

Simulação da sinergia das emissões atmosféricas do polo cimenteiro do litoral sul da Paraíba sobre a cidade de Alhandra-PB

Simulation of the synergy of atmospheric emissions from the cement pole of the south coast of Paraíba on the city of Alhandra-PB

Simulación de la sinergia de emisiones atmosféricas del poste de cemento de la costa sur de Paraíba en la ciudad de Alhandra-PB

Recebido: 16/07/2022 | Revisado: 23/07/2022 | Aceito: 25/07/2022 | Publicado: 01/08/2022

Gilberto Neri de Oliveira Filho

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2595-6805>
Faculdade Internacional da Paraíba, Brasil
E-mail: gilbertope91@gmail.com

Bárbara de Cássia Silva de Araújo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0505-7060>
Faculdade Internacional da Paraíba, Brasil
E-mail: barbaradecsaraujo@gmail.com

Caio Franklin Vieira de Figueiredo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0364-164X>
Universidade Católica de Pernambuco, Brasil
E-mail: Caiovieirafigueiredo@gmail.com

Resumo

As emissões atmosféricas material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), tipicamente emitidos na indústria cimenteira, vem sendo, tem gerado grande interesse por parte dessas indústrias em quantificar a qualidade do ar nas proximidades de suas fontes emissoras. Desse modo, o presente trabalho tem por objetivo simular a sinergia das emissões atmosféricas provenientes das fábricas de cimento localizado no litoral sul da Paraíba sobre a cidade de Alhandra-PB, buscando mensurar a quantidade de carga poluidora sobre o receptor, por meio de modelagem dos compostos gasosos emitidos a partir da fonte pontual tomada como maior contribuidor (alto-forno rotativo clínquer). Para tanto foi utilizado o software AID (Avaliação Instantânea de Dispersão) baseado no modelo de Gauss para determinação das concentrações no ar resultantes dessas emissões. Nessa determinação, foram abordados os principais parâmetros meteorológicos de 2015 a 2016 e cinéticos de emissão necessários à modelagem. A máxima concentração de MP e NO_x obtida após a modelagem foi respectivamente 0,0014 µg/m³ e 0,0027 µg/m³, ficando bastante abaixo dos limites primários e secundários de qualidade do ar de acordo com a CONAMA 03/90. No caso avaliado, a concentração estimada não apresenta riscos de saúde à população exposta, uma vez, pelo valor obtido, nem pode ser percebido.

Palavras-chave: Camada de ozônio; Emissões; Nitrogênio.

Abstract

Atmospheric emissions of particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO_x), typically emitted in the cement industry, have been generating great interest on the part of these industries in quantifying the air quality in the vicinity of their emission sources. Thus, the present work aims to simulate the synergy of atmospheric emissions from the cement factories located on the south coast of Paraíba over the city of Alhandra-PB, seeking to measure the amount of polluting load on the receiver, through modeling of the gaseous compounds emitted from the point source taken as the major contributor (clinker rotary blast furnace). For this purpose, the AID software (Instant Dispersion Assessment) based on the Gauss model was used to determine the concentrations in the air resulting from these emissions. In this determination, the main meteorological parameters from 2015 to 2016 and emission kinetics necessary for modeling were addressed. The maximum concentration of PM and NO_x obtained after the modeling was respectively 0.0014 µg/m³ and 0.0027 µg/m³, being well below the primary and secondary air quality limits according to CONAMA 03/90. In the case evaluated, the estimated concentration does not present health risks to the exposed population, since, given the value obtained, it cannot be perceived.

Keywords: Ozone layer; Emissions; Nitrogen.

Resumen

Las emisiones atmosféricas de material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x), típicamente emitidas en la industria del cemento, han venido generando un gran interés por parte de estas industrias en cuantificar la calidad del aire en las inmediaciones de sus fuentes de emisión. Así, el presente trabajo tiene como objetivo simular la sinergia de las emisiones atmosféricas de las fábricas de cemento ubicadas en la costa sur de Paraíba sobre la ciudad de Alhandra-PB, buscando medir la cantidad de carga contaminante en el receptor, a través de la modelización de los compuestos gaseosos emitidos desde la fuente puntual considerada como la principal contribuyente (alto horno rotatorio de clínker). Para ello se utilizó el software AID (Instant Dispersion Assessment) basado en el modelo de Gauss para determinar las concentraciones en el aire resultantes de estas emisiones. En esta determinación se abordaron los principales parámetros meteorológicos del 2015 al 2016 y las cinéticas de emisión necesarias para la modelación. La concentración máxima de PM y NO_x obtenida después de la modelación fue respectivamente 0,0014 µg/m³ y 0,0027 µg/m³, estando muy por debajo de los límites de calidad del aire primario y secundario según CONAMA 03/90. En el caso evaluado, la concentración estimada no presenta riesgos para la salud de la población expuesta, ya que, dado el valor obtenido, no puede ser percibida.

Palabras clave: Capa de ozono; Emisiones; Nitrógeno.

1. Introdução

O cimento é um material básico utilizado na quase que totalidade de diversos projetos da construção civil. As indústrias de cimento produzem tipicamente o cimento Portland, amplamente utilizado em todo o mundo, que é um pó fino, de coloração acinzentado. A preparação do cimento envolve desde a mineração, britagem e moagem de matérias-primas. O passo mais importante é a calcinação de carbonato de cálcio seguida pela queima do óxido de cálcio resultante juntamente com sílica, alumina e óxido ferroso a altas temperaturas para formar o clínquer (material sintético). O clínquer é então resfriado e moído com gesso e outros constituintes para produzir cimento. A queima de clínquer é realizada no alto-forno rotativo, que necessita de muita energia para atingir a temperatura necessária para os processos de calcinação e sinterização. Tradicionalmente, os combustíveis utilizados no ciclo de produção do cimento são materiais combustíveis pesados, tais como coque de petróleo, óleo diesel e carvão, mas as condições favoráveis do forno permitem o uso de combustíveis alternativos tais como óleo de motor usado, solventes usados, tintas de impressão, resíduos de tinta, Fluidos de limpeza, pneus de sucata e plásticos em geral (Guo et al., 1996, Kaantee et al., 2004).

A produção do cimento gera uma variedade de emissões, mas os principais lançamentos são as emissões do sistema do alto-forno para a atmosfera. As emissões são formadas pela combustão de matérias-primas e combustíveis no forno rotativo e são principalmente os óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e material particulado (MP) (Canpolat et al., 2002, Von Bahra et al., 2003).

A produção de cimento é uma atividade bastante complexa, composto por diversos processos, que requerem considerável apoio tecnológico, o que implica diversos impactos ambientais (Sdeghian & Fatehi, 2009). A produção de cimento vem sempre encabeçada na lista das principais fontes de emissões de poluentes atmosféricos (Benhelal et al., 2013, Van Ruijven et al., 2016). Como mostra o "Roteiro Tecnológico do Cimento até 2050", a produção de cimento levou a indústria a gerar cerca de 5% das emissões atmosféricas de origem antrópica globais (WBCSD, 2009). Devido a demanda induzida pela modernização da infraestrutura e pela urbanização nos países em desenvolvimento (Szabó et al., 2006). A indústria do cimento fornece um suporte imprescindível para o funcionamento de várias atividades industriais a jusante da economia mundial (Song et al., 2016).

Recorrente em diversos países, a exposição a poluição atmosférica vem se tornando ao longo dos anos um grande problema mundial. A Organização Mundial de Saúde (OAS) anunciou que recentemente aproximadamente 2,7 milhões de mortes foram atribuídas a poluição do ar. Ao longo das décadas diversos estudos foram realizados com o intuito de verificar os riscos que os seres humanos têm com a exposição excessiva a esses poluentes e os efeitos nos ciclos atmosféricos globais. Em especial material particulado (MP), óxidos de nitrogênio (NO_x), óxidos de enxofre (SO_x), dióxido de carbono (CO₂) e outras toxinas têm sido alvo das investigações devido ao seu impacto no meio ambiente e a diminuição da qualidade do ar.

O particulado pode vir a causar diversos problemas de saúde seja por contato com a pele, contato com os olhos ou inalação. O risco da lesão depende da duração e do nível de exposição e da sensibilidade individual. Além disso, diferentes cimentos têm ingredientes diferentes. Muitos deles contêm substâncias que podem ser perigosas, como sílica cristalina (quartzo), cal, gesso, níquel, cobalto e compostos de cromo (Green N8 Residents Group, 2004). A inalação da poeira de sílica pode causar silicose ou outras doenças pulmonares potencialmente fatais. Além disso, a inalação de compostos de crômio encontrados em algumas poeiras de cimento pode causar câncer. Assim, esse pó pode ser um potencial risco a exposição humana, levando ao agravamento do problema do meio ambiente.

Desde a Revolução Industrial, está ocorrendo uma intensificação do efeito estufa, provocando um aumento na temperatura global. Segundo dados do IPCC (2007), o potencial de aquecimento global aumentou aproximadamente 70% desde 1970, com o CO₂ sendo a principal fonte, apresentando um aumento de 80% nas emissões. Portanto, o aumento do efeito estufa se deve principalmente à queima de combustíveis fósseis e ao desmatamento, que somente em 2004 representaram 56,6% e 17,3% da emissão de CO₂ antropogênico

A diminuição da qualidade do ar é relativamente um dos maiores problemas do mundo, porque ela está intrinsecamente envolvida com o desenvolvimento industrial. Tudo isso como consequência das emissões frota de veículos das grandes cidades e de áreas industriais (Freitas, 2003).

As indústrias no geral, em decorrência de seu processo produtivo é considerado um grande causador de deletérios ambientais, sobretudo no que se refere à poluição atmosférica, com potencial de induzir alterações nos parâmetros da qualidade do ar e sua consequente poluição, com isto gerando impactos negativos no meio ambiente natural e antrópico. Segundo Christofletti (1999) as emissões de gases poluentes pelas chaminés das indústrias variam de acordo com o processo produtivo empregado, tecnologia adotada, combustível usado e a presença de dispositivos específicos de controle de emissões.

O controle pela diluição das emissões na atmosfera adota como fator principal a altura da chaminé, pois através desta condição a turbulência atmosférica transporta e dispersa os gases emitidos, assim evitando que altas concentrações de poluentes alcancem os receptores e causem algum dano aos mesmos (Cortez et al., 2009). É importante compreender como um poluente atmosférico está disperso na atmosfera. Quando um gás é liberado de uma fonte é levado pelo vento e disperso no ar. Assim, a sua concentração máxima pode ser encontrada no ponto de libertação. A dispersão de gás é afetada por uma série de parâmetros, por exemplo, velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, condições de solo (edifícios, montanhas, árvores, água) e altura da liberação acima do nível do solo (Crowl & Louvar, 2002).

Para Santos (2006) o clima influencia a qualidade do ar de uma região, pois o transporte dos poluentes depende de condições meteorológicas que influenciam as condições de circulação local alterando a velocidade dos ventos e podem definir a altura das chaminés adequada para o lugar dentre outros aspectos. Cerqueira (2010) explica que a qualidade do ar é determinada por um conjunto de fatores que envolvem a intensidade das emissões dos poluentes, seu transporte nível de concentração e tempo de decomposição na atmosfera.

A Resolução CONAMA nº 03/1990 divide os padrões de qualidade do ar em padrões primários e secundários. São padrões primários de qualidade do ar as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. Quanto aos padrões secundários de qualidade do ar, são as concentrações de poluentes atmosféricos abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem estar da população, assim como o mínimo de impacto negativo à fauna e à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. (Brasil, 1990a). A classificação de poluentes primários e secundários é dividida em dois grupos o físico e químico, exemplo, o grupo “material particulado” se refere ao estado físico, enquanto o grupo “óxidos de nitrogênio” se referem a uma classificação química (Baird & Cann, 2011).

A indústria de cimento é caracterizada pelo seu elevado potencial poluidor atmosférico. Apesar do processo de fabricação do cimento não produzir resíduos sólidos, já que as cinzas provenientes da queima dos combustíveis no forno

rotativo são incorporadas no clínquer, há uma alta emissão de poluentes gasosos e material particulado. Os tipos de poluentes emitidos e a taxa de emissão vão variar dependendo das características operacionais do sistema e da composição química das matérias-primas e combustíveis utilizados. Os principais poluentes emitidos no meio ambiente durante a fabricação do cimento Portland são os óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e material particulado (MP). Pode-se mencionar também a emissão de menores quantidades de compostos orgânicos voláteis, amônia, cloro, cloreto de hidrogênio e produtos provenientes da combustão incompleta. Além disso, os metais pesados presentes na composição das matérias-primas e dos combustíveis podem ser emitidos na forma de particulado ou vapor, mesmo se presentes em pequena quantidade (Santi, 2003).

O WBCSD (2012), também menciona que durante o processo de produção de cimento, há grandes quantidades de partículas, óxidos de nitrogênio (NO_x), principalmente nas formas NO e NO₂, dióxido de enxofre (SO₂), dióxido de carbono e monóxido de carbono. Podem também ser emitidas outras quantidades de compostos orgânicos voláteis, gases ácidos, traços de metais e micro poluentes orgânicos. Outras emissões atmosféricas tais como, poeiras fugitivas também fazem parte desse contexto.

Durante o processo de fabricação de cimento, quantidades consideráveis de poeira são emitidas em praticamente todas as fases da produção. A poeira é gerada através de emissões, manuseio, derramamento, vazamentos e transportes, começando com a extração de rocha da principal matéria-prima calcário e terminando com a embalagem e despacho de cimento da planta. As concentrações de poeira fugitiva libertada da fábrica de cimento variam muito de uma área para outra, dependendo da natureza e intensidade das fontes locais e de outros fatores, tais como a topografia, as condições meteorológicas locais e pelas inversões de temperatura (Abdul-Wahab, 2003).

A fim de diminuir o impacto ambiental causado pelas fábricas de cimento, tais atividades devem apresentar um relatório de estudo de impacto ambiental (EIA), evidenciando tanto as negativas e positivas atividades relativas ao projeto em instalação e operação, bem como as atividades principais. Além disso, o relatório do EIA deve estabelecer medidas afim de mitigar as emissões de poluentes, partículas com diâmetro inferior a 10 µm (PM₁₀), NO₂, SO₂ e CO₂. Outros poluentes podem ser solicitado, mas isso vai depender das condições particulares de cada planta fabril de cimento. O EIA, portanto, provou ser uma gestão muito útil para limitar os impactos ambientais, e para responder às preocupações relacionadas das comunidades e as agências de meio ambiente de cada país (Seangkiatiyuth et al., 2011).

Um dos problemas que as fábricas de cimento enfrentam ao cumprir um EIA é que frequentemente áreas alvo de estudo não são acessíveis para equipamentos de monitoramento, nestes casos são necessárias simulações por computador para estimar concentrações nessas áreas. As simulações têm de ser comparadas com medições nas áreas acessíveis. Modelos de dispersão baseados em computador podem simular esses efeitos muito bem. Os programas de software de dispersão baseados em Gaussian Pluma foram amplamente aplicadas para estimar as dispersões de vários poluentes. A American Meteorology Society (AMS) e a Environmental Protection Agency (EPA), desenvolveram softwares baseado na equação de pluma gaussiana, recomendado para as simulações de qualidade do ar pela EPA (2005).

Os modelos Gaussianos são frequentemente usados em estudos ambientais que envolvem dispersão de poluentes atmosféricos ou para atender exigências de licenciamento ambiental de atividades poluidoras do ar. Os modelos Gaussianos são baseados em uma fórmula que descreve um campo de concentrações tri dimensional, onde sua equação assume que o espalhamento do efluente de uma fonte contínua tem uma distribuição normal ao eixo horizontal da pluma, tanto no plano horizontal, como no vertical (Cui et al., 2011).

Os modelos Gaussianos ao longo do tempo tem sido alvo de aprimoramentos, assim permitindo simulações do comportamento da dispersão de poluentes na atmosfera de maneira mais realística. Um exemplo disso é a incorporação de

climáticos a estação chuvosa se inicia em fevereiro e se prolonga até julho, com máximos da precipitação em abril, sendo o trimestre, outubro, novembro e dezembro o mais seco (Geoconsult, 2012).

Ainda para o clima, na precipitação média anual temos valores na ordem de 1.634.2 mm para aquela região (CPRM, 2005). A dinâmica climática de uma região depende dos sistemas atmosféricos, que nela atuam, os quais condicionam os diferentes tipos de tempo observados. Deve-se ressaltar que os principais sistemas atuantes no Nordeste do Brasil e, por conseguinte, na área de estudo são: a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN's), as Linhas de Instabilidade, as Ondas Leste. (Ferreira & Melo, 2005). Incluem-se, também, a Frente Polar Atlântica (FPA) e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (Abreu, 1998).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é uma extensa região de convergência dos ventos alísios de nordeste, oriundos do sistema de alta pressão ou anticiclone subtropical do hemisfério norte e dos ventos alísios de sudeste, provenientes da alta pressão subtropical do hemisfério sul, caracterizada por movimentos ascendentes, baixas pressões, uma banda de nebulosidade e chuvas no sentido leste-oeste aproximadamente (Molion & Bernardo, 2002).

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN's), que penetram na região Nordeste do Brasil, formam-se no oceano Atlântico, principalmente entre os meses de novembro e março, sendo mais frequente entre os meses de janeiro e fevereiro. Seu percurso, normalmente, é de leste e o tempo de duração desses sistemas varia em média, entre 7 a 10 dias. Os VCANs são um conjunto de nuvens, que têm a forma aproximada de um círculo, girando no sentido horário. Na sua periferia, formam-se nuvens causadoras de chuva e, no centro, há movimentos de ar de cima para baixo (subsistência), aumentando a pressão e inibindo a formação de nuvens (Ferreira & Melo, 2005).

As Linhas de Instabilidade (LI) são um aglomerado de nuvens do tipo cumulus, disposto em forma de linhas e que causam chuvas. Sua formação se dá basicamente em função da grande quantidade de radiação solar incidente sobre a região tropical propiciando o desenvolvimento das nuvens cumulus, que atingem um número maior à tarde e início da noite, quando a convecção é máxima, com consequentes chuvas. Outro fator que contribui para o incremento das LI, principalmente nos meses de fevereiro e março, é a proximidade da ZCIT (Ferreira & Melo, 2005). As Ondas de Leste se formam no campo de pressão atmosférica, na faixa tropical do globo terrestre, na área de influência dos ventos alísios e se deslocam de leste para oeste, ou seja, desde a costa da África até o litoral leste do Brasil. Esse sistema provoca chuvas principalmente na Zona da Mata, que se estende desde o Recôncavo Baiano até o litoral do Rio Grande do Norte (Ferreira & Melo, 2005).

Segundo Xavier (2001), a intensificação das Ondas de Leste pode acontecer em função da presença de massas de ar carregadas de umidade formadas sobre o Atlântico Sul (entre a linha do equador e o paralelo 20° sul), principalmente quando o mar apresenta anomalias positivas de temperatura. Também deve contribuir um possível aumento da componente zonal do vento sobre o Atlântico nessas latitudes.

O território brasileiro sofre a influência de frentes frias durante todo o ano. Estas conhecidas como Frente Polar Atlântica (FPA), que se originam, principalmente, no Pacífico Sul. Elas atravessam os Andes no sul do continente e, devido aos efeitos da rotação do Planeta e da presença da Cordilheira, deslocam-se em relação à linha do Equador com sua orientação noroeste/sudeste. Assim, elas atingem o litoral leste do Nordeste (Abreu, 1998).

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é uma faixa de nebulosidade convectiva que se estende comumente desde o sul da Amazônia até o oceano Atlântico Subtropical. Caracteriza-se principalmente pela estacionaridade da banda de nebulosidade por vários dias e a consequente alteração do regime de chuvas nas regiões afetadas, com a manutenção de chuvas por vários dias (Quadro, 1994).

A região da cidade de Alhandra-PB se constitui dos domínios geomorfológicos do Tabuleiro Costeiro também conhecido como Tabuleiros Litorâneos. Tabuleiros Costeiros são superfícies terciárias, que acompanham todo o litoral do

Nordeste do Brasil, em área estimada de 8,42 milhões de hectares e estão esculpidos em grande parte sobre os sedimentos mal consolidados (EMBRAPA/CPATC, 1994).

Segundo Neves et al. (2004), a evolução geomorfológica dos Tabuleiros Costeiros na região está relacionada a amplos arqueamentos e à sucessão de formação escalonada para o interior, de pediplanos, mas subordinada ao fator de paleoclimas.

Furrier et al. (2006) pesquisando os Tabuleiros Costeiros concluíram que as características estruturais da área estão relacionadas às ações tectônicas cenozóicas. Estes autores postulam que a configuração atual resulta de uma complexa movimentação pretérita de blocos falhados que originam soerguimentos distintos e basculamentos.

Caracterizado por possuir um relevo plano a suavemente ondulado, com altitudes variando de 20 a 130 m. São esculpidos nos sedimentos do Grupo Barreiras. O limite dos Tabuleiros com a Baixada Litorânea se dá de modo abrupto, em falésias, ditas mortas ou inativas, as quais podem ter até 80,0 metros de altura. São descontinuas, apresentando barreiras nas calhas dos principais rios (Geoconsult, 2012).

Os Tabuleiros Costeiros são representados por formas tabulares niveladas pelo topo em morfologia de ondulações leves, suavemente dispostas sobre o terreno. Nessa condição as diferenças de cotas são baixas, acentuadas somente em função de elementos morfológicos, como calhas de drenagens. Nessa Unidade a dissecação da drenagem varia entre média e forte, consoante o poder fluvial de cada curso d'água que lhe entalhará mais ou menos, em função também de seu regime de escoamento. Pela natureza sedimentar e níveis de permeabilidade e porosidade das rochas que lhe compõem, essa Unidade gera normalmente vales de fundo plano ou suavemente chatos, com grandes espaçamentos entre as drenagens (Geoconsult, 2012).

Tabuleiros são relevos de topo plano, entrecortados por vales estreitos e profundos, cujas vertentes apresentam declividade alta (> 30 %). A predominância de alta declividade, na maior parte das encostas desses relevos, constitui um fator fortemente restritivo do uso agrícola e urbano do solo nas mesmas. Dada a resistência da rocha, não se formam reentrâncias e há exibição de grandes 'paredões desnudos' com cerca de 60 metros de altura. Os tabuleiros, que atingem as baixadas costeiras, terminam como falésias. Estas falésias ocorrem principalmente na faixa litorânea, ora expostas à ação marinha atual, constituindo formações ativas ou vivas (falésias vivas), ora em posições mais elevadas, convertendo-se então nas denominadas falésias mortas, na verdade testemunhos de um nível do mar mais alto que o atual (Geoconsult, 2012).

Mineralogicamente, os sedimentos dos Tabuleiros Litorâneos são constituídos essencialmente de caulinita, quartzo e moscovita, associados a alguns minerais pesados como zircônio, anatásio e esfênio. Os feldspatos, quando presentes, geralmente são alterados em caulinita (pseudomorfos). Com relação à moscovita, esses minerais apresentam uma alteração crescente da base para o topo da formação (Mabesoone & Alheiros, 1988).

Os solos dessa unidade geoambiental são representados pelos Latossolos e Podzólicos nos topos de chapadas e topos residuais; pelos Podzólicos com Fregipan, Podzólicos Plínticos e Podzóis nas pequenas depressões nos tabuleiros; pelos Podzólicos Concrecionários em áreas dissecadas e encostas e Gleissolos e Solos Aluviais nas áreas de várzeas (CPRM, 2005).

2.2 Procedimentos

O modelo de dispersão utilizado nesse estudo é o software AID (Avaliação Instantânea de Dispersão) desenvolvido por Kawano (2003). Simulando a concentração de material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x) lançados a partir de três fontes pontuais e aferir os impactos sobre a qualidade do ar na cidade decorrente da sinergia dessas fontes.

Paralelamente, aplicou-se o modelo de Gauss em cada fonte para verificação dos valores absolutos da concentração cuja faixa foi estimada no modelo AID.

Foram abordadas no trabalho as condições climáticas da área de influência do complexo de indústrias, baseadas num arcabouço histórico meteorológico, bem como visitas técnicas exploratórias de reconhecimento em parte das fontes.

No município de Alhandra não existe estação meteorológica automática com dados horários disponíveis para compor o arquivo de dados meteorológicos para o modelo de dispersão atmosférica. Em face disso recorreu-se aos dados produzidos pela estação meteorológica, fabricada pela Campbell Scientific, localizada na usina Tabú- Pitimbu-PB com as seguintes coordenadas 7º 29' 43,15" S/ 34º 52' 30,23" O, disponibilizado pela Agência Executiva de Gestão das águas do Estado da Paraíba (AESA).

Os dados foram concebidos para o período de um ano, entre 2015 e 2016, correspondente a 8760 horas de dados dos parâmetros direção e velocidade do vento, pressão atmosférica, temperatura e estabilidade atmosférica. Os dados gerados foram formatados para serem utilizados no modelo matemático de dispersão, na Tabela 1 podemos observar as medias anuais utilizadas na modelação.

Tabela 1 – Media dos dados meteorológicos da região de Alhandra.

Direção do vento	Velocidade do vento (m/s)	Pressão atmosférica (mmHg)	Temperatura (K)	Estabilidade atmosférica
SE - Sudeste	4,3	7553	301,15	D -Neutro

Fonte: Autores.

Os índices de emissões adotados para o cálculo das concentrações de MP e NO_x foram obtidos através de campanhas reais de amostragens isocinéticas nas chaminés das empresas como parte do programa permanente de controle das fontes de emissões atmosféricas da fábrica.

Para avaliação do impacto ambiental da emissão de poluentes foram utilizadas as medias condições meteorológicas em termos de estabilidade atmosférica à dispersão dos poluentes, de modo a representativa os valores obtidos. Por fim, as concentrações encontradas foram comparadas com os padrões primários e secundários de qualidade do ar definidos na Resolução CONAMA N°. 03, de 28 de junho de 1990.

Selecionou-se o município de Alhandra como receptor vulnerável às emissões de poluentes das chaminés, para que o modelo calcule as isolinhas de máximas concentrações sobre a cidade. Os poluentes, material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), oriundos das emissões das chaminés do alto-forno rotativo de clínquer. Os dados de emissões usados no estudo são provenientes das análises de amostragem isocinéticas de cada unidade industrial da cimenteira Alhandra, Pitimbu e Caaporã. A partir dos dados obteve-se as taxas de emissões estimados para modelagem de dispersão atmosférica para cada chaminé, conforme apresentado.

Braga (2005) cita a altura e o diâmetro da chaminé, por exemplo, como aspectos determinantes nesse processo, bem como a temperatura dos gases e a posição espacial que a emissão ocupa. A Tabela 2 apresenta alguns parâmetros das três fontes avaliadas.

Tabela 2 – Parâmetros-padrões de emissão e geométricos das fontes das fábricas estudada.

Fontes	Coordenadas		Taxas de emissão (g/s)			Parâmetros da fonte			
	Latitude	Longitude	MP	NOx	Q(m³/s)	H(m)	D(m)	V(m/s)	T(K)
Chaminé forno									
Cimenteira Alhandra	7°22'41.67"S	34°53'7.95"O	1,333	0,033	172,32	125	3,80	15,19	375,15
Cimenteira Pitimbu	7°28'35.27"S	34°50'36.74"O	2,000	102,778	234,83	110	3,76	21,10	424,15
Cimenteira Caaporã	7°31'46.41"S	34°51'54.35"O	3,694	43,000	203,76	75	3,50	21,18	438,15

Fonte: Autores.

Segundo Kawano (2003), a equação gaussiana (1), descrita em Turner (1994), é utilizada para uma situação onde a emissão contínua é de uma chaminé e o ponto de medição, ou avaliação, está a uma distância x , deslocado horizontalmente do centro da pluma a uma distância y e a uma altura definida z .

$$(1) \quad C_{(x, y, z)} = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + a \cdot \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]$$

Onde:

C = concentração do poluente no ponto de coordenadas x, y, z (g.m-3);

Q = taxa de emissão do poluente na chaminé (g.s-1);

σ_y = coeficiente de dispersão horizontal da concentração da pluma, em função da direção do vento e distância da fonte (m);

σ_z = coeficiente de dispersão vertical da concentração da pluma, em função da direção do vento e distância da fonte (m);

v = velocidade média do vento na altura da chaminé (m.s-1);

x = distancia horizontal do emissor ao receptor (m);

z = altura do receptor ou ponto de medição (m);

y = distância horizontal do ponto de medição a uma distância “ y ” da linha central da pluma (m);

a = índice de reflexão da pluma ao tocar o solo.

Boçon (1998) comenta que as condições para que as equações de pluma gaussiana sejam válidas são bastante idealizadas e raramente ocorrem na natureza. No entanto, devido a sua simplicidade, as equações de pluma gaussiana têm sido amplamente aplicadas, fornecendo resultados que, se não absolutos, ao menos possibilitam estimar os níveis de poluentes a qual a população possa estar exposta.

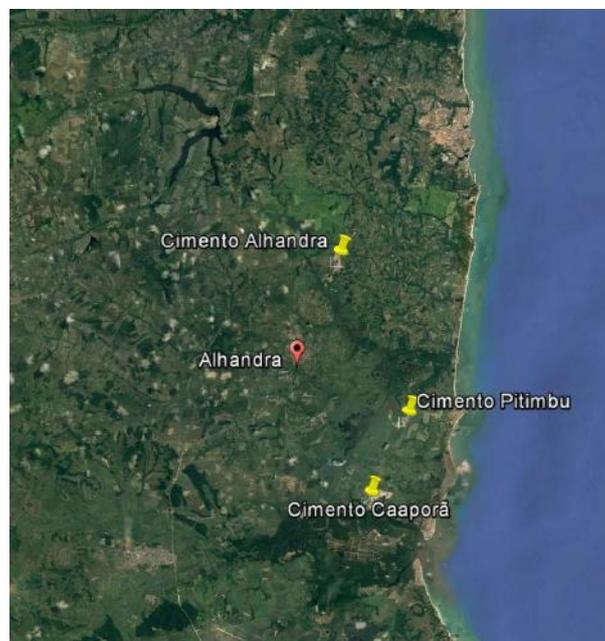
Para simular o impacto dos poluentes emitidos a partir de três fontes pontuais sobre a qualidade do ar na região em estudo foi utilizado o modelo AID (Avaliação Instantânea de Dispersão) desenvolvido por Kawano (2003). A equação básica do modelo é a gaussiana e assume que a concentração média das espécies emitidas de uma fonte pontual obedece a uma distribuição normal gaussiana dos poluentes dentro da pluma, de acordo com a solução proposta por Pasquill. Na solução analítica da equação de difusão, foi assumido que o espalhamento dos poluentes emitidos continuamente da chaminé tem uma distribuição normal ao longo do eixo horizontal da pluma.

Os parâmetros de entrada correspondentes a fonte emissora consiste de altura da fonte, taxa de emissão, temperatura e velocidade de saída dos gases, além do diâmetro interno da chaminé. Como dados de saída, considerando todos os dados de entrada, o modelo gera curvas das isoconcentrações obtidas em função da dispersão do poluente.

3. Resultados

Para a modelação foi utilizado durante o estudo, a média dos dados meteorológicos a sua dispersão. Foram considerados os registros de julho de 2015 a julho de 2016 proveniente da estação meteorológica da Agência Executiva de Gestão das águas do Estado da Paraíba (AESAs) localizada na cidade de Pitimbu-PB, os dados são representativos a área de estudo, levando em consideração a dinâmica climatológica e a aproximadamente 10 km de distância para a cidade de Alhandra (Figura 2).

Figura 2 – Imagem área destacando a cidade de Alhandra e as indústrias de cimentos ao seu entorno.



Fonte: Autores.

Para as emissões, foram considerados as fontes internas de emissão referente a chaminé do alto-forno rotativo de clínquer. Portanto não foram consideradas as emissões provenientes de outras fontes internas e externas. Para tanto, as diferentes faixas de concentrações de MP e NO_x encontradas, foram sobrepostas ao mapa da região de estudo, sendo o resultado apresentado logo abaixo.

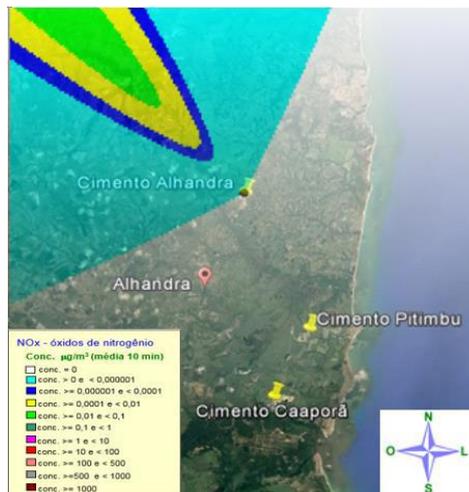
A máxima concentração estimada de poluentes MP e NO_x se concentrara na faixa central da pluma gerada pelo modelo, diminuindo a concentração à medida que se afasta do centro. Para a cimenteira Alhandra tivemos concentrações de emissão sobre a cidade na ordem de 0 µg/m³ para MP e ordem de 0 µg/m³ para NO_x (Figura 3 e 4)

Figura 3 – Curvas de isoconcentrações de MP representando a dispersão da fábrica de cimento Alhandra.



Fonte: Autores.

Figura 4 – Curvas de isoconcentrações de NOx representando a dispersão da fábrica de cimento Alhandra.



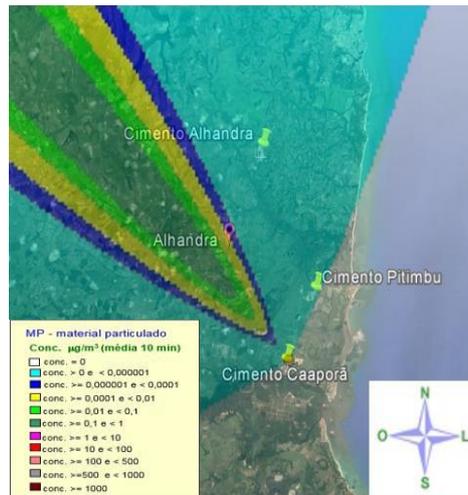
Fonte: Autores.

A contribuição da chaminé da fábrica de cimento Alhandra referente as concentrações de MP foi de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o receptor município Alhandra, representando 0% do padrão primário de qualidade do ar de MP de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 0% do padrão secundário de qualidade do ar do MP de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$

A contribuição da chaminé da fábrica de cimento Alhandra referente as concentrações de NOx foi de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o receptor município Alhandra, representando 0% do padrão primário de qualidade do ar do NO₂ de $100 \mu\text{g}/\text{m}^2$ e 0% do padrão secundário de qualidade do ar do NO₂ de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

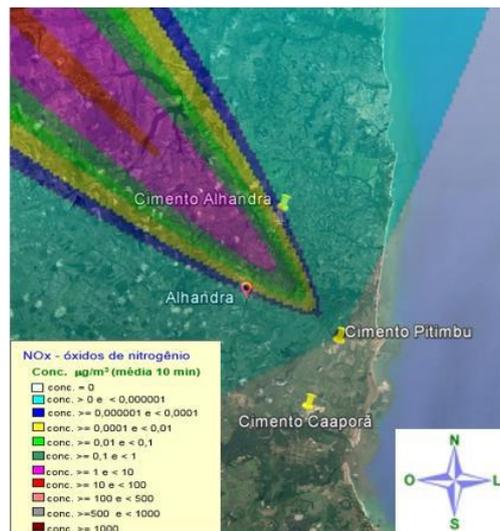
Para a cimenteira Pitimbu tivemos concentrações de emissão sobre a cidade na faixa entre 0 a $1 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP e faixa entre 0 a $1 \times 10^{-6} \mu\text{g}/\text{m}^3$ para NOx. Para a cimenteira Caaporã tivemos concentrações de emissão sobre a cidade na faixa entre 1×10^{-4} a $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP e faixa entre 1×10^{-4} a $0,01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para NOx (Figura 5 e 6).

Figura 5- Curvas de isoconcentrações de MP representando a dispersão da fábrica de cimento de Pitimbu.



Fonte: Autores.

Figura 6 – Curvas de isoconcentrações de NOx representando a dispersão da fábrica de cimento Pitimbu.

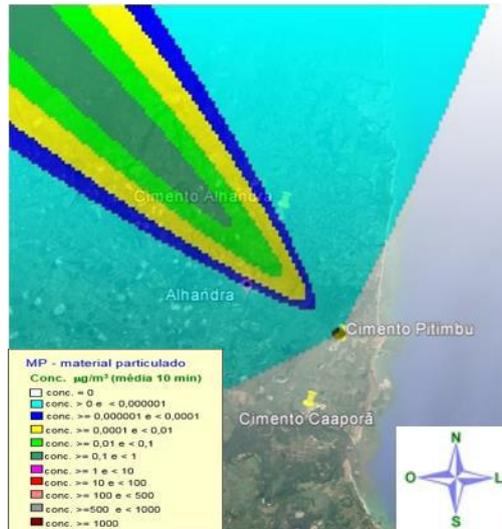


Fonte: Autores.

A contribuição da chaminé da fábrica de cimento Pitimbu referente as concentrações de MP foi de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o receptor município Alhandra, representando 0% do padrão primário de qualidade do ar de MP de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e 0% do padrão secundário de qualidade do ar do MP de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$

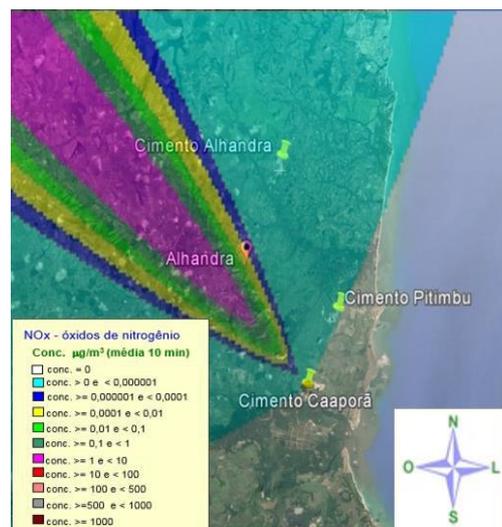
A contribuição da chaminé da fábrica de cimento Pitimbu referente as concentrações de NOx foi de $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o receptor município Alhandra, representando 0% do padrão primário de qualidade do ar do NO_2 de $100 \mu\text{g}/\text{m}^2$ e 0% do padrão secundário de qualidade do ar do NO_2 de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 7 – Curvas de isoconcentrações de MP representando a dispersão da fábrica de cimento Caaporã.



Fonte: Autores.

Figura 8 – Curvas de isoconcentrações de NOx representando a dispersão da fábrica de cimento Caaporã.



Fonte: Autores.

A contribuição da chaminé da fábrica de cimento Caaporã referente as concentrações de MP foi de $0,0014 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o receptor município Alhandra, representando $1,75 \times 10^{-3} \%$ do padrão primário de qualidade do ar de MP de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $5,83 \times 10^{-4} \%$ do padrão secundário de qualidade do ar do MP de $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 7)

A contribuição da chaminé da fábrica de cimento Caaporã referente as concentrações de NOx foi de $0,0027 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sobre o receptor município Alhandra, representando $2,7 \times 10^{-3} \%$ do padrão primário de qualidade do ar do NO₂ de $100 \mu\text{g}/\text{m}^2$ e $8,4 \times 10^{-4} \%$ do padrão secundário de qualidade do ar do NO₂ de $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Figura 8).

Com relação aos parâmetros primários e secundários de qualidade do ar da Resolução CONAMA 03/1990 comparando com as modelações realizadas para a cidade de Alhandra, em decorrência da interferência da cimenteira Alhandra, Pitimbu e Caaporã podemos observar que não há deletério sobre a qualidade do ar, sendo obedecido os limites estabelecidos. Tendo em vista que a pluma de poluentes gerada no modelo de dispersão da cimenteira Alhandra, Pitimbu e Caaporã, não

incide diretamente ou não ultrapassa os limites de qualidade do ar permitida na legislação CONAMA 03 sobre a cidade supradita.

Vale salientar que os valores obtidos contemplam apenas uma única fonte de cada indústria tomada como principal contribuinte para os poluentes emitidos. Certamente o somatório de todas as emissões da fábrica, sejam elas a partir de pontuais, fugitivas e evaporativas, resultarão em valores superiores a este estudo.

4. Conclusões

Portanto, os resultados da modelagem de dispersão atmosférica mostram que não há impactos negativos significativos sobre a cidade de Alhandra e nem qualquer possibilidade de violação dos respectivos padrões de qualidade do ar dos poluentes estudados derivados da fábrica de Cimento Alhandra, Pitimbu e Caaporã

E imprescindível o acompanhamento (medição direta com equipamentos) nos pontos de lançamento dos poluentes atmosféricos de modo a acompanhar e monitorar o impacto de tais fontes sobre o meio ambiente.

Referências

- Abdul-Wahab, S. A. (2003). Analysis of thermal inversions in the Khareef Salalah region in the Sultanate of Oman. *J. Geophys. Res.-Atmos. (JGR-Atmospheres)* 108 (D9), 4274.
- Abreu, M. L. (1998) Climatologia da estação chuvosa de Minas Gerais: de Nimer 1977 à Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Geonomos*. 6(2). 17-22.
- Baird, C., & Cann, M. (2011) *Química ambiental*. Tradução: Marcos Tadeu Grassi et al. Editora Bookman, (4ª ed.).
- Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, v.51, p. 142–161.
- Boçon, F. T. (1998) *Modelagem matemática do escoamento e da dispersão de poluentes na microescala atmosférica*. 1998. 308f. Tese (Pós-graduação em Engenharia Mecânica – Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., Barros, M. T. L., Spencer, M., Porto, M., Nucci, Juliano, N., Eiger, S., Gallardo, A., Bonnacarrere, J., Souza, T., & Contrera, R. (2005). *Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável*. (2ª ed.): Pearson Prentice Hall, 2005.
- Brasil. Ministério do Meio Ambiente. (1990) Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. Resolução nº 03. *Dispõe sobre padrões de qualidade do ar previstos no PRONAR*. Brasília, DF, 28 de junho.
- Canpolat, B. R., Atimtay, A. T., Munlafalioglu, I., Kalafatoglu, E., & Ekinci, E. (2002). Emission factors of cement industry in Turkey. *Water, Air, Soil Pollut.* 138(1-4), 235-252.
- Cerqueira, L. (2010). *Poluentes Atmosféricos, Fórum Livre*. <<http://www.unilivre.org.br/centro/textos/polar.htm>. 2010>.
- Christofolletti, A. (1999). *Modelagem de sistemas ambientais*. Editora Edgard Blücher Ltda, 236p.
- Cortez, L. A. B., Lora, E. E. S., & Gómez, E. O. (2009) *Biomassa para energia*. Campinas. SP. Editora Unicamp.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. (2005). *Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento Por Água Subterrânea Estado De Paraíba*. Diagnostico Município de Alhandra. Recife.
- Crowl, D. A., & Louvar, J. F. (2002). *Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications* (2nd ed.). Prentice Hall PTR, U.S. 172.
- Cui, H., Yao, R., Xu, X., Xin, C., & Yang, J. (2011) A tracer experiment study to evaluate the CALPUFF real time in a near-field complex terrain setting. *Atmospheric Environment*, v. 45, pp. 7525-7532, 2011
- EMBRAPA/CPATC – Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros. (1994) *Plano Diretor do Centro de Pesquisa Agropecuária dos Tabuleiros Costeiros (CPATC)*. Brasília: EMBRAPA, SPI, 37 p.
- EPA, (2005). *Revision to the Guideline on Air Quality Models: Adoption of a Preferred General Propose (Flat and Complex Terrain) Dispersion Model and Other Revisions; Final Rule (Federal Register)*. 70(215).
- Ferreira, A. G., & Mello, N. G. S. (2005) Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1(1), 15-28.
- Freitas, M. K. (2003) Investigação da produção e dispersão de poluentes do ar no ambiente urbano: determinação empírica e modelagem em rede neural da concentração de CO. 2003. 242f. Tese (doutorado) - USP/São Carlos-SP
- Furrier, M., Araújo, M. E., & Meneses, L. F. (2006) Geomorfologia e Tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. *Revista do Instituto de Geociências – USP*. 6(2), 61-70.

- Green N8 Residents Group (2004). *Planning Application for Concrete Batching Plant*. Cranford Way, Hornsey, Application No. HGY/2004/1265. www.GreenN8.org
- Guo, Q., & Eckert, J. O. (1996) Heavy metal outputs from a cement kiln co-fired with hazardous waste fuels. *J. Hazard. Mater.*, 51(1-3), 47-65.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (2007) *Climate Change 2007: Mitigation*. IPCC, 2007. 851p.
- Kaantee, U., Zevenhoven, R., Backman, R., & Hupa, M. (2004) Cement manufacturing using alternative fuels and the advantages of process modelling. *Fuel Process. Technol.*, v. 85, n. 4, p. 293-301.
- Kawano, M. (2003) *Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos*. 121f. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Ambiental – Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Lora, E. E. S. (2002) *Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte*. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência.
- Mabesoone, J. M., & Alheiros, M. M. (1988) Origem da bacia sedimentar costeira de Pernambuco-Paraíba. *Revista Brasileira de Geociências*, 18, 476-482.
- Mollion, L. C. B., & Bernardo, S. O. (2002) Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17(1), 1-10.
- Neves, B. B. B., Riccomini, C., Fernandes, T. M. G., & Sant'anna, L. G. (2004). O sistema tafrogênico terciário do saliente oriental nordestino na Paraíba: um legado proterozóico. *Revista Brasileira de Geociências*, 34(1), 127-134.
- Quadro, M. F. L. (1994) *Estudos de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico (ZCAS) sobre a América do Sul*. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos: INPE, 124 p.
- Sadeghian, M., & Fatehi, A. (2009) Identification of nonlinear predictor and simulator models of a cement rotary kiln by locally linear neuro-fuzzy technique. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 58, 1121–1127.
- Santi, A. M. M. (2003) *Co-incineração e co-processamento de resíduos industriais perigosos em fornos de clínquer: Investigação no maior pólo produtor de cimento do País, Região Metropolitana de Belo Horizonte, MG, sobre os riscos ambientais, e propostas para a Segurança Química*. 227 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Santos, L. M. M. (2006) *Avaliação ambiental de processos industriais*. São Paulo- SP. Signus Editora.
- Seangkiatituyuth, K., Surapipith, V., Trantakarnapa, K., & Lothongkum, A.W. (2011). Application of the AERMOD modeling system for environmental impact assessment of NO₂ emissions from a cement complex. *J. Environ. Sci.* 23(6), 931–940.
- Song, D., Yang, J., Chen, B., Hayat, T., & Alsaedi, A. (2016). Life-cycle environmental impact analysis of a typical cement production chain. *Appl. Energy*, 164, 916–923.
- Szabó, L., Hidalgo, I., Ciscar, J. C., & Soria, A. (2006). CO₂ emission trading within the European Union and Annex B countries: the cement industry case. *Energy Policy* 34(1), 72–87.
- Turner, D. B. (1994) *Workbook of atmospheric dispersion estimates*, (2nd ed.) Lewis Publishers; New York.
- Van Ruijven, B. J., VanVuuren, D. P., Boskalkon, W., Neeils, M. L., Saygin, D., & Patel, M. K. (2016). Long-term model-based projections of energy use and CO₂ emissions from the global steel and cement industries. *Resour. Conserv. Recycl.* 112, 15–36.
- Velloso, M. F. A. (2007) *Avaliação de modelos gaussiano para fins regulatórios – um estudo para a Bacia Aérea III da Região Metropolitana do Rio de Janeiro*. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- Von Bahr, B., Hanssen, O. J., Vold, M., Pott, G., Stoltenberg-hansson, E., & Steen, B. (2003) Experiences of environmental performance evaluation in the cement industry. Data quality of environmental performance indicators as a limiting factor for Benchmarking and Rating. *J. Cleaner Prod.*, 11(7), 713-725.
- WBCSD - World Business Council for Sustainable Development), IEA (International Energy Agency (2009). *Cement Technology Roadmap 2009: Carbon Emissions Reductions up to 2050*. World Business Council for Sustainable Development and International Energy Agency, [http://wbcsdcement.org/pdf/technology/WBCSD-IEA Cement%20Roadmap.pdf](http://wbcsdcement.org/pdf/technology/WBCSD-IEA%20Roadmap.pdf).
- WBCSD - World Business Council for Sustainable Development. (2012) *CSI – Guidelines for Emissions Monitoring and Reporting in the Cement Industry*.
- Xavier, T. M. B. S. (2001) *Tempo de Chuva – estudos climáticos e de previsão para o Ceará e o Nordeste Setentrional*. Fortaleza: ABC Editora, 478 p.