reclamaram de náuseas e dores de cabeça e dezenas de pessoas precisaram de ajuda médica.⁴⁵ Além das interdições na zona portuária foi bloqueado o acesso à Rodovia SP-248 no sentido Guarujá.⁴⁶

Segundo informações do Corpo de Bombeiros o incêndio foi controlado no dia 16 de janeiro, 37 horas após o início do vazamento, porém continuou o trabalho de rescaldo e a saída de fumaça tóxica que atingiu residências de Vicente de Carvalho e Santos.⁴⁷ Após o controle do incêndio foi informado que foram atendidas 138 pessoas no Guarujá e 66 em Santos e Cubatão e que a Prefeitura precisou distribuir máscaras para a população.⁴⁸ Para acompanhar os trabalhos dos bombeiros e apoio à população foi criado pela Prefeitura de Guarujá, um Gabinete de Crises, envolvendo os três poderes de governo e foram imediatamente realizadas as investigações por parte da CETESB e a Defesa Civil para determinar as causas e o alcance do sinistro.⁴⁸ A empresa foi multada pela CETESB e foram registrados Autos de Inspeção obrigando cumprir diversas exigências, como recolhimento e acondicionamento de todos os resíduos e segregamento de todos os contêineres afetados.⁴¹

2. Material e Métodos

2.1 Simulação das trajetórias das massas de ar

A movimentação das massas de ar foi simulada usando o modelo de trajetórias HYSPLIT (*Hybrid Singled-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*).⁴⁹ O modelo foi desenvolvido pelo ARL (*Air Resources Laboratory*) do NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), com o propósito de dar suporte ao *Bureau of Meteorology* (BoM) e consequentemente produzir informações rápidas sobre a atmosfera,

principalmente em caráter emergencial, tais como em acidentes radiológicos e erupções vulcânicas, que muito interferem tanto na vida cotidiana como no tráfego aéreo.^{50,51} Stein *et al.*,⁵² apresentaram uma revisão histórica do desenvolvimento do programa desde a primeira versão (HYSPLIT-1), publicada em 1982, até a versão atual (HYSPLIT-4). O modelo é um dos mais utilizados em ciências atmosféricas para simular processos de transporte e dispersão, tanto para determinar a origem de massas de ar (*backward-trajectory analysis*) como para descrever processos de transporte de poluentes (*forward-trajectory analysis*) especialmente de cinzas vulcânicas e materiais emitidos em acidentes industriais e de plantas industriais e de geração de energia nuclear.⁵²

O modelo HYSPLIT, como o próprio nome indica, é um híbrido entre a aproximação Lagrangiana, que usa um sistema de referências móvel, onde a coluna de ar que contem certos poluentes se movimentam ao longo de uma trajetória e o modelo Euleriano, que usa uma *gride* fixa em três dimensões.

O modelo pode ser utilizado em diversas plataformas (PC, Mac e Linux) e, também, através do *Real-Time Environmental Applications and Display System* (READY), uma plataforma *on-line* desenvolvida e mantida pelo ARL. A plataforma READY permite utilizar ambos os modelos de trajetórias e dispersão, acessar os dados meteorológicos e aos programas gráficos. Desde sua implementação em 1997, tem sido utilizada por milhares de pesquisadores e gerado aproximadamente 80.000 simulações por mês e centenas de artigos científicos.⁵³

Neste trabalho, o HYSPLIT foi utilizado através do READY, no link <http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>. Na plataforma é possível acessar as diversas modalidades do programa que incluem tanto trajetórias de eventos passados (com dados de arquivo) como previsão de eventos futuros (com modelos meteorológicos). No presente trabalho foi utilizada a opção "*Compute archive trajectories*" com uma única trajetória,

por se tratar, nos dois casos estudados, de uma única fonte de emissão. Os dados meteorológicos foram obtidos da base *Global Data Assimilation System* da NOAA (*GDAS, global, 2006-present*) e a localização foi informada indicando as coordenadas geográficas dos locais estudados.⁵⁴

Também foram realizadas simulações utilizando-se simultaneamente o programa HYSPLIT e o *software* Google Earth,⁵⁵ que dispõe de recursos gráficos que reproduzem com similitude os dados da simulação, dentre os quais as localizações geográficas precisas, o tempo e perfil vertical, ressaltando a importância deste último quando a topografia é relevante para o estudo, que pode ser essencial em alguns casos, tais como em situações onde as simulações são realizadas em áreas montanhosas que podem alterar o transporte das massas de ar. Estas informações são de extrema relevância para os modelos químicos, porquanto poluentes podem apresentar possível confinamento em área circundada por montanhas, dispersão para uma região específica, dentre outras possíveis formas de transporte atmosférico que oferecem interesse ao estudo de modelos químicos, pois podem fornecer dados prévios ou posteriores que robustecem as conclusões sobre o sistema ou preveem possíveis locais de amostragem de algum poluente.

As trajetórias foram calculadas na opção *Forward*, a partir dos locais onde aconteceram os eventos: Vulcão Puyehue (40° 58'55,39"S; 72° 11'94,59" O) e Terminal Guarujá (23° 57' 47,91" S; 46° 17' 13,44" O). No caso do vulcão foi considerado que as cinzas atingiram uma altitude de 11.000 m, enquanto no caso do incêndio a altura a partir da qual foram espalhados os poluentes foi de aproximadamente 10 m. Foram calculadas trajetórias começando a cada uma hora durante todo o tempo que duraram os eventos (240 horas e 37 horas, para a erupção vulcânica e para o incêndio, respectivamente).

3. Resultados e Discussão

3.1 A erupção do vulcão Puyehue (Chile)

As imagens de satélite correspondentes às cinzas vulcânicas foram obtidas através do site do CPTEC-INPE.²³ Estas imagens, correspondentes à movimentação real das cinzas, foram utilizadas para a comparação qualitativa com o modelo estudado. As imagens de satélite foram disponibilizadas por este órgão, em um intervalo de tempo de 6 h, nos horários (sequenciais) de 00:00 UTC, 06:00 UTC, 12:00 UTC e 18:00 UTC.

No total foram realizadas 192 simulações, sendo confeccionadas o mesmo número de imagens, com início às 18:00 UTC de 04 de junho de 2011 e término às 12:00 UTC do dia 20 do mesmo mês. Neste trabalho são mostradas algumas imagens de satélite com a cronologia do evento vulcânico e posteriormente as simulações correspondentes aos dias em que o território brasileiro foi mais afetado pelas cinzas vulcânicas.

Na Figura 5a é mostrada uma imagem obtida no dia 05 de junho de 2011 (00:00 UTC), algumas horas após o começo da erupção, onde as cinzas (destaque em cores nas figuras) começaram a ser transportadas pelas massas de ar que passaram pelo vulcão, e posteriormente atravessaram a região da Patagônia do extremo leste ao oeste. Na Figura 5b, obtida no mesmo dia (12:00 UTC) se observa o avanço das cinzas atravessando a Patagônia argentina e chegando ao Oceano Atlântico por influência das massas de ar Atlântica e Pacífica.

A partir de 06 de junho de 2011, aproximadamente às 06:00 UTC, as cinzas projetadas pelo vulcão, foram transportadas para o norte da Argentina e Chile, seguindo provável influência de um ramo continental da massa polar Atlântica, como mostrado na imagem de Figura 5c, correspondente ao dia 07 de junho (00:00 UTC). Aproximadamente às 6:00 UTC do dia 07 de junho de 2011, as cinzas atingiram parte das atmosferas dos territórios paraguaio e boliviano (Figura 5d) e nesse mesmo dia à tarde (Figura 5e) constatou-se que as cinzas vulcânicas

adentraram as atmosferas uruguaia e brasileira, em especial para o Estado do Rio Grande do Sul. Tais informações são compatíveis com as publicadas pelos órgãos de imprensa e de meteorologia oficiais. No dia posterior foi possível perceber a presença de cinzas vulcânicas no Estado do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, Paraná e São Paulo (Figuras 5f e 5g).

A Figura 5h demonstra o transporte e dispersão das cinzas pelo Oceano Atlântico após atingirem o território brasileiro. É possível verificar (Figura 5h) a continuidade de erupção e transporte das cinzas em direção ao sul do Oceano Atlântico, sendo provável que as massas de ar que as transportaram sejam as responsáveis por levá-las até o Nova Zelândia, assim como verificado por Kluser *et al.*,⁵⁶ que simulou o transporte das cinzas do vulcão Puyehue até este país, com o modelo de trajetórias FLEXTRA.⁵⁷

Dentre as 192 simulações realizadas, são mostradas neste trabalho algumas das imagens correspondentes aos dias e horários em que o vulcão estava em atividade e as cinzas expelidas atingiram o território brasileiro. Como mostrado na Figura 6, os resultados do modelo permitem visualizar o alcance das massas de ar nestas condições. Nessa figura, as distâncias são representadas por círculos concêntricos e o perfil vertical é representado com as datas e horários das alturas de uma ou mais massas de ar. Pode ser observado que as informações retiradas das imagens de satélite, são reproduzidas na simulação realizada no mesmo horário, com duração de 48 h e altitude de 11.000 m

A Figura 7 mostra o transporte das massas de ar nas mesmas condições da Figura 6, obtidas com o *software* Google Earth, com o

qual é possível realizar as diversas simulações ao mesmo tempo, dando um caráter dinâmico e permitindo uma visualização mais precisa do território atingido. Através da visualização dos dados neste *software*, foi possível constatar que as massas de ar nestas condições começam entrar no território brasileiro, pelo Rio Grande do Sul, aproximadamente as 12:00 UTC, como mostraram as imagens obtidas por satélite.

Como já relatado, com a continuidade de erupção as cinzas continuaram a se espalhar pela atmosfera continental, sobre os territórios da Argentina, Uruguai, Brasil e Paraguai e no dia 09 do mesmo mês, o Aeroporto Internacional de Porto Alegre Salgado Filho teve seu espaço aéreo fechado pelo CGNA, em virtude dos possíveis riscos à segurança dos voos naquela região.³⁴ Na Figura 8 se observa, em detalhe, as massas de ar atingindo Porto Alegre.

Na Figura 9 são mostradas as massas de ar provenientes do vulcão para o dia 12 de junho de 2011. Observa-se que segundo essa simulação as cinzas não deveriam atingir o sul de Brasil. Porém, imagens de satélite mostraram que nesse dia ainda algumas cinzas se encontravam na atmosfera do Rio Grande do Sul. Como o objetivo de verificar a possibilidade de interação das massas de ar provenientes da área do vulcão com as de outras regiões foram realizadas outras simulações definindo vários pontos iniciais.

Na Figura 10 são mostrados os resultados para cinco pontos arbitrários (coordenadas geográficas) ao norte do vulcão, sendo possível verificar a interação e cruzamento das massas de ar o que mostra a complexidade do problema e justifica a observação das cinzas nas imagens de satélite.

Figura 5. Trajetória das cinzas após a erupção do vulcão Puyehue (Chile) em junho de 2011. Fonte: CPTEC-INPE.²³ Figura 5a: imagem obtida no dia 05 de junho de 2011 (00:00 UTC). Figura 5b: imagem obtida no dia 05 de junho de 2011 (12:00 UTC). Figura 5c: imagem obtida no dia 07 de junho de 2011 (00:00 UTC). Figura 5d: imagem obtida no dia 07 de junho de 2011 (06:00 UTC). Figura 5e: imagem obtida no dia 07 de junho de 2011 (12:00 UTC). Figura 5f: imagem obtida no dia 07 de junho de 2011 (18:00 UTC). Figura 5g: imagem obtida no dia 08 de junho de 2011 (00:00 UTC). Figura 5h: imagem obtida no dia 08 de junho de 2011 (06:00 UTC).

Figura 6. A imagem, obtida como resultado da simulação usando o programa HYSPLIT. Na figura é mostrado o perfil vertical, o caminho percorrido e o alcance (km) das massas de ar que partiram da região do vulcão, com início às 06:00 UTC do dia 06 de junho de 2011

Figura 7. A imagem gerada utilizando o programa HYSPLIT e o *software* Google Earth, demonstra as trajetórias das massas de ar obtidas na mesma simulação da Figura 6

Figura 8. Imagem gerada pelo programa HYSPLIT, com módulo de saída através do *software* Google Earth, mostrando as massas de ar sobre o território de Rio Grande do Sul no dia 09 de junho de 2011

Figura 9. A imagem, obtida como resultado da simulação usando o programa HYSPLIT. Na figura é mostrado o perfil vertical, o caminho percorrido e o alcance (km) das massas de ar que partiram da região do vulcão, com início às 12:00 UTC do dia 12 de junho de 2011

Figura 10. Imagem gerada pelo programa HYSPLIT, com módulo de saída através do *software* Google Earth, mostrando as massas de ar chegando ao território brasileiro desde vários pontos de origem, nos dias 13 e 14 de junho de 2011

3.2 O acidente na Porto de Guarujá (Brasil)

No caso deste acidente não foi possível obter imagens de satélites porque as massas de ar que levaram os poluentes liberados no incêndio se encontram abaixo da cobertura das nuvens. Também não foram disponibilizados para a população dados de qualidade do ar obtidos pela estação móvel da CETESB que foi deslocada até o lugar, na noite do dia 14 de janeiro de 2016, para monitorar óxidos de nitrogênio e material particulado.⁵⁸ Dessa forma os dados da simulação puderam ser apenas comparados com as informações divulgadas pela imprensa e relatadas neste trabalho.

Na Figura 11 são mostradas as trajetórias das massas de ar calculadas usando o programa HYSPLIT com módulo de saída pelo

o *software* Google Earth. Como pode ser observado as trajetórias reproduzem as informações sobre os locais afetados: Vicente de Carvalho, Estuário de Santos e algumas áreas de Cubatão (SP).

Na Figura 12 são mostradas as trajetórias simuladas com o programa HYSPLIT e a altitude alcançada após três horas de iniciado o incêndio.

Os resultados foram considerados satisfatórios, especialmente considerando a falta de dados de monitoramento para este evento, e mostram que o programa poderia ser utilizado para prever a trajetória das massas de ar e o alcance dos poluentes emitidos em outros episódios como incêndios em áreas de conservação ambiental e acidentes em parques industriais, usinas e depósitos de combustíveis, usando condições meteorológicas típicas para a região.

Figura 11. Imagem gerada utilizando o programa HYSPLIT, com módulo de saída gerada no *software* Google Earth, mostrando o espalhamento dos poluentes emitidos no incêndio de Guarujá (SP) no dia 14 de janeiro de 2016

Figura 12. Espalhamento dos poluentes emitidos no incêndio de Guarujá no dia 14 de janeiro de 2016, simulados usando o programa HYSPLIT

4. Conclusões

O homem tem se convertido em uma força geológica capaz de mudar o planeta tanto quanto as forças naturais. O transporte de material particulado, cinzas e poluentes tóxicos pela movimentação de massas de ar, transforma processos locais, tanto naturais como antropogênicos, em eventos regionais, continentais e, algumas vezes globais. Mesmo em eventos de alcance pequeno e regional, como foi o incêndio em Guarujá (SP), as consequências para a saúde das populações que vivem no entorno mostram a necessidade de medidas de controle mais severas e monitoramento da qualidade do ar, águas e solos em áreas industriais.

Neste trabalho foram abordados dois episódios que afetaram o território brasileiro e utilizados como estudo de caso para ilustrar como esses processos podem ser modelados utilizando programas de domínio público e recursos computacionais limitados. Os resultados obtidos mostraram que o programa HYSPLIT fornece resultados satisfatórios, compatíveis com imagens de satélite e informações de agências meteorológicas e de qualidade do ar, tanto para desastres naturais, como erupções vulcânicas e queimadas, como para acidentes de indústrias, usinas nucleares e incêndios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao NOAA Air Resources Laboratory (ARL) por permitir a utilização do modelo HYSPLIT (<http://www.ready.noaa.gov>) e o apoio financeiro do CNPq e CAPES. Agradecem também à Vanessa Cristina Olivatti (Bariloche Total) por ceder as fotografias, de seu arquivo pessoal, mostradas na Figura 2.

Referências Bibliográficas

- ¹ Crutzen, P. J.; Stoermer, E. F. The Anthropocene. *Global Change Newsletter* **2000**, 41, 17. [Link]
- ² Waters, C. N.; Zalasiewicz, J.; Summerhayes, C.; Barnosky, A. D.; Poirier, C.; Galuszka, A.; Cearreta, A.; Edgeworth, M.; Ellis, E. C.; Ellis, M.; Jeandel, C.; Leinfelder, R.; McNeill, J. R.; Richter, D. de B.; Steffen, W.; Syvitski, J.; Vidas, D.; Waple, M.; Williams, M.; Zhisheng, A.; Grinevald, J.; Odada, E.; Oreskes, N.; Wolfe, A. P. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* **2016**, 351, 137. [CrossRef]
- ³ Hublin, J. J.; Ben-Ncer, A.; Bailey, S. E.; Freidline, S. E.; Neubauer, S.; Skinner, M. M.; Bergmann, I.; Le Cabec, A.; Benazzi, S.; Harvati, K.; Gunz, P. New fossils from Jebel Irhoud, Morocco and the pan-African origin of *Homo sapiens*. *Nature* **2017**, 546, 289. [CrossRef]
- ⁴ Ruddiman, W. F. The Anthropogenic Greenhouse Era Began Thousands of Years Ago. *Climatic Change* **2003**, 61, 261. [CrossRef]
- ⁵ Steffen, W.; Broadgate, W.; Deutsch, L.; Gaffney, O.; Ludwig, C. The trajectory of the Anthropocene: The Great Acceleration. *The Anthropocene Review* **2015**, 2, 81. [CrossRef]
- ⁶ Hooke, R. LeB.; Martín-Duque, J. F.; Pedraza, J. Land transformation by humans: A review. *GSA Today* 2012, 22, 4. [Link]
- ⁷ Douglas, I.; Lawson, N. The Human Dimensions of Geomorphological Work in Britain. *Journal of Industrial Ecology* **2000**, 4, 9. [CrossRef]
- ⁸ Global Greenhouse Gas Reference Network. Earth System Research Laboratory. Global Monitoring Division. NOAA. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trend/s/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁹ Bacon, K. L.; Swindles, G. T. Could a potential Anthropocene mass extinction define a new geological period? *The Anthropocene Review* **2016**, 3, 208. [CrossRef]

- ¹⁰ Ceballos, G.; Ehrlich, P.R.; Barnosky, A. D.; Garcia, A.; Pringle, R. M.; Palmer, T. M. Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction. *Science Advances* **2015**, *1*, e1400253. [CrossRef]
- ¹¹ Silva, C. M.; Arbilla, G. Antropoceno: os Desafios de um Novo Mundo. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1619. [CrossRef]
- ¹² Oppenheimer, C. Climatic, environmental and human consequences of the largest known historic eruption: Tambora volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* **2003**, *27*, 230. [CrossRef]
- ¹³ World Health Organization. 1986-2016. Chernobyl at 30. An update. Disponível em: <http://www.who.int/ionizing_radiation/chernobyl/Chernobyl-update.pdf?ua=1>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ¹⁴ World Health Organization. Chernobyl: the true scale of the accident. [Link]
- ¹⁵ Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile. Complejo volcánico Puyehue-Cordón Caulle. Disponível em: <<http://www.sernageomin.cl/complejo-volcanico-puyehue-cordon-caulle/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ¹⁶ Corporación Nacional Florestal (CONAF). Ministério de Agricultura. Gobierno de Chile. Parque Nacional Puyehue. Disponível em: <<http://www.conaf.cl/parques/parque-nacional-puyehue/>>. Acesso em 22 julho 2018.
- ¹⁷ Tsuruta, F.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- ¹⁸ Gobierno de Rio Negro. Reseña. Disponível em: <<https://www.rionegro.gov.ar/?typeID=0&pagina=resena>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ¹⁹ Google Maps, Vulcão Puyehue. Disponível em: <<https://bit.ly/2C4iDNA>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ²⁰ Servicio Nacional de Geología y Minería. Chile. Los nueve volcanes más riesgosos de Chile. Disponível em: <<https://bit.ly/2PsLOxj>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ²¹ Klüser, L.; Erbertseder, T.; Meyer-Arne, J. Observation of volcanic ash from Puyehue–Cordón Caulle with IASI, *Atmospheric Measurement Techniques* **2013**, *6*, 35. [CrossRef]
- ²² Wilson, T.; Stewart, C.; Bickerton, H.; Baxter, P.; Outes, V.; Villarosa, G.; Rover, E. Impacts of the June 2011 Puyehue-Cordón Caulle volcanic complex eruption on urban infrastructure, agriculture and public health. GNS Science Report 2012/20. **2013**. Disponível em: <<https://www.gns.cri.nz/static/pubs/2012/SR%202012-020%20Print%20Copy.pdf>>. Acesso em: 06 agosto 2018.
- ²³ Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE). Banco de dados de Imagens. [Link]
- ²⁴ INMET Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Imagens de satélite. [Link]
- ²⁵ Ministerio de Economía y Finanzas Publicas de la Argentina. Informe de conjuntura económica regional. Segundo trimestre de 2011. Disponível em: <<https://www.economia.gob.ar/peconomica/docs/ICER-4.pdf>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ²⁶ Bermúdez, A.; Delfino, D. La actividad del volcán Puyehue y su impacto sobre el territorio de la República Argentina. Primer Informe. Neuquén 14 de junio de 2011. Disponível em: <<http://www.lavoz.com.ar/files/Impacto%20de%20la%20actividad%20del%20Volc%C3%A1n%20Puyehue.pdf>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ²⁷ Gaitán, J. J.; Ayesa, J. A.; Umaña, F.; Raffo, F.; Bran, D. B. Cartografía del área afectada por cenizas volcánicas en las provincias de Río Negro y Neuquén. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*. 2011. Disponível em <<http://inta.gob.ar/documentos/cartografia-del-area-afectada-por-cenizas-volcanicas-en-las-provincias-de-rio-negro-y-neuquen/>>. Acesso em: 22 julho 2018.

- ²⁸ Casadevall, T. J. Volcanic hazards and aviation safety: Lessons of the past decade. Flight Safety Digest Foundation. Flight Safety Digest **1993**. <<https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/358.pdf>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ²⁹ Raga, G. B.; Baumgardener, D.; Ulke, A. G.; Brizuela, M. T.; Kucienska, B. The environmental impact of the Puyehue-Cordon Caulle 2011 volcanic eruption on Buenos Aires. *Natural Hazards Earth System Science* **2013**, *13*, 2319. [CrossRef]
- ³⁰ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³¹ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Porto Alegre, RS. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³² Cinzas de vulcão provocam cancelamento de voos. Folha de São Paulo (07/06/2011). Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/926468-cinzas-de-vulcao-provocam-cancelamento-de-voos.shtml>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³³ Nuvem do vulcão chileno ocupa 70 % de RS diz FAB. G1. Brasil (10/06/2011). Disponível em: <<http://g1.globo.com/brasil/noticia/2011/06/nuvem-de-vulcao-chileno-ocupa-70-do-rs-diz-fab.html>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³⁴ Cinzas de vulcão voltam atingir Porto Alegre e Florianópolis. Estadão (14/06/2011). Disponível em: <<https://internacional.estadao.com.br/noticias/geral,cinzas-de-vulcao-voltam-a-atingir-porto-alegre-e-florianopolis,732168>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³⁵ FAB: nuvem vulcânica chega à região de Curitiba. Terra. (10/06/2011). Disponível em: <<http://www2.fab.mil.br/cgna/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³⁶ Nuvem de cinzas começa a se dissipar no Sul do país. Veja (10/06/2011). Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/brasil/nuvem-de-cinzas-comeca-a-se-dissipar-no-sul-do-pais/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³⁷ Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Cidades. Guarujá. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/guarujá/panorama>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ³⁸ Desempenho do setor aquaviário 2016. Antaq. [Link]
- ³⁹ Google Maps. Guarujá e Localfrio. Disponível em: <<https://bit.ly/2QqlpEv>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴⁰ Secretaria Nacional de Portos. Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil. Nota da CODESP: Incêndio no Terminal Localfrio está controlado. Disponível em: <<http://www.portosdobrasil.gov.br/home-1/noticias/nota-da-codesp-incendio-no-terminal-localfrio-esta-controlado>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴¹ CETESB. Cetesb multa Localfrio em 140 milhões. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/blog/2016/01/22/cetesb-multa-localfrio-em-r-10-milhoes/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴² CETESB. CETESB segue trabalho de contenção do acidente de Guarujá. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/blog/2016/01/15/cetesb-segue-trabalho-de-contencao-do-acidente-em-guaruja/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴³ CETESB. CETESB exige da Localfrio isolamento dos produtos não afetados pelo incêndio. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/blog/2016/01/18/cetesb-exige-da-localfrio-isolamento-dos-produtos-nao-afetados-pelo-incendio/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴⁴ Foto Divulgação da Polícia Militar. Disponível em: <<https://glo.bo/2QqEuYs>>. Também disponível em: <<https://bit.ly/2QqlwzV>>. Acesso em: 22 julho 2018.

- ⁴⁵ G1. Vazamento de gás no Porto de Santos libera nuvem tóxica. Disponível em: <<https://glo.bo/1Zy3w5Z>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴⁶ Canal Rural. Acidente provocado por combustão de gás interdita Terminal de Cargas de Guarujá. Disponível em: <<https://canalrural.uol.com.br/noticias/incendio-provocado-por-combustao-gas-interdita-terminal-cargas-guaruja-60439/>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴⁷ A Tribuna. Incêndio em Terminal de Cargas de Guarujá é extinto; trabalho de rescaldo continua. Disponível em: <<https://glo.bo/2La1SDF>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴⁸ A Tribuna. Bombeiros terminam rescaldo e Gabinete de Crise é encerrado em Gaurujá. Disponível em: <<https://glo.bo/2zVYpE8>>. Acesso em: 22 julho 2018.
- ⁴⁹ HYSPLIT. NOAA. Air Resource Laboratory. [Link]
- ⁵⁰ Draxler, R. R.; Taylor, A. D. Horizontal dispersion parameters for long-range transport modeling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **1982**, 21, 367. [CrossRef]
- ⁵¹ Draxler, R. R.; Hess, G. D. An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories, dispersion and deposition. *Australian Meteorological Magazine* **2010**, 47, 295. [Link]
- ⁵² Stein, A. F.; Draxler, R. R.; Rolph, G. D.; Stunder, B. J. B.; Cohen, M. D.; Ngan, F. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Bulletin of American Meteorology Society* **2015**, 96, 2059. [CrossRef]
- ⁵³ Rolph, G.; Stein, A.; Stunder, B. Real-time Environmental Applications and Display system: READY. *Environmental Modelling & Software* **2017**, 95, 210. [CrossRef]
- ⁵⁴ Global Data Assimilation System. GDAS [Link]
- ⁵⁵ Google Earth. [Link]
- ⁵⁶ KLuser, L.; Erbertseder, T.; Meyer-Arnek, J. Observation of volcanic ash from Puyehue-Córdon Caulle with IASE. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions* **2012**, 5, 4249. [CrossRef]
- ⁵⁷ Stohl, A.; Haimberg, L.; Schele, M.; Wernli, H. An inter- comparison of results from three trajectory models. *Meteorological Applied* **1999**, 8, 127. [CrossRef]
- ⁵⁸ CETESB. Estação móvel monitora qualidade do ar próximo ao incêndio. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/blog/2016/01/16/e-stacao-movel-monitora-qualidade-do-ar-proximo-ao-incendio/>>. Acesso em: 22 julho 2018.