

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

JONAS NASCIMENTO CHICONI

**TENDÊNCIAS DE LONGO PRAZO DO ÓXIDO DE NITROGÊNIO E
DIÓXIDO DE NITROGÊNIO NA GRANDE PHOENIX (EUA),
ASSOCIADAS ÀS EMISSÕES VEICULARES DE NO_x**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2015

JONAS NASCIMENTO CHICONI

**TENDÊNCIAS DE LONGO PRAZO DO ÓXIDO DE NITROGÊNIO E
DIÓXIDO DE NITROGÊNIO NA GRANDE PHOENIX (EUA),
ASSOCIADAS ÀS EMISSÕES VEICULARES DE NO_x**

Monografia apresentada à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Câmpus* Londrina, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Adjunct Researcher Peter Hyde.

LONDRINA

2015



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Londrina
Coordenação de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Monografia

TENDÊNCIAS DE LONGO PRAZO DO ÓXIDO DE NITROGÊNIO E DIÓXIDO DE NITROGÊNIO NA GRANDE PHOENIX (EUA), ASSOCIADAS ÀS EMISSÕES VEICULARES DE NO_x

por

Jonas Nascimento Chiconi

Monografia apresentada no dia 19 de novembro de 2015 ao Curso Superior de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho APROVADO.

Prof. Dr. Admir Crésó de Lima Targino
(UTFPR)

Profa. Dra. Joseane Débora Peruço Theodoro
(UTFPR)

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
(UTFPR)

Profa. Dra. Ligia Flávia Antunes Batista
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Ambiental

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

Aos meus pais, Derivaldo e Lucia, com todo amor e gratidão por todo incentivo e ajuda, encorajando-me a enfrentar os momentos difíceis da graduação e da vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por me dar força e paciência principalmente nessa etapa da vida, o qual me proporcionou momentos únicos, mas também dificuldades que nunca havia enfrentado. Diante dele encontrei fé e determinação para superar todos os problemas e dificuldades.

Agradeço aos meus familiares, principalmente meus pais Derivaldo e Lucia, pelo incentivo, compreensão, conselhos, ensinamentos, não só para superar as dificuldades durante a graduação, mas da vida toda. Desde pequeno eles buscaram proporcionar uma educação de qualidade dentro e fora de casa, não poupando esforços.

Ao pesquisador Peter Hyde, pela oportunidade de realizar essa incrível pesquisa nos Estados Unidos, pelos ensinamentos, amizade e principalmente pela dedicada orientação durante a realização deste trabalho em inglês. Gostaria de agradecer também, do mesmo modo acima, ao Prof.º Dr.º Admir Crésó de Lima Targino que foi meu orientador no Brasil em uma pesquisa na área de poluição atmosférica, o qual me proporcionou o prazer nessa área de atuação.

Agradeço a Capes e o CNPq pela oportunidade de participar do programa “ciência sem fronteiras”, sendo esse de fundamental importância para uma educação universitária de qualidade.

Meus sinceros agradecimentos à minha companheira de trabalho e namorada Ana Raquel, pelo apoio, auxílio, amizade e paciência nos momentos difíceis que passamos nos Estados Unidos da América (EUA).

Agradeço aos professores e pesquisadores do curso de Engenharia Ambiental pelos ensinamentos transferidos, conselhos e amizade ao longo do curso.

Aos meus amigos que me acompanharam neste passar de anos, pelos momentos felizes, tristes, pelas amizades sinceras e por todos os momentos memoráveis que passamos juntos.

Meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

CHICONI, Jonas N. **Tendências de longo prazo do óxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio na grande Phoenix (EUA), associadas às emissões veiculares de NO_x**. 2015. 72p. Trabalho de Graduação (Engenharia Ambiental). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2015.

A poluição atmosférica tem sido monitorada e regulamentada visando alcançar uma melhor qualidade do ar. Desde 1970, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) estabeleceu as normas nacionais de qualidade do ar. Atualmente, veículos que utilizam motores de combustão são a forma mais utilizada de transporte e dependem especialmente de combustíveis fósseis. Dois importantes poluentes regulamentados pela EPA são o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o ozônio (O₃). Ambos são formados pelo óxido de nitrogênio (NO), emitido por veículos que utilizam motores de combustão. Este trabalho analisou as tendências de longo prazo de NO e NO₂ em seis estações de monitoramento do ar no Condado de Maricopa (Alamo Lake, Buckeye, West Phoenix, Greenwood, JLG Supersite e Central Phoenix). Além disso, estimou-se como o volume de tráfego de veículos e as taxas de emissões de NO influenciam nas concentrações atmosféricas de NO_x. Foram calculados também as concentrações de O₃ a partir da razão NO₂/NO em horários específicos da manhã e tarde para 4 estações de monitoramento do ar (Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix). Os resultados encontrados mostraram que todas as concentrações de NO₂ estão dentro das normas determinadas pela EPA para as estações estudadas. As maiores concentrações de NO_x foram registradas nas estações de monitoramento do ar Greenwood e Central Phoenix e as concentrações calculadas de O₃ atingiram valores baixos no inverno e muito altos no verão. Observou-se que as emissões em massa de NO_x estão diminuindo ao longo dos anos nas ruas e avenidas ao redor dessas estações de monitoramento, devido à descentralização urbana no Condado de Maricopa e aos veículos estarem mais eficientes e emitindo menos poluentes.

Palavras chave: Poluição do ar. Dióxido de nitrogênio. Óxido de nitrogênio. Tráfego de veículos.

ABSTRACT

CHICONI, Jonas N. **Long-term trends of nitric oxide and nitrogen dioxide in greater Phoenix, as affected by trends in vehicular NO_x emissions.** 2015. 72p. Final Paper. (Environmental Engineering). Federal Technological University of Paraná, Londrina, 2015.

Air pollution has been monitored and regulated to achieve better air quality. Since 1970, the United States Environmental Protection Agency (EPA) has established the national ambient air quality standards. Nowadays, combustion vehicles are the most used form of transportation and nearly all rely on fossil fuels. Two important pollutants regulated by EPA are nitrogen dioxide (NO₂) and ozone (O₃). Both are formed by nitric oxide (NO) emitted by combustion vehicles. The purpose of this paper is to compare the long-term trends of NO and NO₂ at six air monitoring sites of Maricopa County (Alamo Lake, Buckeye, West Phoenix, Greenwood, JLG Supersite and Central Phoenix). In addition, it is important to estimate how the trends in vehicular traffic and in NO emission rates have influenced ambient concentrations of NO_x. We also calculate O₃ concentrations from the NO₂/NO ratios for morning and afternoon for four monitoring sites (Buckeye, West Phoenix, Greenwood and Central Phoenix). The results showed that all the NO₂ concentrations are within the standards determined by EPA for these monitoring stations. Greenwood and Central Phoenix monitoring stations have the highest concentrations of NO_x and the calculated ozone concentrations are much lower in winter than in summer. NO_x mass emissions are decreasing over the years on the streets and roads around these monitoring stations because of the decentralization of urban areas in the Maricopa County and the vehicles are more efficient and emitting less pollutants.

Keywords: Air pollution. Nitrogen dioxide. Nitric oxide. Vehicular traffic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação do smog	21
Figura 2 - Nuvem marrom vista sobre a região de Phoenix.	24
Figura 3 - Mapa de localização do Condado De Maricopa e de sua principal cidade Phoenix, o qual também é a capital do estado do Arizona.....	25
Figura 4 - Estações de monitoramento de poluição do ar no Condado De Maricopa que possuem medições ativas de [NO _x] e [O ₃].....	26
Figura 5 - Climograma da cidade de Phoenix	29
Figura 6 - Distribuição da direção dos ventos da cidade de Phoenix.....	29
Figura 7 - Mapa da estação de monitoramento de poluição do ar Alamo Lake e uma foto do parque.	31
Figura 8 - Estação de monitoramento de poluição do ar JLG Supersite.	32
Figura 9 - Mapa da estação JLG Supersite.....	32
Figura 10 - Estação de monitoramento de poluição do ar Buckeye.	33
Figura 11 - Estação de monitoramento de poluição do ar Central Phoenix.	34
Figura 12 - Estação de monitoramento de poluição do ar Greenwood.	35
Figura 13 - Estação de monitoramento de poluição do ar West Phoenix.....	36
Figura 14 - Estação de monitoramento de poluição do ar Pinnacle Peak.....	37
Figura 15 - Equipamento modelo EC 9841 que mede as concentrações de NO _x	38
Figura 16 - Equipamento modelo TELEDYNE 400E que mede as concentrações de O ₃	39
Figura 17 - Emissões de óxido de nitrogênio no ano de 2011 no Condado De Maricopa.	44
Figura 18 - Concentrações de NO ₂ (ppb) expressos em médias anuais ao longo dos anos em seis estações de monitoramento do ar no Condado De Maricopa.	46
Figura 19 - Concentrações de NO ₂ (ppb) expresso como 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias, média ao longo de 3 anos, em seis estações de monitoramento do ar no Condado De Maricopa.	48
Figura 20 - Concentrações de NO ₂ (ppb) expresso em média das concentrações máximas horárias ao longo dos anos em seis estações de monitoramento do ar no Condado De Maricopa.	51

Figura 21 - Concentrações de NO (ppb) expresso em médias anuais ao longo dos anos em seis estações de monitoramento do ar no Condado De Maricopa.	52
Figura 22 – Concentrações medidas de NO e NO ₂ , e calculadas de O ₃ (ppb) em dois períodos do dia, 7h e 16h, em três diferentes anos, 2012, 2013 e 2014 para as estações de monitoramento Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix. Usou-se como base a estação Pinnacle Peak para selecionar os 20 dias com maiores concentrações de O ₃	55
Figura 23 – Concentrações medidas de NO e NO ₂ , e calculadas de O ₃ (ppb) em dois períodos do dia, 7h E 16h, em três diferentes anos, 2012, 2013 e 2014 para as estações de monitoramento Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix. Usou-se como base a estação Pinnacle Peak para selecionar os 20 dias com menores concentrações de O ₃	57
Figura 24 - Emissões normalizadas em massa de NO _x , NO _{x(Inicial)} é igual a 1,32 ton/dia de semana, e as concentrações de NO ₂ , 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação West Phoenix.	61
Figura 25 - Emissões normalizadas em massa de NO _x , NO _{x(Inicial)} é igual a 1,03 ton/dia de semana, e as concentrações de NO ₂ , 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação JLG Supersite.....	63
Figura 26 - Emissões normalizadas em massa de NO _x , NO _{x(Inicial)} é igual a 1,09 ton/dia de semana, e as concentrações de NO ₂ , 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação Greenwood.....	65
Figura 27 - Emissões normalizadas em massa de NO _x , NO _{x(Inicial)} é igual a 1,18 ton/Dia de semana, e as concentrações de NO ₂ , 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação Central Phoenix.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Os anos de dados disponíveis das concentrações de NO e NO ₂ para cada estação de monitoramento do ar.....	27
Tabela 2 - As principais ruas, avenidas e rodovias dentro de um raio de 2,4 quilômetros das estações de monitoramento do ar (ruas, avenidas ou rodovias com intenso fluxo de veículos, mesmo fora do raio de 2,4 quilômetros, foram incluídas)	42
Tabela 3 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas e avenidas próximas a estação de monitoramento Buckeye	59
Tabela 4 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento West Phoenix.....	60
Tabela 5 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento JLG Supersite	62
Tabela 6 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento Greenwood	64
Tabela 7 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento Central Phoenix	66

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CO	Monóxido de carbono
COV	Compostos Orgânicos Voláteis
EPA	The United States Environmental Protection Agency
EUA	Estados Unidos da América
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
HAPs	Hazardous Air Pollutants
HNO ₃	Ácido nítrico
HR	Hidrocarbonetos Reativos
MOVES	Motor Vehicle Emissions Simulator
MP _{2,5}	Material particulado com diâmetro menor do que 2,5 µm
MP ₁₀	Material particulado com diâmetro menor do que 10 µm
N	Norte
NH ₄ ⁺	Íons amônio
NO	Óxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
[NO _x]	Concentração de NO _x (ppb)
[NO]	Concentração de NO (ppb)
[NO ₂]	Concentração de NO ₂ (ppb)
[O ₃]	Concentração de O ₃ (ppb)
O ₂	Oxigênio
O ₃	Ozônio
Pb	Chumbo
ppb	Partes por bilhão
S	Sul
SO ₂	Dióxido de enxofre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	18
3.1.1	Óxidos de Nitrogênio (NO _x)	18
3.1.2	Ozônio (O ₃)	21
3.2	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NO CONDADO DE MARICOPA	23
4	MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1	LOCAL DE ESTUDO: CONDADO DE MARICOPA	25
4.2	BANCO DE DADOS	26
4.3	CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO	28
4.4	DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO	30
4.4.1	Alamo Lake	30
4.4.2	JLG Supersite	31
4.4.3	Buckeye	32
4.4.4	Central Phoenix	33
4.4.5	Greenwood	34
4.4.6	West Phoenix	35
4.4.7	Pinnacle Peak	36
4.5	EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE NO _x E O ₃	37
4.6	MODELO MOVES (<i>MOTOR VEHICLE EMISSIONS SIMULATOR</i>)	40
4.7	CÁLCULO DAS EMISSÕES EM MASSA DE NO _x	41
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.1	EMISSÕES DE ÓXIDO DE NITROGÊNIO - CONDADO DE MARICOPA	44
5.2	NORMAS DA AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL NORTE-AMERICANA (EPA)	45
5.3	TENDÊNCIAS DE NO ₂ E NO	49
5.4	CÁLCULOS DO OZÔNIO	54

5.5 TRÁFEGO DE VEÍCULOS E EMISSÕES EM MASSA DO NO _x	58
6 CONCLUSÃO.....	68
REFERÊNCIA.....	70

1 INTRODUÇÃO

A partir da Primeira Revolução Industrial, final do século XVIII, os seres humanos têm procurado maximizar os seus meios de produção e minimizar os custos. Conseqüentemente, o transporte começou a melhorar e os veículos de combustão interna tornaram-se a forma dominante de transporte. Para que isso ocorresse, uma fonte de energia era necessária: os combustíveis fósseis.

Desde aquela época até os dias atuais, os combustíveis fósseis são usados em todo o mundo. No entanto, nas últimas décadas, problemas como o aquecimento global, alterações climáticas, problemas respiratórios e altas taxas de câncer foram desenvolvendo um senso crítico e a população começou a se preocupar cada vez mais com a poluição do ar e seus impactos na saúde e clima.

As conseqüências para a saúde humana decorrentes da poluição atmosférica têm sido amplamente estudadas nos últimos anos. Embora a poluição do ar tenha sido observada e seus efeitos notados no início do século XIX (em Londres, Inglaterra), apenas em meados do século XX foi dada uma maior importância ao assunto, quando um incidente em Donora, Pensilvânia (em 1948), afetou aproximadamente metade da população da cidade que teve grave incidência de problemas respiratórios e no sistema circulatório, totalizando 40 mortes. O incidente ocorreu por causa das elevadas concentrações de poluentes como o dióxido de enxofre e fluoreto de hidrogênio, ambos provenientes das indústrias siderúrgicas da região (EPA, 2014). Essas elevadas concentrações de poluentes coincidiram com uma situação de inversão térmica, no qual o ar quente se sobrepõe ao ar mais frio inibindo o transporte vertical de massa e aprisionando os poluentes na camada limite atmosférica.

Outro desastre que repercutiu globalmente ocorreu durante o inverno de 1952; a cidade de Londres sofreu um episódio de *smog* (nevoeiro ou neblina combinado com fumaça e outros poluentes atmosféricos) (VALLERO, 2008), que matou mais de quatro mil pessoas. A visibilidade foi comprometida pela poluição atmosférica e as pessoas estavam expostas e constantemente respirando os gases tóxicos. A poluição teve muitas fontes, mas a maior delas foi a combustão do carvão para o aquecimento residencial (BELL et al., 2004).

Durante períodos mais quentes, a poluição do ar também pode ser um problema, como tem ocorrido em Los Angeles desde 1944. A radiação solar combinada com poluentes precursores do ozônio, como os compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio (NO_x), reagem fotoquimicamente formando uma neblina marrom conhecida como *smog* fotoquímico (URBAN et al., 2011).

Casos como estes se tornaram frequentes com o desenvolvimento de indústrias e áreas urbanas cada vez maiores, sendo assim um problema global. Para minimizar essa situação países e estados começaram a estabelecer normas e adaptar a legislação para reduzir a poluição do ar. Desde 1970, a Agência Ambiental Norte-americana (EPA) tem sido responsável por estabelecer os padrões nacionais de qualidade do ar dos Estados Unidos da América.

A EPA determinou seis poluentes comuns, chamados de poluentes critério, os quais são detalhadamente monitorados e controlados para a melhoria da saúde pública. Os seis poluentes comuns são o ozônio (O_3), material particulado (MP_{10} e $\text{MP}_{2,5}$), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrogênio (NO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e chumbo (Pb). Além disso, a EPA regula outros poluentes, que são chamados de “poluentes perigosos do ar” (*Hazardous Air Pollutants* - HAPs) ou poluentes tóxicos do ar. Estes tipos de poluentes podem ser, em concentrações elevadas, mais perigosos para a saúde humana do que os poluentes critério e têm sido associados com o aumento nos casos de câncer. No total, existem 188 HAPs, entre eles, o benzeno encontrado na gasolina, o percloroetileno lançado em algumas instalações de limpeza a seco, e policíclicos de matéria orgânica encontrados na combustão de madeira residencial.

Do ponto de vista de saúde humana, o NO_x pode ser muito perigoso com efeitos adversos sobre o sistema respiratório, tanto por pequenas partículas de nitrato quanto pela inalação direta desses gases, os quais atingem as partes mais sensíveis dos pulmões. O NO, por exemplo, é venenoso para animais e seres humanos, causando dores de cabeça, irritação nos olhos e na garganta, falta de ar e perda de força. Além disso, a exposição constante pode causar tosses fortes ou cianose e, conseqüentemente, pode levar à morte. O NO_2 é um gás muito reativo, um agente oxidante forte e extremamente tóxico, podendo causar edema pulmonar e pneumonia química retardada (BAUKAL, 2005).

A camada de ozônio, na estratosfera, ocorre naturalmente sendo de extrema importância para reduzir a radiação ultravioleta que atinge a superfície da Terra

(BECKETT, 1991). Por outro lado, quando o O₃ está presente em concentrações elevadas no nível do solo é diretamente prejudicial para os seres humanos, podendo causar irritação nos olhos e vias respiratórias, intensificar problemas cardiovasculares e diminuir a capacidade pulmonar (EPA, 2015). O O₃ é menos solúvel em água do que outros gases irritantes, por essa razão é mais eficiente em alcançar as superfícies dos alvéolos pulmonares, onde acontecem as trocas gasosas (BECKETT, 1991).

A poluição atmosférica pode ser muito perigosa para as pessoas idosas, cujos órgãos e metabolismo são antigos e não estão funcionando mais perfeitamente, para as crianças e bebês, porque ainda estão crescendo e as suas funções pulmonares não estão totalmente desenvolvidas, e para as pessoas com problemas respiratórios, causando, por exemplo, a asma. A redução da função pulmonar e efeitos adversos podem ocorrer em pessoas que trabalham ou realizam alguma atividade física nesse tipo de local poluído. O *smog* fotoquímico pode ser muito perigoso para pessoas com doenças cardíacas, problemas respiratórios e asma (URBAN et al., 2011). Ainda, as florestas, vegetações, e plantações também podem ser danificadas pelo *smog*, porque ele é transportado para longe das áreas de origem (BAUKAL, 2005 e EPA, 1998).

Os problemas de qualidade do ar são variados e complexos, com diferentes situações trazendo diferentes resultados. Por exemplo, os efeitos de um poluente sobre a saúde dependem do tempo de exposição e de como o corpo de cada pessoa reage (GOVERNMENT OF CANADA, 2015). Além disso, muitos poluentes são instáveis e depois de formados ou liberados na atmosfera estão sujeitos ao transporte pelo vento, reações com outros poluentes no ar e deposição seca ou úmida.

Para controlar as emissões de poluentes atmosféricos e manter suas concentrações dentro dos padrões, é necessário saber de onde eles estão vindo e, em seguida, encontrar uma solução (SPELLMAN, 1999). Frequentemente, as pessoas não se importam muito com a qualidade do ar, decorrente das dificuldades de atribuir doenças e mortes exclusivamente pela exposição à um ambiente poluído, sendo a poluição do ar como um fator contribuinte, mas não a principal causa (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2014).

Desta forma, este trabalho teve como objetivo estudar e analisar os valores das concentrações atmosféricas a longo prazo dos poluentes óxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio em seis estações de monitoramento do ar (Alamo Lake,

Buckeye, West Phoenix, Greenwood, JLG Supersite e Central Phoenix) no Condado de Maricopa (EUA) associando às emissões veiculares de NO_x.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo geral de analisar os valores das concentrações atmosféricas a longo prazo (desde 1990 até 2014) do monóxido de nitrogênio e dióxido de nitrogênio em seis estações de monitoramento do ar (Alamo Lake, Buckeye, West Phoenix, Greenwood, JLG Supersite e Central Phoenix) no Condado de Maricopa (EUA), associar esses poluentes com as emissões veiculares de NO_x e tentar entender como os diferentes níveis de poluição atmosférica afetam a saúde da população.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparar as concentrações de monóxido e dióxido de nitrogênio na atmosfera com os valores permitidos pelas normas federais dos EUA, regulamentadas pela EPA;
- Calcular as concentrações de O₃ da relação NO₂/NO, considerando o período da manhã e tarde para 4 estações de monitoramento do ar (Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix); e
- Analisar como as tendências no tráfego de veículos e as taxas de emissões de NO influenciam nas concentrações atmosféricas de NO_x.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

De acordo com Jacobson et al. (2012), a poluição atmosférica é considerada todo o ar que contém gases e/ou partículas, sólidas ou líquidas emitidas antropogenicamente e naturalmente, e em concentrações elevadas causando problemas de saúde ou doenças em seres humanos, plantas, animais e ecossistemas em geral. A poluição do ar também tem efeitos sobre os materiais, danificando estruturas e obras de arte pelo seu poder corrosivo.

A poluição atmosférica pode ser melhor caracterizada em uma série de escalas temporais e espaciais, tais como local (por exemplo, as altas concentrações de monóxido de carbono (CO) emitidas pelos veículos a combustão nas estradas), regional (mistura de oxidantes urbanos entre áreas metropolitanas) e global (liberação de radioatividade, clorofluorocarbonetos e mercúrio) (VALLERO, 2008).

As causas das emissões também são amplas, podendo citar as atividades agrícolas (uso de inseticidas, pesticidas e fertilizantes), exaustão das fábricas e indústrias, mineração (poeira e produtos químicos), poluição do ar em locais fechados (produtos de limpeza e materiais de pintura são exemplos que liberam produtos químicos tóxicos no ar) e queima de combustíveis fósseis, especialmente no transporte urbano (KJELLSTROM et al., 2006).

3.1.1 Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

De acordo com Stern et al. (1973), os óxidos de nitrogênio são liberados durante a combustão. Condições de alta temperatura e pressão são fundamentalmente necessárias para formar esses compostos de nitrogênio e oxigênio. Portanto, usinas geradoras de energia e a combustão veicular, que utilizam combustíveis fósseis, são grandes emissores de óxidos de nitrogênio.

Segundo Vallero (2008), em geral, a combustão produz dois principais compostos oxigenados de nitrogênio, o óxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), sendo 90% até 95% desse total de NO, chamado de poluente primário porque é liberado diretamente da fonte emissora para a atmosfera. Entretanto, na atmosfera o NO é rapidamente convertido em NO₂, o qual é chamado de poluente secundário porque é formado fotoquimicamente na atmosfera em vez de ser emitido diretamente.

O NO reage com oxigênio atmosférico (O₂) para formar NO₂. No caso da poluição do ar, o NO_x é uma maneira conveniente para referir-se as concentrações de NO e NO₂ na atmosfera, representado pela Equação 1 (STERN et al., 1973).

$$[NO_x] = [NO] + [NO_2] \quad (1)$$

Onde:

$[NO_x]$ é a concentração de NO_x (ppb);

$[NO]$ é a concentração de NO (ppb);

$[NO_2]$ é a concentração de NO₂ (ppb).

O NO e o NO₂ são nocivos e perigosos para a saúde humana, e eles têm características diferentes. Por exemplo, o NO não tem cor e odor e não é solúvel em água. Por outro lado, o NO₂ tem um odor ácido, é pouco solúvel em água e possui uma coloração amarronzada em concentrações suficientemente elevadas (STERN et al., 1973).

De acordo com a EPA (1998), o NO_x reage com muitos outros compostos na atmosfera e os produtos dessas reações podem causar diversos tipos de problemas de saúde e impactos ambientais. A chuva ácida é um exemplo, pois as reações entre NO_x e dióxido de enxofre com outros gases já presentes na atmosfera e água formam ácido nítrico (HNO₃), íons amônio (NH₄⁺) e ácido sulfúrico (H₂SO₄).

Os poluentes atmosféricos podem ser transportados por centenas de quilômetros e sua deposição ocorre de duas maneiras diferentes, seca ou úmida. A deposição úmida ocorre quando existe precipitação, neve ou nevoeiro que remove os

ácidos da atmosfera e os deposita na superfície da Terra. A poeira, a fumaça e os gases poluentes também alcançam a superfície da Terra, onde são incorporados e absorvidos em seus solos, vegetação e corpos d'água por contato direto; um fenômeno conhecido como deposição seca. Posteriormente ocorre o carreamento desses poluentes pela água da chuva para os lagos, córregos e rios (BRINEY, 2015).

Normalmente a água de origem pluvial já é ligeiramente ácida, com um intervalo de pH entre 5,3 e 6, enquanto que a chuva ácida tem valores de pH abaixo desse intervalo. As consequências da chuva ácida são: deterioração de carros e edifícios, danos causados às florestas, e a acidificação dos córregos, rios e lagos, prejudicando muitos peixes e espécies aquáticas, e por outro lado favorecendo o crescimento excessivo de plantas aquáticas que aceleram a eutrofização (EPA, 1998).

No entanto, é importante mencionar que as [NO] não são elevadas o suficiente para representar essas ameaças (por essa razão, não existe norma para esse poluente); por outro lado as [NO₂] podem ser elevadas o suficiente para causar problemas de saúde (por isso, existem normas ambientais para o NO₂). Assim, as concentrações elevadas de NO estão limitadas às instalações de produção industrial, de fábricas ou instalações de produção química onde os trabalhadores estão expostos. Em contraste, as [NO₂] podem atingir níveis que excedem os padrões federais em ambientes abertos, atingindo toda a população de um determinado local (VALLERO, 2008).

Um outro problema para a saúde humana causada pelo NO_x é o *smog* fotoquímico, que é uma mistura complexa de compostos oxidantes. O ozônio é o principal responsável pelo *smog* fotoquímico, formado pela reação dos compostos orgânicos voláteis (COV), também são conhecidos como hidrocarbonetos reativos (HR), com o NO_x na presença da radiação solar (BAUKAL, 2005). A Figura 1 ilustra a formação do *smog* na camada mais baixa da atmosfera.

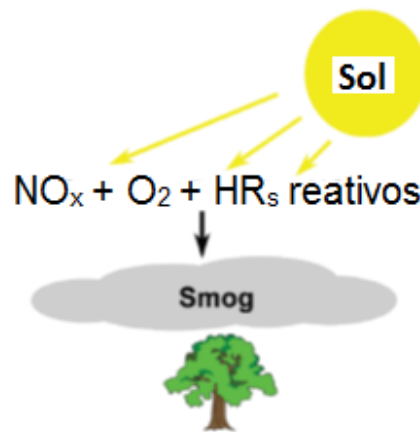


Figura 1 - Formação do smog
Fonte: Baukal (2005).

De acordo com a EPA (1998), o NO_x também degrada a visibilidade e agrava as mudanças climáticas. As altas concentrações de partículas de nitrato e de dióxido de nitrogênio são responsáveis por reduzirem a visibilidade.

O *smog* é um fenômeno que ocorre nas grandes cidades, mas é estendido para as regiões circundantes porque esses poluentes são transportados em escalas regional e continental (EPA, 1998).

3.1.2 Ozônio (O_3)

A presença de NO_x no nível mais baixo da atmosfera, a troposfera, é um dos dois principais reagentes para formar o O_3 . Sendo que o outro reagente é uma mistura complexa de hidrocarbonetos chamados de COV. O O_3 é formado fotoquimicamente absorvendo a radiação solar com comprimento de onda entre 220 e 320 nm (STERN et al., 1973). O NO_2 absorve a porção ultravioleta da radiação solar formando um único átomo de oxigênio (O), que é essencial para a reação fotoquímica do O_3 . A Equação 2 representa essa formação (STERN et al., 1973).



O $h\nu$ é a radiação solar responsável pela fotólise do NO_2 . A Equação 3 representa a formação do O_3 .



M é um terceiro composto com uma importante massa para a reação, podendo ser tanto moléculas de dióxido de nitrogênio ou oxigênio, material particulado, moléculas de gases traços e superfícies de objetos. Esse terceiro composto é responsável por absorver a energia da reação. A Equação 4 representa a fase final do ciclo, onde o O_3 é convertido novamente em NO_2 .



O ozônio é considerado um poluente secundário porque não é emitido diretamente pelas atividades humanas; suas únicas fontes naturais são os raios e relâmpagos.

A molécula de O_3 é extremamente reativa e, na troposfera, formada a partir de reações fotoquímicas entre COV e NO_x . Ou seja, radiação solar combinada com as emissões de instalações industriais, empresas geradoras de energia (termoelétricas), veículos a combustão, vapores de gasolina e solventes químicos são responsáveis por produzirem mais O_3 (EPA, 2015). Elevadas concentrações de O_3 ocorrem principalmente em grandes regiões metropolitanas, pois a combinação de COV e NO_x com alta incidência de radiação solar e ventos fracos são fatores fundamentais para episódios de poluição do ar por O_3 , quase todos ocorrendo no verão. Essas altas concentrações de ozônio podem durar várias horas ou até mesmo dias, com picos de concentrações no final da tarde, diminuindo com o pôr do sol e atingindo valores próximos de zero no período da noite, começando todo o ciclo novamente com ao nascer do sol (EPA, 2015).

O transporte de O₃ pelos ventos também é um problema porque as áreas rurais podem ser submetidas a níveis de O₃ perigosos provenientes dos grandes centros urbanos (EPA, 2015).

3.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA NO CONDADO DE MARICOPA

A combinação de altas temperaturas, baixa umidade, tempestades de areia e altas concentrações de poluentes no ar contribuem para o Condado de Maricopa ser um dos lugares mais perigosos para se viver nos EUA em relação à qualidade do ar. De acordo com a *American Lung Association* (2014), as cidades de Phoenix, Mesa e Scottsdale estão na 11^a colocação de cidades mais poluídas por O₃ e ocupam a 8^a colocação das mais poluídas por partículas com diâmetro aerodinâmico menor que 2,5 µm e 10 µm, chamadas de MP_{2,5} e MP₁₀, respectivamente.

Um fenômeno que ocorre frequentemente em Phoenix é chamado de nuvem marrom, uma camada de baixa altitude de poluição do ar visivelmente marrom. Esta camada visivelmente degradada é resultado de reduzida ventilação vertical com elevadas concentrações de NO_x e material particulado emitidos no horário de intenso tráfego da manhã (EASTWOOD, 2006).

As concentrações elevadas de NO e partículas finas de carbono são provenientes, principalmente, da queima de combustíveis fósseis em veículos e indústrias, que combinadas com alta incidência de radiação solar e poeira resultam em elevadas concentrações de NO₂. Essas elevadas concentrações de poluentes combinadas com o clima do deserto proporcionam o ciclo da nuvem marrom, pois no período da noite uma camada de inversão ocorre na cidade, típico de clima desértico. Consequentemente, o ar que contém a maior parte de poluentes fica retido próximo à superfície da Terra. Ao amanhecer, a superfície da cidade vai se aquecendo, e como resultado, os gases se expandem e as partículas sobem formando uma névoa visível que vai aumentando ao longo do dia (EASTWOOD, 2006). A Figura 2 mostra uma nuvem marrom em um dia de verão no centro de Phoenix.



**Figura 2 - Nuvem marrom vista sobre a região de Phoenix.
Fonte: Autoria própria (2015).**

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL DE ESTUDO: CONDADO DE MARICOPA

O estado do Arizona tem 15 condados, sendo um deles o Condado de Maricopa que é o 14º maior condado dos EUA, o 4º mais populoso, e contém 25 cidades e vilas. Esse condado tem três das quatro principais cidades do estado, que são Phoenix, Mesa e Scottsdale (o quarto é Tucson, no Condado de Pima). A Figura 3 mostra a localização do Condado de Maricopa nos EUA e de sua principal cidade Phoenix, capital do Arizona.



Figura 3 - Mapa de localização do Condado de Maricopa e de sua principal cidade Phoenix, o qual também é a capital do estado do Arizona.
Fonte: Adaptado do Google Maps.

Escolheram-se seis estações de monitoramento de poluição do ar (Alamo Lake, Buckeye, West Phoenix, Greenwood, JLG Supersite e Central Phoenix) com banco de dados e medições ativas de $[NO_x]$ e uma (Pinnacle Peak) com medição ativa de $[O_3]$. A Figura 4 mostra a localização das estações próximas ou dentro da cidade

de Phoenix, com exceção da estação de Alamo Lake por estar distante da região metropolitana. A estação de monitoramento Pinnacle Peak foi incluída no estudo porque seu banco de dados de $[O_3]$ permitiu a seleção de dias com $[O_3]$ altos e baixos para as análises de $[NO_x]$.

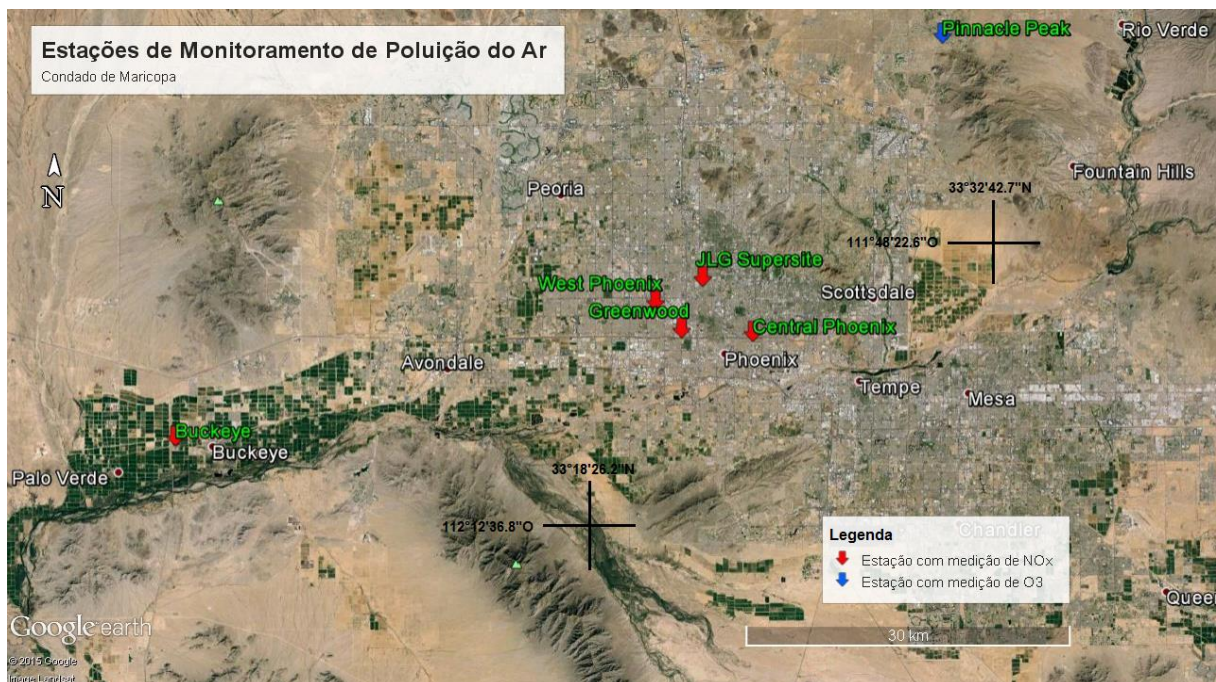


Figura 4 - Estações de monitoramento de poluição do ar no Condado de Maricopa que possuem medições ativas de $[NO_x]$ e $[O_3]$.

Fonte: Autoria própria.

4.2 BANCO DE DADOS

Uma parte dos dados de concentrações anuais e diárias de NO_2 e O_3 foi obtida a partir de um arquivo nacional, disponível no *website* da *United States Environmental Protection*. As concentrações horárias do NO_x , NO e NO_2 foram fornecidas diretamente por estações de monitoramento de poluição do ar. As concentrações anuais e diárias de NO foram calculadas a partir das concentrações horárias. Os anos de dados disponíveis para concentrações de NO e NO_2 das estações de monitoramento do ar do Condado de Maricopa encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Os anos de dados disponíveis das concentrações de NO e NO₂ para cada estação de monitoramento do ar

Estação de Monitoramento de poluição do ar	Anos de dados disponíveis
Alamo Lake	2005, 2006 e 2014
JLG Supersite	1999 até 2014
Buckeye	2004 até 2014
Central Phoenix	1990, 1991, 1992 e de 1995 até 2014
Greenwood	1997 até 2014
West Phoenix	1990, 1991, 1992 e de 1994 até 2014
Pinnacle Peak	2012 até 2014

Fonte: Autoria própria (2015).

Além disso, foram calculadas as concentrações horárias do O₃ pela Equação 5, que expressa o estado foto-estacionário do ozônio.

$$[O_3] = \frac{k_1[NO_2]}{k_3[NO]} \quad (5)$$

Onde:

$[O_3]$ é a concentração horária do O₃ (ppm);

$[NO_2]$ é a concentração horária do NO₂ (ppm);

$[NO]$ é a concentração horária do NO (ppm);

k_1 é a taxa de fotólise do NO₂ (min⁻¹), entre 0 a 0,55 min⁻¹ nos EUA, que varia de acordo com a época do ano, latitude e hora do dia (VALLERO, 2008);

k_3 é a taxa de reação entre NO e O₃ (ppm⁻¹min⁻¹), um dos valores mais usados é de 24,2 ppm⁻¹min⁻¹, sendo dependente da temperatura (VALLERO, 2008).

Os dados de ozônio obtidos na estação de monitoramento Pinnacle Peak, a qual possui um histórico de elevadas concentrações de O₃ no Condado de Maricopa, serviu como base para selecionar os 20 dias dessa estação que possuíam as maiores

e menores concentrações de ozônio. Posteriormente, usaram-se esses mesmos 20 dias como referência para selecionar as concentrações de NO e NO₂ nas outras estações de monitoramento do ar (Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix), para finalmente aplicar essas concentrações na Equação 5.

Para os cálculos das [O₃] foram selecionadas duas diferentes horas do dia, 7h e 16h. Às 7h é um dos períodos com maiores índices de emissões de poluentes por causa do fluxo intenso de veículos que ocorre no início da manhã. Por outro lado, as altas temperaturas e a grande incidência de radiação solar às 16h são propícias para as elevadas concentrações de O₃. Calculou-se o O₃ para os três últimos anos com dados disponíveis (2012, 2013 e 2014) para, respectivamente, as estações de monitoramento Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix. A ordem dessas estações de monitoramento é de oeste para leste, representando a circulação atmosférica dos ventos diurnos que geralmente vêm do oeste ou sudoeste.

4.3 CARACTERIZAÇÃO METEOROLÓGICA DA REGIÃO DE ESTUDO

O Condado de Maricopa está situado no deserto de Sonora e tem um dos verões mais quentes do país com temperaturas diárias superiores a 37 °C e baixos níveis de umidade durante este período do ano, atingindo níveis de umidade relativa do ar inferiores a 12%, que é considerado muito seco (MARICOPA, 2010). Em contrapartida, as temperaturas na cidade de Phoenix no inverno atingem valores inferiores a 10° C, apresentando assim uma amplitude térmica elevada entre essas duas estações do ano. O Condado de Maricopa não apresenta chuvas frequentes ao longo do ano, atingindo uma precipitação acumulada máxima no mês de junho de aproximadamente 25 mm e mínima no mês de junho com valores próximos a 0.

A Figura 5 apresenta o climograma da cidade de Phoenix, com médias de temperatura máxima, mínima e precipitação para o período 1981 até 2010. A Figura 6 apresenta a distribuição da direção dos ventos em porcentagem no Aeroporto Internacional *Phoenix Sky Harbor*, instalado na região central da cidade de Phoenix. A distribuição dos ventos está baseada em dados do ano de 2010 até 2015.

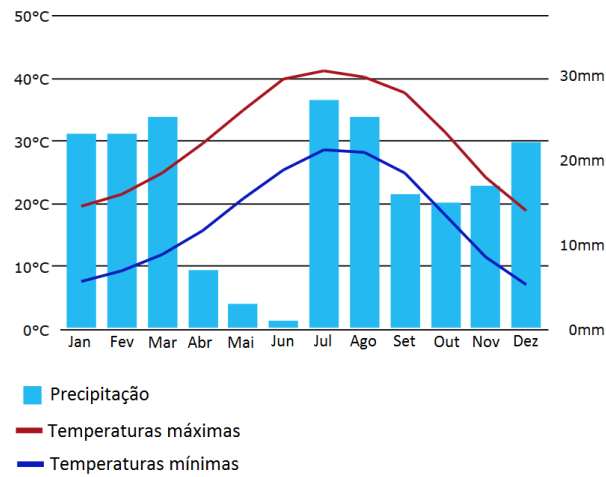


Figura 5 – Climograma da cidade de Phoenix.
Fonte: Adaptado de U.S. climate data (2015).

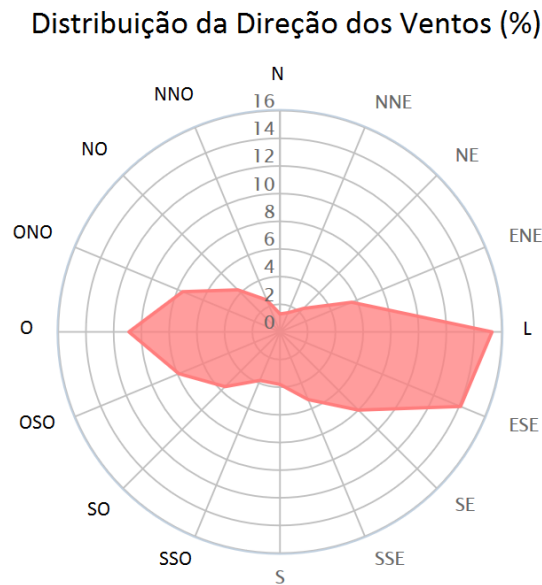


Figura 6 – Distribuição da direção dos ventos da cidade de Phoenix.
Fonte: Adaptado de Windfinder (2015).

A distribuição de ventos em Phoenix demonstra que as regiões da cidade que estão no eixo leste-oeste são as que mais sofrem influência da circulação atmosférica.

4.4 DESCRIÇÃO DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO

4.4.1 Alamo Lake

Alamo Lake é um parque estadual presente no estado do Arizona, encontra-se a aproximadamente 225 quilômetros a oeste-noroeste do centro de Phoenix e aproximadamente 65 quilômetros da cidade pequena (Blythe) mais próxima. O parque é um refúgio para diversas espécies de animais, plantas e peixes, por exemplo, raposas, coiotes, aves aquáticas, peixes como o *bluegill* e o *largemouth bass*, flores selvagens, etc. (ALAMO LAKE STATE PARK, 2015).

Além disso, o parque Alamo Lake atrai uma grande variedade de animais selvagens todo ano. O lago é o resultado de uma barragem construída para proteger o curso inferior do rio Colorado de inundações e, conseqüentemente, fornece armazenamento de água para as cidades ao redor. O lago é cercado por um terreno montanhoso com diversos arbustos e cactos nativos (ALAMO LAKE STATE PARK, 2015). A Figura 7 mostra o parque de Alamo Lake, e sua distância da estação de monitoramento de poluição do ar da região Central de Phoenix.

Alamo Lake tem uma estação de monitoramento de poluição do ar considerada limpa em comparação com as outras por estar numa região isolada. Portanto, essa estação servirá como base para as outras estações urbanas.



Figura 7 - Mapa da estação de monitoramento de poluição do ar Alamo Lake e uma foto do Parque.

Fonte: Mapa é de autoria própria e a foto do Arizona State Parks (2015).

4.4.2 JLG Supersite

A estação de monitoramento de poluição do ar JLG Supersite é operado pela Divisão de Qualidade do Ar do Departamento de Qualidade Ambiental do estado do Arizona, na região Central de Phoenix. O JLG Supersite é a estação de monitoramento mais importante do Estado do Arizona e uma das mais completas dos EUA, monitorando multi-poluentes como os gases tóxicos (COV e carbonílicos), poluentes critérios, materiais particulados, visibilidade e dados meteorológicos.

Nesta região da cidade existem poucas indústrias ou fábricas; a maioria das emissões de poluentes atmosféricos são da combustão veicular. Entretanto, por causa da circulação atmosférica algumas das concentrações de poluentes do ar na estação JLG Supersite pode ser atribuída à várias atividades poluidoras que ocorrem a quilômetros de distância. A Figura 8 mostra a estação JLG Supersite, e a Figura 9 mostra a localização da estação e sua área circundante.



Figura 8 - Estação de monitoramento de poluição do ar JLG Supersite.
Fonte: Autoria própria (2015).



Figura 9 - Mapa da estação JLG Supersite.
Fonte: Autoria própria (2015).

4.4.3 Buckeye

A estação de monitoramento do ar Buckeye está localizada a sudoeste no Departamento de Transportes do Condado de Maricopa e sua distância em relação ao Centro de Phoenix é de aproximadamente 80 quilômetros. Essa estação realiza medições de monóxido de carbono (CO), O₃, MP₁₀ e NO_x. Esta região é

essencialmente agrícola, mas com intenso desenvolvimento residencial e com diversas usinas termoeletricas localizadas a aproximadamente 25 quilômetros a oeste dessa estação de monitoramento (MARICOPA COUNTY, 2012). A Figura 10 mostra a localização da estação e sua área circundante.

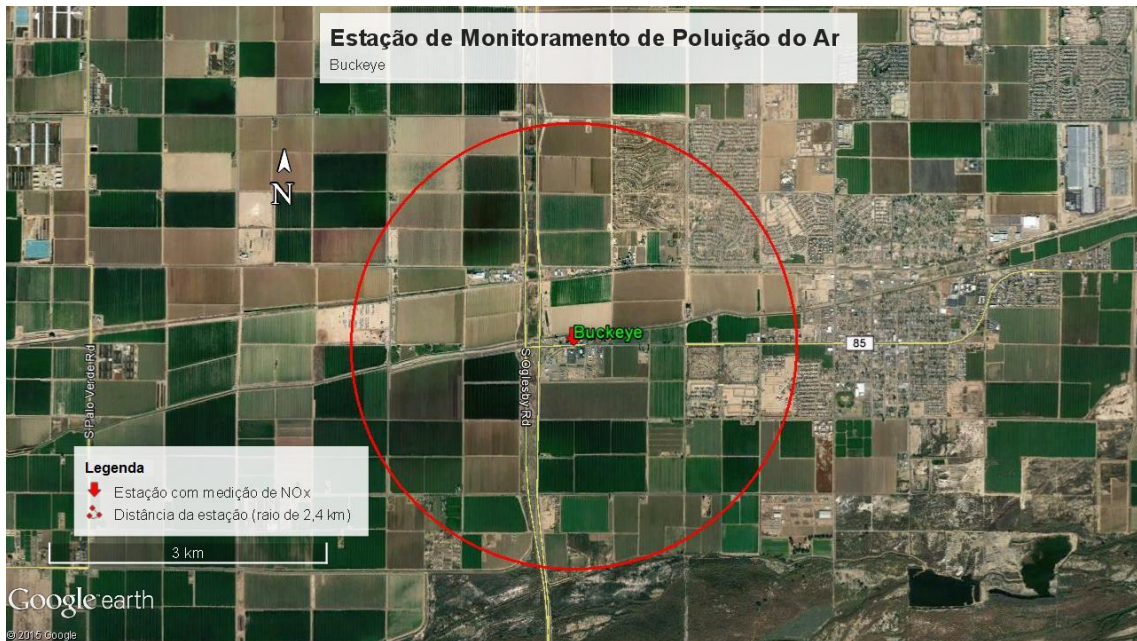


Figura 10 - Estação de monitoramento de poluição do ar Buckeye.
Fonte: Autoria própria (2015).

4.4.4 Central Phoenix

A região central da cidade de Phoenix apresenta uma densidade populacional superior a 1900 habitantes/km², por isso há uma elevada exposição da população para a poluição do ar. A estação de monitoramento de poluição do ar Central Phoenix está sendo operada por mais de 40 anos, fornecendo um banco de dados de longo prazo com medições de CO, O₃, MP₁₀, NO_x e SO₂ (MARICOPA, 2012).

Essa estação de monitoramento tem um histórico de altas [NO₂], principalmente por causa do intenso fluxo de veículos ao longo do dia e pelo grande número de indústrias nessa região. A Figura 11 mostra a localização da estação e sua área circundante.



Figura 11 - Estação de monitoramento de poluição do ar Central Phoenix.
Fonte: Autoria própria (2015).

4.4.5 Greenwood

A estação de monitoramento do ar Greenwood está localizada a sul da Rodovia Interestadual 10. A leste da estação está o cemitério Greenwood, e a oeste e sul residências. Além disso, a aproximadamente 1,6 km a leste da estação encontra-se a Rodovia Interestadual 17. A estação de Greenwood realiza medições de CO, MP₁₀, e NO_x. Na Figura 12 é possível visualizar as Rodovias Interestaduais 10 e 17, a localização da estação e sua área circundante.

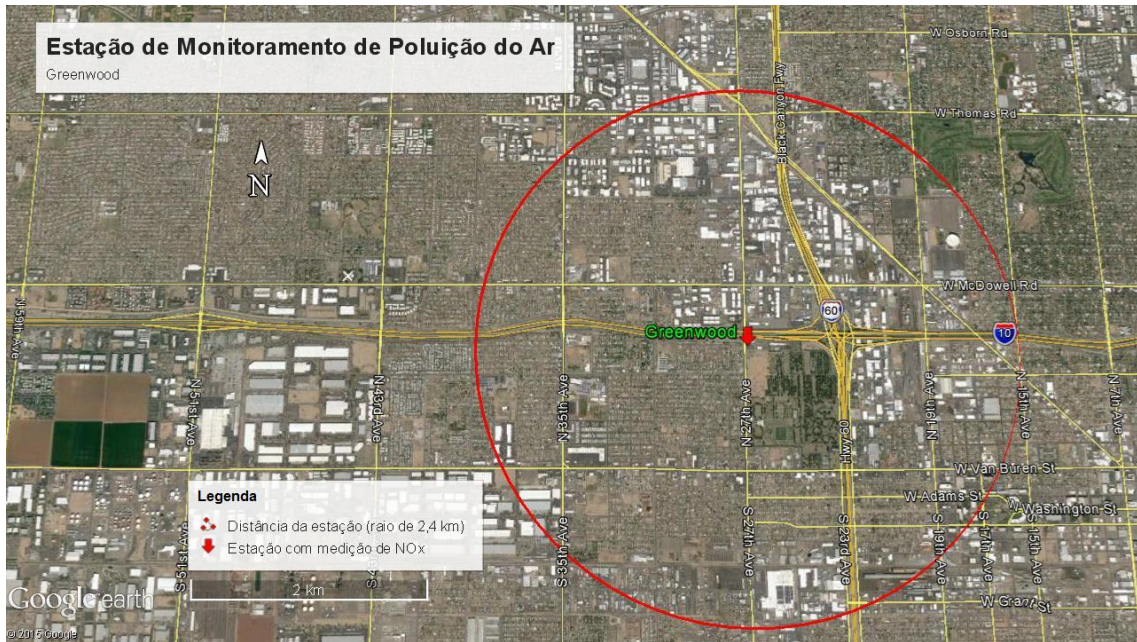


Figura 12 - Estação de monitoramento de poluição do ar Greenwood.
Fonte: Autoria própria (2015).

4.4.6 West Phoenix

Embora West Phoenix seja uma área residencial de alta densidade é também parte da região central, não estando muito distante de ambas as Rodovias Interestaduais 10 e 17, e do corredor industrial localizado na Avenida Grand (principal via de acesso sudoeste-noroeste que atravessa a cidade com uma ativa ferrovia paralela a estrada). Essa região específica atua como um receptor de poluentes, tais como emissões de CO de toda a área urbana. As concentrações de $MP_{2,5}$ nessa região estão entre as mais altas da área metropolitana, novamente uma consequência de ser uma área receptora de poluentes.

Ao contrário da estação Greenwood, essa estação fica bem próxima das principais estradas: 0,8 quilômetros ao norte da Thomas Road, 0,8 quilômetros a oeste da avenida 35 (uma das principais vias de acesso norte-sul), etc. Portanto, as concentrações de poluentes aqui tendem a vir do próprio bairro. Por esta razão, a população desta localidade é mais susceptível a uma exposição constante. A estação West Phoenix realiza medições de CO, O_3 , MP_{10} , $MP_{2,5}$ e NO_x . A estação de monitoramento de poluição do ar West Phoenix tem as concentrações mais elevadas



Figura 14 - Estação de monitoramento de poluição do ar Pinnacle Peak.
Fonte: Autoria própria (2015).

4.5 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO DE NO_x E O₃

As concentrações de NO_x e O₃ foram medidas com os equipamentos, respectivamente, EC 9841 (Ecotech, Austrália) e TELEDYNE 400E (EUA). Ambos os modelos são usados na estação de monitoramento do ar JLG Supersite. Os equipamentos ficam armazenados dentro de um contêiner com temperatura controlada variando entre 20°C até 30°C. As entradas para coleta do ar atmosférico ficam a uma altura entre 2 e 15 metros. A calibração dos equipamentos é realizada a cada 2 semanas, ambos os padrões das entradas de ar e da calibração são realizados através das normas americanas. A Figura 15 mostra o equipamento modelo EC 9841.



**Figura 15 - Equipamento modelo EC 9841 que mede NO_x.
Fonte: A autoria própria (2015).**

O equipamento EC 9841 utiliza o processo de quimiluminescência para detecção em fase gasosa das concentrações de NO, NO₂ e NO_x. Esse processo é baseado na luminescência da espécie ativa da molécula de NO₂ que é produzida pela reação entre NO e O₃ em uma câmara a vácuo. Entre outras palavras, a molécula de NO reage com o O₃ (gerado por descarga elétrica) para formar uma espécie ativa de NO₂, sendo que essa reação emite luz que é medida, gerando assim as concentrações de NO_x (ECOTECH, 2007).

Ressalta-se que o equipamento EC 9841 tem duas entradas distintas; a primeira é responsável pela conversão do NO₂ atmosférico em NO, e a segunda é a etapa de reação, na qual o NO atmosférico se junta com o NO convertido para a etapa de ozonização por descarga elétrica que irá gerar o O₃ necessário para a reação de quimiluminescência. Finalmente, a diferença entre as concentrações de NO_x e NO proporcionará a concentração de NO₂, por esse motivo o NO₂ é medido indiretamente (ECOTECH, 2007).

A Figura 16 mostra o equipamento TELEDYNE 400E. O modelo TELEDYNE 400E é um analisador de O₃ fotométrico que mede O₃ no ar ambiente através de um método baseado na lei de Beer-Lambert, que é uma relação empírica entre a absorção de luz e as propriedades do material através do qual viaja ao longo de uma determinada distância (TELEDYNE, 2011).

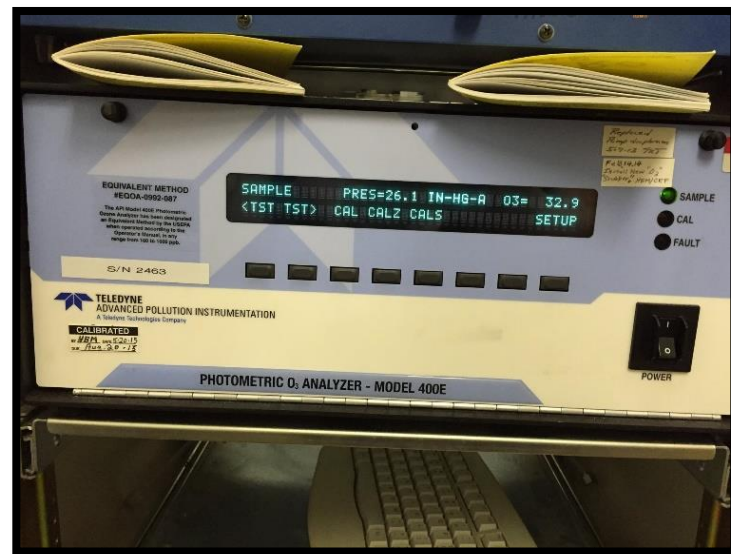


Figura 16 - Equipamento modelo TELEDYNE 400E que mede O₃.
Fonte: Autoria própria (2015).

A intensidade da radiação ultravioleta (254 nm) é medida depois de passar através de uma câmara, denominada célula de amostra, onde é absorvida na mesma proporção da quantidade de moléculas de ozônio presente. Além disso, o equipamento mede a temperatura e a pressão que se encontram na câmara. Finalmente, usando essas medições o equipamento calcula a quantidade de O₃ presente na amostra de gás pela equação de Beer-Lambert (Equação 6) (TELEDYNE, 2011).

$$I = I_0 * e^{-\alpha LC} \quad (6)$$

Onde:

I é a intensidade da luz transmitida pela amostra (candela (cd));

I_0 é a intensidade da luz (cd), se não houve absorção;

α é o coeficiente de absorção (L/cm⁻¹mol⁻¹), que mostra quão bem o O₃ absorve a radiação no comprimento de onda específico de interesse;

L é o comprimento da câmara de absorção (cm);

C é a concentração do gás absorvente (mol/L), nesse caso o O₃.

4.6 MODELO MOVES (*MOTOR VEHICLE EMISSIONS SIMULATOR*)

MOVES é um programa de computador projetado pela *Environmental Protection Agency* dos EUA (EPA) com a finalidade de estimar as emissões de poluentes do ar a partir de fontes móveis. A partir desse programa é possível estimar as emissões para todos os veículos rodoviários como carros, caminhões (diversos modelos e tamanhos), motocicletas e ônibus (EPA, 2012). Devem-se especificar algumas variáveis a fim de obter um resultado mais preciso no programa MOVES, como:

- Os modelos dos veículos com uma estimativa do ano de fabricação (carros mais antigos poluem mais que os novos);
- Tipo de combustível;
- Quantidade de veículos em uma específica localidade do país;
- Especificar horas, dias da semana, fim de semana e feriados;
- Tipo de estrada percorrida (ruas urbanas, rurais, rodovias, autoestradas, etc.);
- Distância média percorrida;
- Dados meteorológicos (temperatura e umidade proporcionam uma variação na emissão de poluentes de fontes móveis);
- Tempo de funcionamento dos veículos;
- Os tipos de poluentes que esses veículos estão emitindo (esse programa tem opção de escolha de 185 poluentes emitidos, podendo citar monóxido de carbono, metano e óxido de nitrogênio).

Existem diversas outras variáveis que tornam os resultados cada vez mais específicos, entretanto as citadas acima são as mais utilizadas e básicas para rodar o programa MOVES.

As estimativas de emissões do programa MOVES são baseadas na análise de milhões de resultados de testes de emissões e de avanços científicos e

tecnológicos na compreensão das emissões veiculares da EPA (EPA, 2012). O programa não só verifica as emissões proporcionadas pelos escapamentos dos veículos, mas também por evaporação e emissão de poluentes pelos freios e desgastes nos pneus (EPA, 2012). Pode-se estimar emissões para todos os tipos de veículos em qualquer parte do país, com exceção do estado da Califórnia porque usa seu próprio modelo de emissão veicular (EPA, 2012). Existem diversos modelos do programa MOVES, sendo a mais recente o programa MOVES2014. Para esse trabalho usou-se a versão MOVES2010b, o qual foi atualizada no ano de 2012, porque um dos organizadores desse projeto já havia iniciado um outro trabalho com essa mesma versão do programa e não há variação nos resultados finais de emissão veicular entre essas duas versões.

Os tipos de veículos selecionados estão separados em dois grupos: o primeiro são os veículos a gasolina, que consistem em veículos como motocicletas, carros e caminhões de pequeno porte; o segundo grupo são de veículos a diesel, como caminhões comerciais, ônibus e caminhões de grande porte. Apenas os dados de emissões de NO_x dos veículos foram estipulados pelo modelo MOVES. Consideraram-se os parâmetros: idade dos veículos, a média anual da temperatura ambiente nacional (aproximadamente 24°C) e a velocidade média de tráfego (aproximadamente 45 Km/h). Portanto, as taxas de emissões não representam valores específicos para o Condado de Maricopa, mas sim para o país (EUA).

4.7 CÁLCULO DAS EMISSÕES EM MASSA DE NO_x

As cartas do volume de tráfego foram retiradas da página online do condado de Maricopa, *Maricopa Association of Governments*, disponível para os anos de 1990, 1998, 2003, 2007 e 2011.

Selecionaram-se todas as principais ruas, avenidas e rodovias dentro de um raio de 2,4 quilômetros das estações de monitoramento do ar, ressalta-se que também foram incluídas algumas ruas, avenidas ou rodovias que possuíam um intenso fluxo de veículos, mesmo fora do raio de 2,4 quilômetros. A Tabela 2 mostra todas essas principais ruas, avenidas e rodovias para as suas respectivas estações de monitoramento do ar.

Tabela 2 - As principais ruas, avenidas e rodovias dentro de um raio de 2,4 quilômetros das estações de monitoramento do ar (ruas, avenidas ou rodovias com intenso fluxo de veículos, mesmo fora do raio de 2,4 quilômetros, foram incluídas)

Buckeye		Greenwood		West Phoenix		JLG Supersite		Central Phoenix	
Principais Vias de Acesso	Distância (km)	Principais Vias de Acesso	Distância (km)	Principais Vias de Acesso	Distância (km)	Principais Vias de Acesso	Distância (km)	Principais Vias de Acesso	Distância (km)
Mc 85	0,016	N 27th Ave	0,016	W Thomas Rd	0,4	N 19th Ave	0,384	E Roosevelt St	0,08
Rd 85	0,4	Fwy 10	0,112	N 35th Ave	0,768	N 15th Ave	0,416	N 16th St	0,144
W Basiline Rd	0,832	W Mc Dowell Rd	0,544	N 43rd Ave	0,832	W Camelback Rd	0,608	Fwy 10	0,432
S Rooks Rd	1,16	Fwy 17	0,88	W Indian School Rd	1,2	W Indian School Rd	0,992	E Van Buren St	0,72
-	-	W Van Buren St	1,12	Grand Ave	1,872	N 7th Ave	1,232	Sr 51 Fwy	0,832
-	-	N 35th Ave	1,6	MC Dowell	1,968	Fwy 17	1,6	E Mc Dowell Rd	0,864
-	-	N 19th Ave	1,6	Fwy 10	2,464	N Central Ave	2,032	E Washington St	1056
-	-	-	-	Fwy 17	2,72	-	-	E Jefferson St	1168
-	-	-	-	-	-	-	-	N 11th St	1,2
-	-	-	-	-	-	-	-	N 24th St	1,472
-	-	-	-	-	-	-	-	N 7th St	1,776
-	-	-	-	-	-	-	-	N Central Ave	2,576

Fonte: Autoria própria (2015).

Apenas no ano de 2011 obteve-se acesso à dados mais detalhados dos tipos de veículos que circulam em cada região do Condado, portanto usou a mesma porcentagem desses tipos de veículos de 2011 para calcular nos anos de 1990, 1998, 2003 e 2007, para uma melhor estimativa das emissões em massa de NO_x.

As taxas de emissões em massa de NO_x de cada veículo (taxa de emissão de escapamentos = gramas/milhas) ao longo dos anos foi multiplicada pelas suas respectivas quantidades de volume de tráfego, para cada rua, avenida e rodovia a aproximadamente 2,4 quilômetros de distância de cada estação de monitoramento. Considerou-se que cada veículo percorra aproximadamente 2,4 quilômetros perto de cada estação. A equação 7 mostra como foram calculadas as emissões em massa de NO_x.

$$Em = Txv * Dr * Vt \quad (7)$$

Onde:

Em é a emissões em massa (g/dia);

Txv é a taxa de emissão veicular (g/km);

Dr é os quilômetros dirigidos (km);

Vt é volume de tráfego (total de carros/dia de semana).

Algumas ruas e avenidas não apresentavam dados de tráfego para um ou mais anos, então calcularam-se esses valores através de interpolação para que a rua ou avenida não fosse excluída (no entanto, excluíram-se ruas ou avenidas com mais de três anos de dados em branco). Os resultados finais foram normalizados para uma melhor visualização.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EMISSÕES DE ÓXIDO DE NITROGÊNIO - CONDADO DE MARICOPA

A cidade de Phoenix é a capital do estado do Arizona e faz parte do Condado de Maricopa. A Figura 17 mostra a localização da cidade de Phoenix e as delimitações do Condado de Maricopa, mostrando ainda as emissões de óxido de nitrogênio nessa região do estado e as fontes responsáveis por tais emissões.

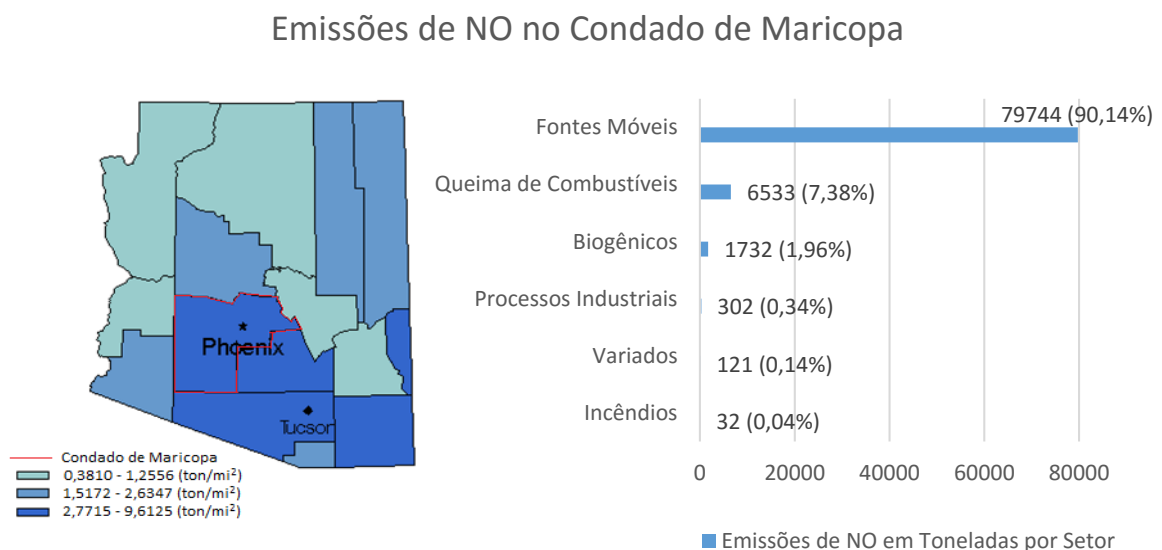


Figura 17 - Emissões de óxido de nitrogênio no ano de 2011 no Condado de Maricopa.
 Fonte: Adaptado de *Environmental Protection Agency* (2015).

Observou-se na Figura 17 que o Condado de Maricopa produz grandes quantidades de emissões de óxido de nitrogênio. Além disso, a grande maioria dessas emissões é devido à queima de combustíveis fósseis, pois 97,52% das emissões de óxido de nitrogênio são de fontes móveis (90,14%) e da queima de combustíveis (7,38%). As fontes móveis consistem em ambas emissões rodoviárias e não-rodoviárias, sendo que as emissões rodoviárias correspondem as emitidas pelo tráfego de veículos em estradas, por outro lado as emissões não-rodoviárias

englobam diversas outras fontes como os veículos de construção, movimentação de terra e equipamentos pesados movidos a diesel, equipamentos mecânicos de jardinagem e ferrovias. As fontes biogênicas são o terceiro setor que mais contribuem para as emissões de óxido de nitrogênio, contudo correspondem a 1,96% do total das emissões.

5.2 NORMAS DA AGÊNCIA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL NORTE-AMERICANA (EPA)

A Figura 18 mostra as concentrações de NO₂ e os valores estão expressos em médias anuais, sendo que a norma da EPA é de 53 ppb. Portanto, a Figura 18 fornece uma análise mais detalhada das concentrações do dióxido de nitrogênio em seis estações de monitoramento do ar ao redor do Condado de Maricopa nas últimas décadas.

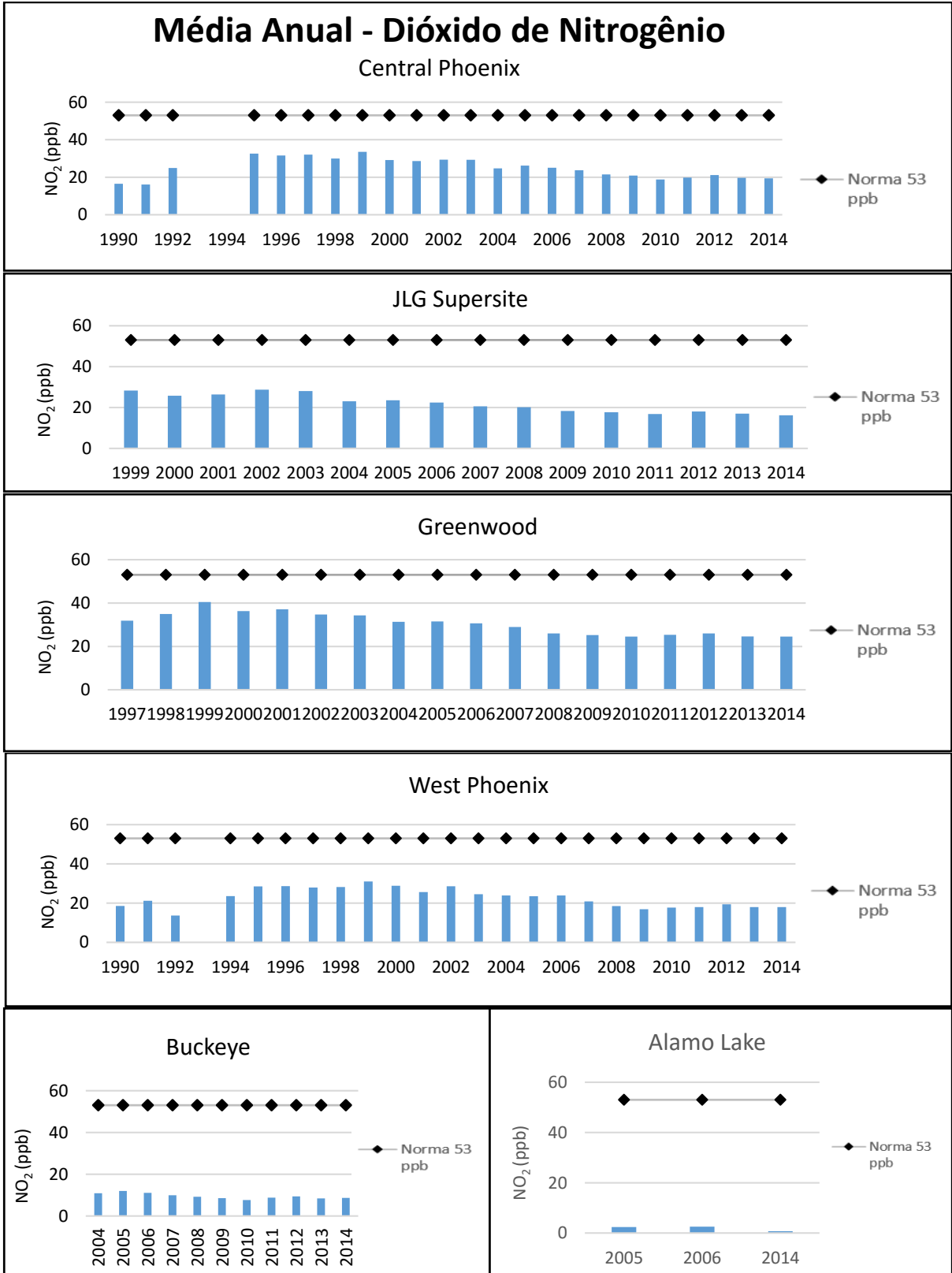


Figura 18 - Concentrações de NO₂ (ppb) expressos em médias anuais ao longo dos anos em seis estações de monitoramento do ar no Condado de Maricopa.
Fonte: Autoria própria (2015).

Primeiramente, observou-se na Figura 18 as [NO₂] da estação de monitoramento Alamo Lake, porque é um lugar longe de outras cidades e pode ser considerada "limpa". Por esse motivo, as concentrações de poluentes são bem baixas neste local, o que permite a sua comparação com as outras cinco estações urbanas de monitoramento do ar (Central Phoenix, JLG Supersite, Greenwood, West Phoenix e Buckeye).

A norma da EPA é de 53 partes por bilhão (ppb) para a média anual de dióxido de nitrogênio para todas as estações de monitoramento (Figura 18), pode-se notar que os valores estão muito abaixo em comparação à norma. Buckeye é a estação de monitoramento urbana com as concentrações para este poluente próximas de 10 ppb, sendo sua localização o fator determinante, pois é mais distante do núcleo urbano mais congestionado e também por causa da economia desta região que é baseada principalmente na agricultura. As estações de monitoramento JLG Supersite, localizada no Centro da cidade de Phoenix, e West Phoenix estão localizadas em áreas residenciais e sem muito tráfego intenso ou congestionamentos, usinas de produção de energia ou indústrias próximas à essas duas estações, o que explica as [NO₂] não serem tão elevadas ao longo dos anos. A estação de monitoramento Greenwood está localizada próxima à duas rodovias Interestaduais que possuem tráfego intenso, principalmente nas horas de pico, resultando em valores mais altos nas [NO₂]. A estação de monitoramento Central Phoenix tem valores semelhantes às estações Oeste Phoenix e JLG SuperSite porque as emissões de origem móveis são os maiores contribuintes para a formação de NO₂.

Em 2010, a fim de proporcionar mais proteção para a população, a EPA estabeleceu uma nova norma de concentrações máximas de dióxido de nitrogênio a um nível de 100 ppb para cada hora do dia. Essa nova norma é baseada no 98º percentil da distribuição horária para cada dia do ano, fazendo uma média anual dessas concentrações horárias máximas, sendo ainda realizada a média ao longo dos 3 últimos anos para complementar a norma anterior. A Figura 19 mostra as concentrações de dióxido de nitrogênio considerando a nova norma da EPA.

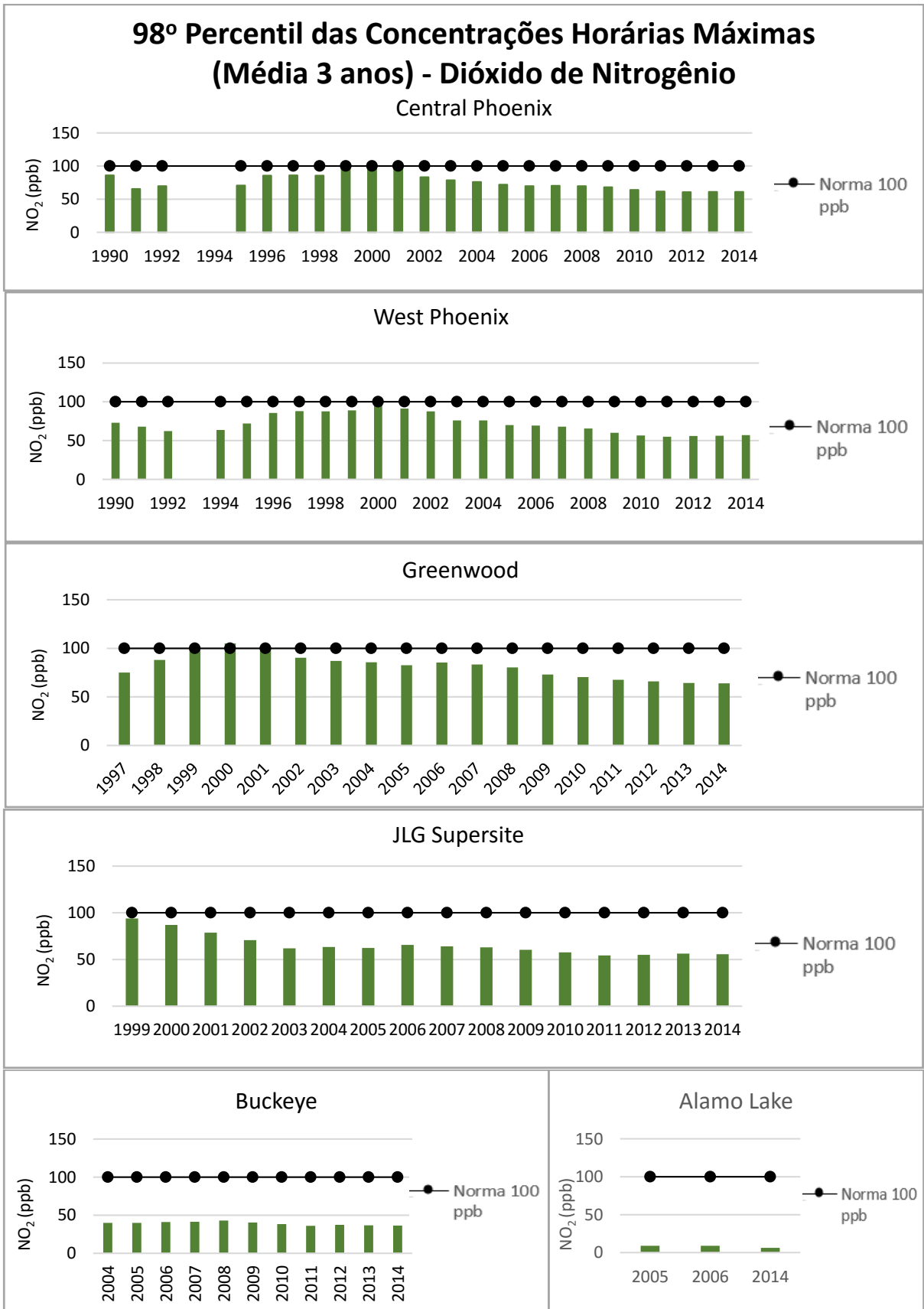


Figura 19 - Concentrações de NO₂ (ppb) expresso como 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias, média ao longo de 3 anos, em seis estações de monitoramento do ar no Condado de Maricopa. Fonte: Autoria própria (2015).

Os valores das [NO₂] horárias aumentaram na Figura 19 em comparação com as concentrações anuais da Figura 18. Isso ocorre porque a média anual consiste em uma média de todas as horas e dias do ano; de modo que o valor máximo de hora em hora para o ano é obrigado a ser consideravelmente mais elevada do que a média anual. Por essa razão, a Figura 19, o qual está baseado na distribuição horária das concentrações máximas diárias, tem as concentrações mais elevadas ao longo do ano. Definitivamente, essa nova norma se tornou mais rigorosa em comparação com a norma anterior. De uma maneira geral, o Condado de Maricopa não ultrapassa nenhum dos valores exigidos pela norma Norte-Americana, considerando que essa última entrou em vigor no ano de 2010. Por outro lado, antes do ano de 2010 algumas estações de monitoramento excederam o valor da nova norma (Figura 19) como West Phoenix (2000), Greenwood (2000 e 2001) e Central Phoenix (2000 e 2001), talvez por causa da recuperação da economia Norte-Americana devido à recessão sofrida neste mesmo ano.

Algumas medidas para controlar as concentrações de NO_x começaram no início dos anos 1970. Como exigências para que os fabricantes de veículos reduzissem as emissões de NO em carros e caminhões, as petroquímicas deveriam fornecer gasolinas reformuladas para um motor de queima mais limpa e as termoelétricas deveriam buscar novas tecnologias para reduzir as emissões de NO_x. Ainda, cada estado seria responsável por reduzir as emissões de NO_x e aqueles que fossem responsáveis pela poluição em estados vizinhos teriam que ajudá-los a atingir suas metas. Esses são alguns exemplos tomadas para reduzir as concentrações de NO_x, seus benefícios continuaram a surtir efeito até os dias atuais por causa da contínua pressão e exigências sobre essas indústrias, fábricas, termoelétricas e diversos outros grandes poluidores, principalmente porque as normas ambientais Norte-Americanas tendem a ficar cada vez mais rigorosas ao longo dos anos.

5.3 TENDÊNCIAS DE NO₂ E NO

As Figuras 20 e 21, respectivamente, fornecem uma análise mais detalhada das concentrações do dióxido de nitrogênio e óxido de nitrogênio nas mesmas seis estações de monitoramento do ar ao redor do Condado de Maricopa nas últimas

décadas. A Figura 20 mostra os valores das concentrações do dióxido de nitrogênio, expressos em média das concentrações horárias máximas. A Figura 21 mostra as concentrações de óxido de nitrogênio, expressos em médias anuais. Ambas as concentrações das Figuras 20 e 21 refletem nos valores das concentrações de NO_2 que a norma exige, sendo que a Figura 20 apresenta os valores diretos de NO_2 , ou seja, sem o 98º percentil das concentrações horárias máximas e a média dos 3 anos. Pela Figura 21, notam-se mais facilmente as regiões mais poluidoras da cidade porque o NO é precursor do NO_2 , que pode ser carregado pelo vento. Portanto, regiões mais poluidoras possuem elevadas concentrações de NO .

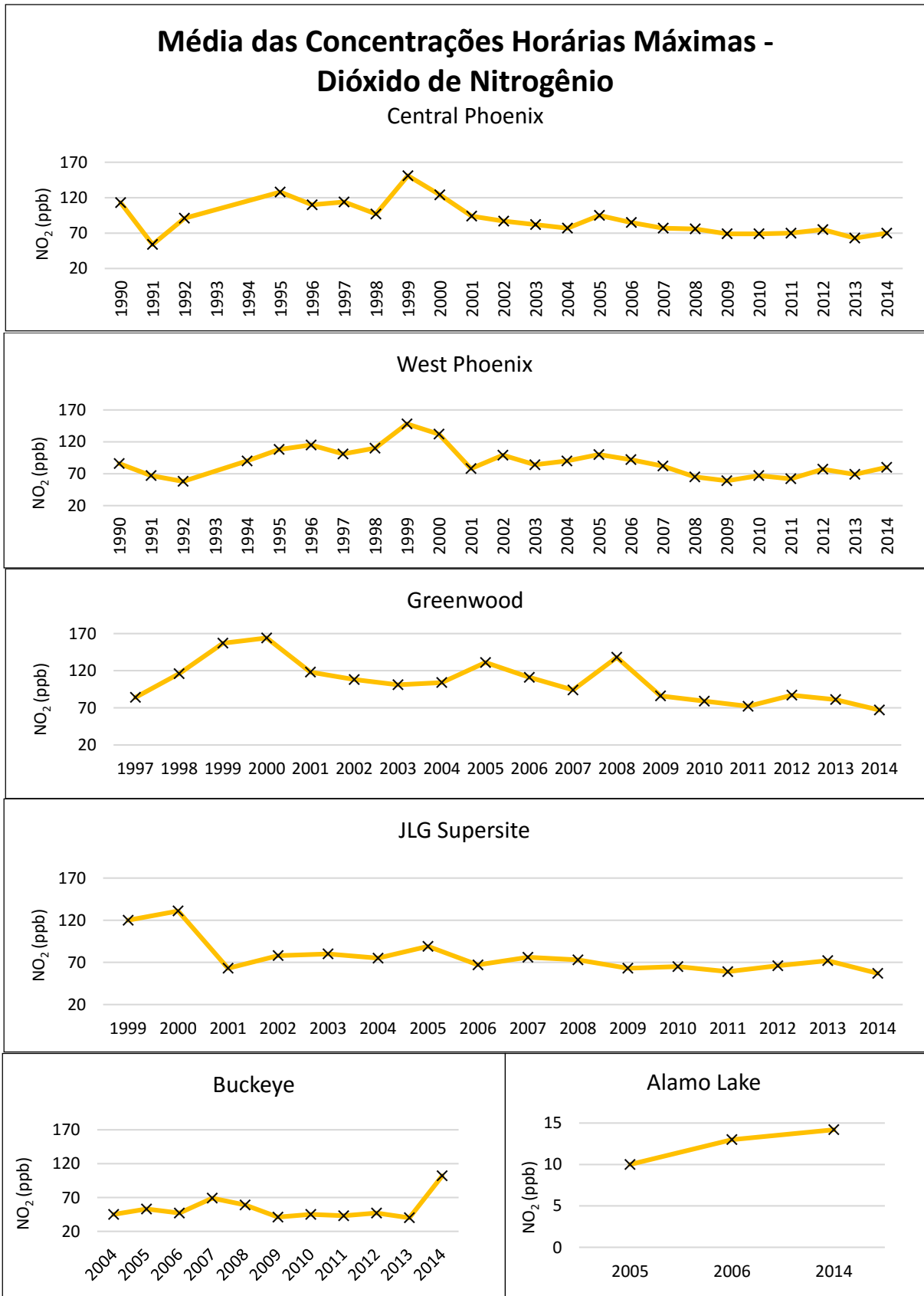


Figura 20 - Concentrações de NO₂ (ppb) expresso em média das concentrações máximas horárias ao longo dos anos em seis estações de monitoramento do ar no Condado de Maricopa. Fonte: Autoria própria (2015).

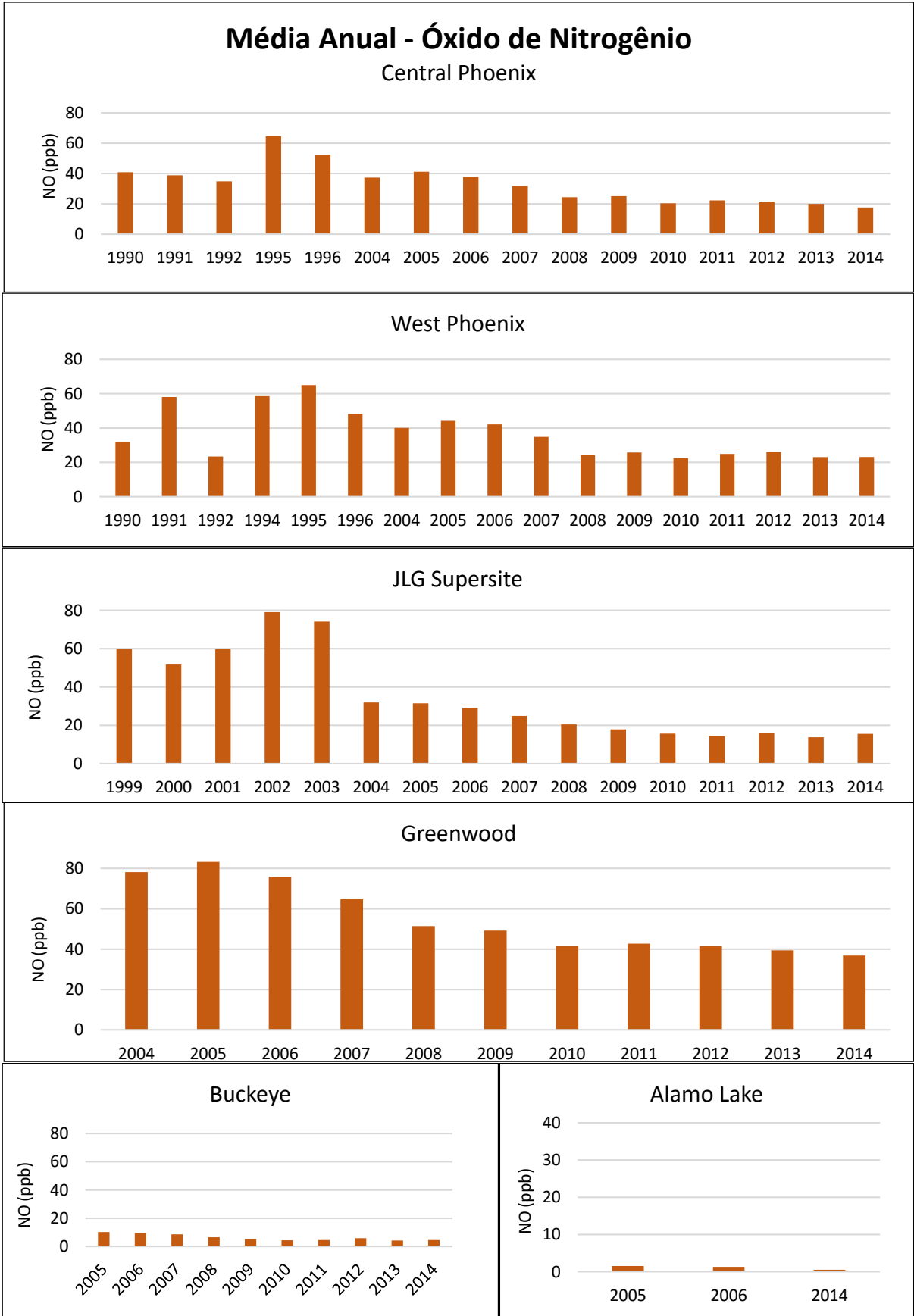


Figura 21 - Concentrações de NO (ppb) expresso em médias anuais ao longo dos anos em seis estações de monitoramento do ar no Condado de Maricopa. Fonte: Autoria própria (2015).

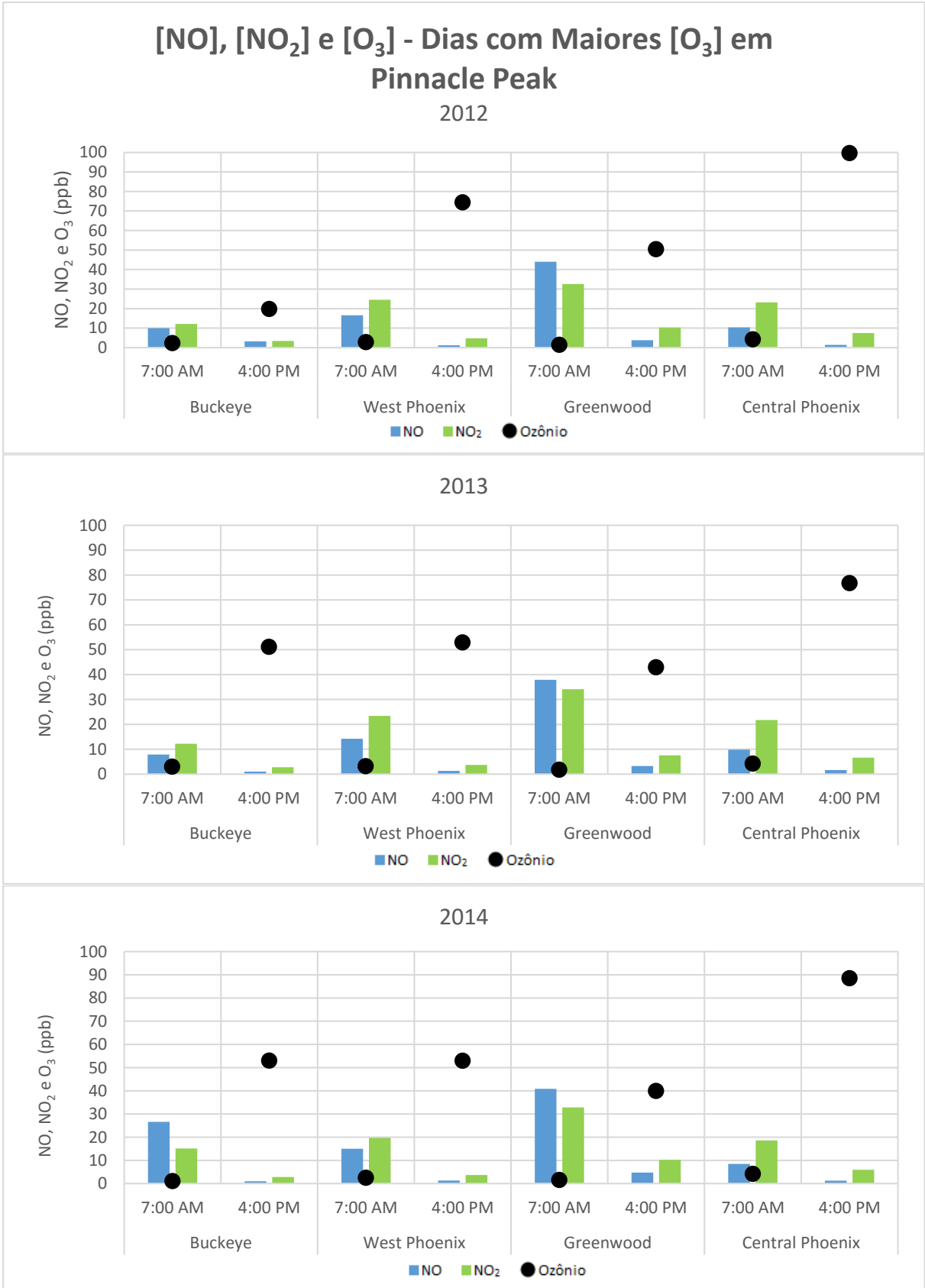
Observou-se na Figura 20 que as concentrações mais elevadas de dióxido de nitrogênio acontecem por volta do ano 2000. O aumento do número de veículos a combustão neste período pode ser o fator responsável por esses picos nessas estações. A quantidade de veículos e conseqüentemente os intensos tráfegos aumentaram de forma acentuada nas últimas décadas, mas após o período do ano 2000 e com mais preocupações com as questões ambientais, motores mais eficientes e equipamentos de controle de poluição mais sofisticados foram desenvolvidos, fato esse que pode ser observado pelo decréscimo das concentrações após esse ano.

Os picos em Buckeye (Figura 20) principalmente no ano de 2014 refletem que o Condado de Maricopa está sempre expandindo e como as áreas centrais estão quase saturadas não há tanto aumento nas concentrações de poluentes, por outro lado o desenvolvimento das regiões periféricas é sempre crescente, conseqüentemente existe um aumento nas emissões de poluentes. Em geral, áreas urbanas como Oeste Phoenix, JLG Supersite e Central Phoenix têm a tendência de que as concentrações de dióxido de nitrogênio diminuam nos próximos anos porque há pouca expansão nessas regiões e as rodovias já estão saturadas pelo típico volume de tráfego na hora de maior pico, sendo inviável financeiramente a construção de faixas adicionais de autoestradas ou ruas principais.

Os valores das concentrações nas Figuras 18 e 21 tendem a ter o mesmo comportamento porque ambos têm o mesmo parâmetro de medição, médias anuais, e o NO_2 é formado rapidamente na atmosfera pelo NO . Os picos e vales tendem a ocorrer nos mesmos anos, mas não com a mesma intensidade, por exemplo, há um pico em 2002/2003 na estação JLG Supersite tanto para as $[\text{NO}_2]$ (Figura 18) como $[\text{NO}]$ (Figura 21). Com as $[\text{NO}]$ pode-se ver o efeito de distância: As $[\text{NO}]$ na estação Greenwood são muito mais elevadas do que em outras estações de monitoramento urbanas, como seria de se esperar para um poluente primário como esse. Por outro lado, as $[\text{NO}_2]$ em Greenwood não são tão mais elevadas do que qualquer outra estação, tanto em Oeste Phoenix, Central Phoenix ou JLG Supersite. Este padrão sugere que as $[\text{NO}_2]$ estão distribuídas homogêneas na região urbana central, pois a maioria das $[\text{NO}_2]$ são secundárias.

5.4 CÁLCULOS DO OZÔNIO

O ozônio foi calculado para estimar seu comportamento em dois períodos distintos do dia (7h e 16h) e a diferença entre suas concentrações no inverno e no verão, respectivamente, períodos com menores e maiores concentrações de O_3 . Portanto, as Figuras 22 e 23, respectivamente, mostram as medidas $[NO]$ e $[NO_2]$ e as calculadas $[O_3]$ para os 20 dias com maiores e menores $[O_3]$ usando como referência a estação de monitoramento Pinnacle Peak.



**Figura 22 – Concentrações medidas de NO e NO₂, e calculadas de O₃ (ppb) em dois períodos do dia, 7h e 16h, em três diferentes anos, 2012, 2013 e 2014 para as estações de monitoramento Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix. Usou-se como base a estação Pinnacle Peak para selecionar os 20 dias com maiores concentrações de O₃.
Fonte: Autoria própria (2015).**

Analisando a Figura 22 é possível ver que, em geral, todas as concentrações de poluentes diminuíram ao longo desses três anos (2012, 2013 e 2014), em consequência, principalmente das taxas de emissão mais baixas dos veículos, combustíveis mais limpos e da descentralização urbana.

Existem três exceções, todas em 2014 (Figura 22), sendo a primeira na estação Buckeye, pois as concentrações de NO aumentaram, talvez por causa da expansão da cidade nesta região, resultando em mais NO₂ e formação de O₃. Em segundo lugar, a estação Greenwood tinha marcado que as concentrações de NO tiveram uma diminuição em 2013, mas aumentaram em 2014. Essa parte da cidade tem altas concentrações de NO por causa das Interestaduais e ruas arteriais, ambas com fluxo intenso de veículos ao longo do dia, e apesar dos carros estarem cada vez mais eficientes e menos poluentes não foram suficientes para compensar a crescente frota de veículos que o Condado de Maricopa apresenta. Em terceiro lugar, a formação de O₃ na estação Central Phoenix diminuiu em 2013, mas voltou a aumentar em 2014. No entanto, as [NO] diminuíram nesta parte da cidade em 2014, de modo que este aumento nas concentrações de O₃ pode ser resultado do aumento das concentrações de NO que ocorreram em Greenwood (transporte de poluentes pelo vento). A estação Central Phoenix tem concentrações de NO mais baixas se comparadas com outras estações, mas também tem as mais altas concentrações de O₃ por causa do transporte de poluentes, especialmente NO₂ (NO rapidamente oxida na atmosfera).



Figura 23 - Concentrações medidas de NO e NO₂, e calculadas de O₃ (ppb) em dois períodos do dia, 7h e 16h, em três diferentes anos, 2012, 2013 e 2014 para as estações de monitoramento Buckeye, West Phoenix, Greenwood e Central Phoenix. Usou-se como base a estação Pinnacle Peak para selecionar os 20 dias com menores concentrações de O₃. Fonte: Autoria própria (2015).

As concentrações de NO são muito mais elevadas na Figura 23 do que na Figura 22. Os dias com menores $[O_3]$ são dias de inverno, e com maiores $[O_3]$ são dias de verão, então as $[NO]$ são mais elevadas no inverno por causa da fraca dispersão de poluentes e da inversão de temperatura na superfície ser mais duradoura. Além disso, a formação de NO_2 é praticamente a mesma e, por vezes maiores nos dias com menores $[O_3]$ do que nos dias com maiores concentrações, devido à maior $[NO]$ no inverno.

As concentrações de O_3 são muito menores na Figura 23, o qual é esperado por causa dos baixos índices de radiação solar e temperatura neste período do ano. Na estação Buckeye, as calculadas $[O_3]$ para o verão são de duas vezes até duas vezes e meia as concentrações do inverno; enquanto que para a estação Central Phoenix, as $[O_3]$ no verão são de quatro a cinco vezes as concentrações de inverno. Observa-se que os valores das $[O_3]$ no inverno são bem parecidos para essas duas estações (Buckeye: 10 - 22 ppb; Central Phoenix: 18-20 ppb). A equação do estado foto-estacionário (Equação 5) prevê corretamente as baixas $[O_3]$ para o inverno em ambas os locais, porque compararam-se esses valores com os medidos diariamente em algumas das estações de monitoramento. Ainda considerando as $[O_3]$, têm-se valores muito mais elevados no verão na estação Central Phoenix do que em Buckeye (Buckeye: 10 - 52 ppb; Phoenix Central: 78 - 100 ppb), o qual também está correto. As $[O_3]$ na estação Central Phoenix devem e são mais elevadas do que aquelas em Buckeye; no inverno, as $[O_3]$ em ambos os locais diminuem para níveis comparativamente baixos.

De um modo geral, durante os dias de verão (Figura 22) as $[NO_2]$ superam as de $[NO]$ na atmosfera durante as horas analisadas. Por outro lado, no inverno (Figura 23) as $[NO]$ são mais elevadas durante o dia e mais baixas durante a tarde em comparação com as $[NO_2]$. Esses padrões ocorrem porque nas primeiras horas do dia a temperatura é mais baixa resultando numa menor oxidação do NO.

5.5 TRÁFEGO DE VEÍCULOS E EMISSÕES EM MASSA DO NO_x

A Tabela 3 apresenta a média diária para os dias da semana de volume de tráfego nas principais ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento

do ar Buckeye. Os valores demonstrados referem-se a veículos em geral, como carros, ônibus e caminhões. Foram selecionadas as principais ruas, avenidas e rodovias de acordo com a distância da estação. Por causa do intenso volume de tráfego durante a semana, essas vias de acesso são imensas fontes de poluentes como o NO_x. Todas as principais ruas e avenidas dentro de um raio de aproximadamente 2,4 quilômetros da estação Buckeye foram selecionadas e estão representadas na Figura 10.

Tabela 3 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas e avenidas próximas a estação de monitoramento Buckeye

Buckeye - Média Anual do Volume de Tráfego para os Dias da Semana						
Principais Ruas/Estradas	Distância (Km)*	1990	1998	2003	2007	2011
Mc 85	0,016	X	3000	x	3000	5045
Rd 85	0,4	X	x	11000	17000	15100
W Basiline Rd	0,83	X	x	8000	x	x
S Rooks Rd	1,16	X	x	x	x	1511

* Distância da estação de monitoramento do ar Buckeye

Fonte: A autoria própria (2015).

Buckeye é uma área recentemente urbanizada e, por esse motivo, a Tabela 3 possui muitos dados de tráfego ausentes. Com o passar dos anos, as ruas e avenidas que possuíam pouco movimento ao longo do dia começaram a receber um número considerável de veículos. Infelizmente, as estimativas de emissões em massa de NO_x para a região de Buckeye não foram possíveis de serem calculadas devido à falta de dados.

A Tabela 4 apresenta a média diária para os dias da semana do volume de tráfego na região da estação de monitoramento West Phoenix, considerando todas as principais ruas e avenidas dentro de um raio de aproximadamente 2,4 quilômetros dessa estação (Figura 13). Analisando a Tabela 4 é possível de visualizar o tráfego veicular excepcionalmente elevado nas Rodovias Interestaduais 10 e 17, o qual representa uma importante fonte de emissões de poluentes. A distância da estação de monitoramento é importante de se considerar porque os poluentes que estão no ar começam a dissipar com a distância e são transportados pelo vento. Por esta razão, as ruas, avenidas e estradas que estão mais próximas da estação de monitoramento podem contribuir mais para concentrações de NO₂ do que as grandes rodovias.

Tabela 4 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento West Phoenix

West Phoenix - Média Anual do Volume de Tráfego para os Dias da Semana						
Principais Ruas/Estradas	Distância (Km)*	1990	1998	2003	2007	2011
W Thomas Rd	0,4	31000	28000	33000	37000	29300
N 35th Ave	0,768	37000	28000	29000	31000	26100
N 43rd Ave	0,832	32000	35000	36000	43000	36100
W Indian School Rd	1,2	50000	45000	50000	34000	40900
Grand Ave	1,872	36000	35000	29000	30000	39300
MC Dowell	1,968	27000	28000	27000	32000	23300
Fwy 10	2,464	98000	184000	226000	239000	252000
Fwy 17	2,72	154000	200000	135000	209000	206000

* Distância da estação de monitoramento do ar West Phoenix.

Fonte: Autoria própria (2015).

O volume médio anual de tráfego veicular durante os dias da semana diminuiu em alguns anos (Tabela 4), principalmente em ruas residenciais em 2011 (Interestaduais são uma exceção porque elas conectam vários locais da cidade que estão sempre em expansão).

A descentralização das áreas urbanas tem ocorrido com bastante frequência nos últimos anos nas grandes cidades ao redor do mundo. A região de West Phoenix sempre teve uma elevada densidade urbana e é basicamente localizada próximo a região Central de Phoenix que possui intenso tráfego, elevadas concentrações de poluentes, áreas saturadas para construções e barulho. No entanto, hoje em dia a população procura locais para viver com uma melhor qualidade de vida, lugares calmos e tranquilos, onde, por exemplo, as crianças podem brincar ou passear na rua com mais segurança e de preferência longe dos grandes centros urbanos. Os governos locais são também responsáveis por essa descentralização porque criam incentivos fiscais às indústrias ou empresas para se instalarem em locais distantes dos centros urbanos, fazendo com que outras áreas da cidade desenvolvam, conseqüentemente reduzindo as emissões de poluentes nos centros urbanos.

A Figura 24 mostra as emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_x(inicial) é igual a 1,32 ton/dia da semana, e também mostra as concentrações de NO₂, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação West Phoenix.

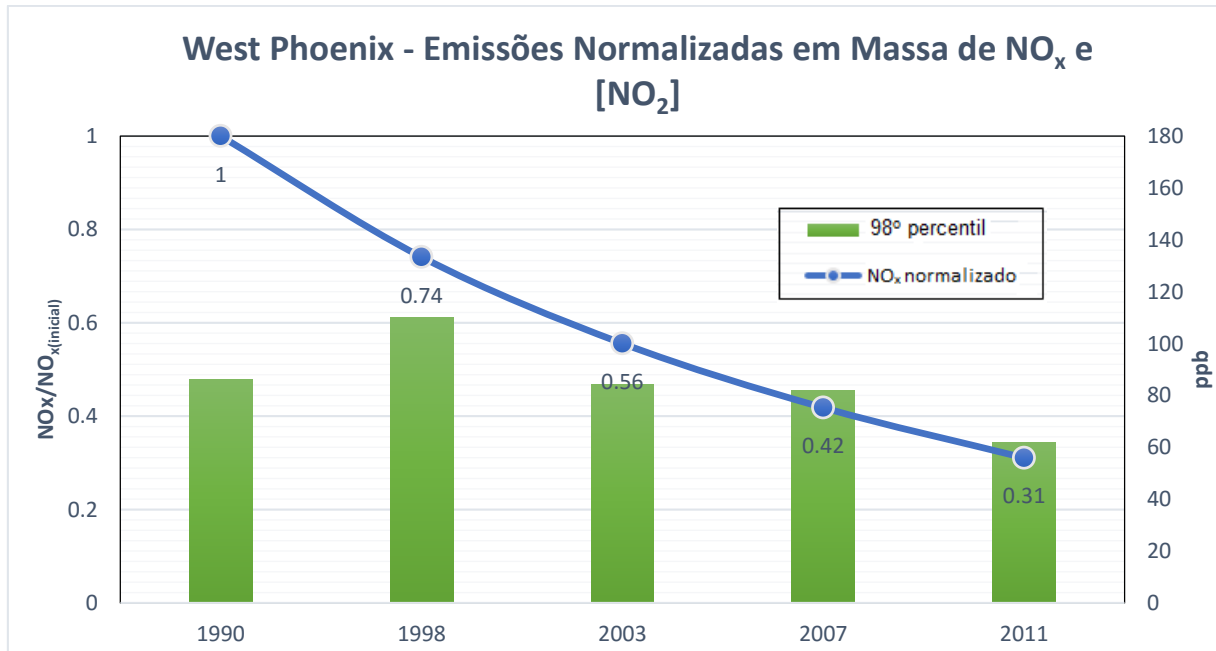


Figura 24 - Emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_x(inicial) é igual a 1,32 ton/dia de semana, e as concentrações de NO₂, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação West Phoenix. Fonte: Autoria própria (2015).

Comparando a Tabela 4 com a Figura 24, as emissões em massa de NO_x (ton/dia de semana) estão sempre diminuindo ao longo dos anos, mesmo que o volume de tráfego esteja aumentando intensamente. Isso acontece porque hoje em dia os veículos são muito mais eficientes do que em 1990, por exemplo, os motores necessitam de menos combustível para rodar um quilômetro, os combustíveis são modificados para emitirem menos poluentes, os equipamentos de controle de poluição são mais eficientes, e as empresas, indústrias e fábricas para reduzirem as emissões de NO_x precisam instalar equipamentos de controle da poluição do ar, como equipamentos de redução catalítica seletiva.

No entanto, com a nova norma vigente (98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias, média ao longo de 3 anos) e analisando a Figura 24, as concentrações de NO₂ não diminuem em sintonia com a diminuição das emissões em massa de NO_x. Isso acontece porque a nova norma usa como referência as concentrações máximas diárias para cada hora, mostrando que medidas adicionais também devem ser tomadas para reduzir as concentrações de NO₂ na atmosfera, como a descentralização de áreas urbanas para evitar uma grande quantidade de emissões centralizadas, controle de poluentes provenientes de outras regiões da

cidade ou até mesmo de estados vizinhos e a proibição das emissões industriais durante os horários de pico da manhã e tarde.

Tudo o que foi discutido para West Phoenix vale para as Tabelas 5, 6 e 7, e as Figuras 25, 26 e 27, porque todas essas estações de monitoramento estão no núcleo urbano próximos à região Central de Phoenix. A Tabela 5 apresenta a média diária para os dias da semana do volume de tráfego na região da estação de monitoramento JLG Supersite. Observando a Figura 9 é possível visualizar todas as principais ruas, avenidas e rodovias selecionadas dentro de um raio de aproximadamente 2,4 quilômetros da estação JLG Supersite. Na Tabela 5, a principal rua mais próxima da estação é a avenida 19, sendo uma das ruas com o menor índice de tráfego de veículos, em contraste, a Rodovia Interestadual 17 possui o maior índice de tráfego, mas fica localizada a aproximadamente 2,4 quilômetros da estação de monitoramento JLG Supersite.

Tabela 5 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento JLG Supersite

JLG Supersite - Média Anual do Volume de Tráfego para os Dias da Semana						
Principais Ruas/Estradas	Distância (Km)*	1990	1998	2003	2007	2011
N 19th Ave	0,384	29000	30000	21000	19000	22800
N 15th Ave	0,416	23000	x	x	24000	x
W Camelback Rd	0,608	43000	41000	51000	25000	37800
W Indian School Rd	0,992	45000	44000	45000	25000	34700
N 7th Ave	1,232	32000	32000	20000	16000	15400
Fwy 17	1,6	159000	192000	210000	206000	206000
N Central Ave	2,032	35000	43000	35000	45000	18100

* Distância da estação de monitoramento do ar JLG Supersite.

Fonte: Autoria própria (2015).

De um modo geral, existem poucas ruas ou estradas principais ao redor da estação de monitoramento JLG Supersite (Tabela 5) em comparação com as outras estações (a estação Buckeye é uma exceção) e também o volume de tráfego é menor. Portanto, isso poderia significar menos emissões e menores concentrações de NO₂ do que nas outras estações de monitoramento.

A Figura 25 mostra as emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_{x(inicial)} é igual a 1,03 ton/dia de semana, e também mostra as concentrações de NO₂, 98°

percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação JLG Supersite.

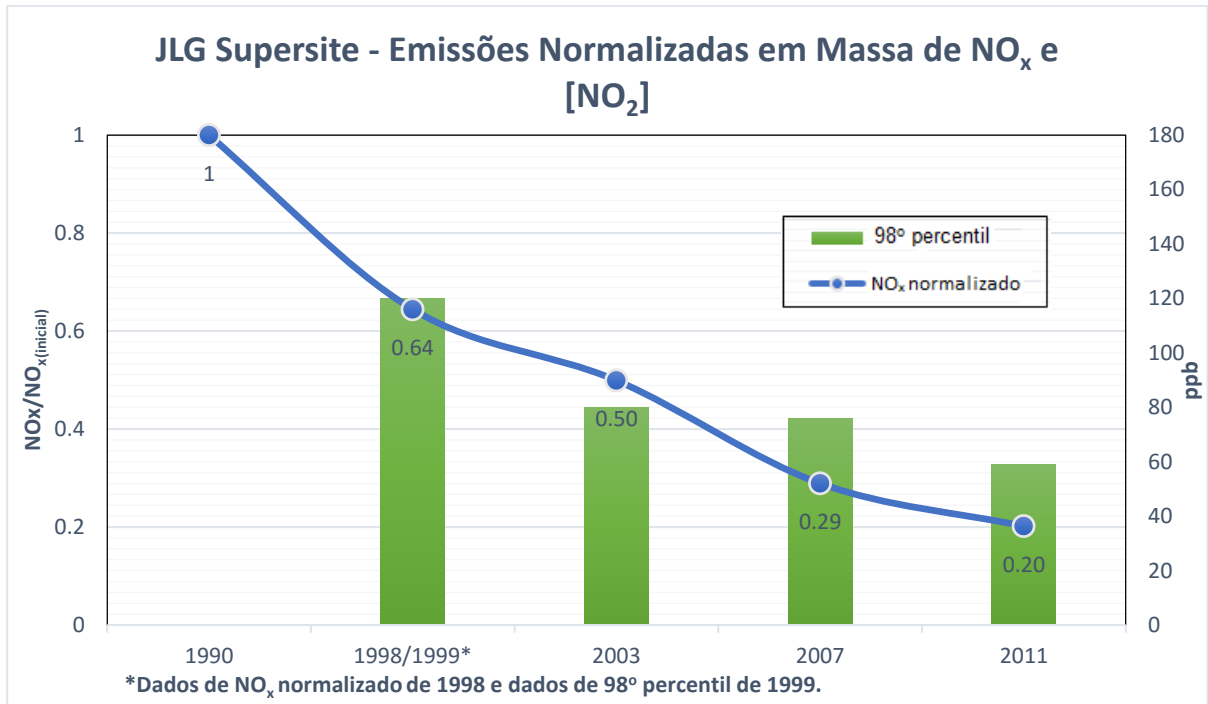


Figura 25 - Emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_x(inicial) é igual a 1,03 ton/dia de semana, e as concentrações de NO₂, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação JLG Supersite.

Fonte: Autoria própria (2015).

A Figura 25 mostra as concentrações de NO₂ ao longo dos anos e as emissões em massa de NO_x. Ambos os parâmetros têm diminuído ao longo dos anos e as emissões em massa de NO_x estão cinco vezes menores em 2011 do que em 1990, mostrando uma notável diferença nas emissões. Além disso, como mostra a Tabela 5, o número de veículos nas avenidas mais próximas, 19, 15, 7 e Central, está diminuindo, provando que está ocorrendo uma descentralização da área.

As Figuras 24 e 25 têm comportamentos semelhantes ao longo dos anos para as emissões normalizadas em massa de NO_x e concentrações de NO₂, o qual não são surpreendentes porque esses locais são áreas residenciais localizadas perto do centro da cidade de Phoenix.

A Tabela 6 apresenta a média diária para os dias da semana do volume de tráfego na região da estação de monitoramento Greenwood. Observando a Figura 12, é possível visualizar todas as principais ruas, avenidas e rodovias selecionadas dentro

de um raio de aproximadamente 2,4 quilômetros da estação Greenwood. De acordo com a Tabela 6, a estação de monitoramento Greenwood está próxima de duas autoestradas com volumes de tráfego excepcionalmente elevados (Rodovias Interestaduais 10 e 17). A rua mais próxima, a avenida 27, não possui um tráfego de veículos tão intenso, com cerca de 17 mil veículos por dia, mas a Rodovia Interestadual 10, aproximadamente 100 metros a norte, tem mais de 200 mil veículos e a Rodovia Interestadual 17 em torno de 130 mil veículos por dia em 2011.

Tabela 6 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento Greenwood

Greenwood - Média Anual do Volume de Tráfego para os Dias da Semana						
Principais Ruas/Estradas	Distância (Km)*	1990	1998	2003	2007	2011
N 27th Ave	0,016	20000	16000	16000	18000	17100
Fwy 10	0,112	83000	184000	226000	233000	252000
W Mc Dowell Rd	0,544	34000	37000	29000	23000	30500
Fwy 17	0,88	160000	200000	135000	112000	130000
W Van Buren St	1,12	24000	26000	26000	28000	27200
N 35th Ave	1,6	35000	40000	15000	27000	42700
N 19th Ave	1,6	20000	17000	17000	19000	18600

* Distância da estação de monitoramento do ar Greenwood.

Fonte: Autoria própria (2015).

O volume de veículos nas autoestradas (Tabela 6) está aumentando ao longo dos anos e, em geral, as principais ruas e avenidas ou possuem um aumento no tráfego de veículos ou uma sensível diminuição, sendo contrário à política de descentralização dos centros urbanos que é visível nas outras estações. Fato esse decorrente da importância dessas ruas, avenidas ou autoestradas em conectar diversas partes da cidade que estão expandindo. Portanto, as concentrações e emissões de poluentes devem ser maiores na estação de monitoramento Greenwood.

A Figura 26 mostra as emissões normalizadas em massa de NO_x , $\text{NO}_{x(\text{inicial})}$ é igual a 1,09 ton/dia de semana, e também mostra as concentrações de NO_2 , 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação Greenwood.

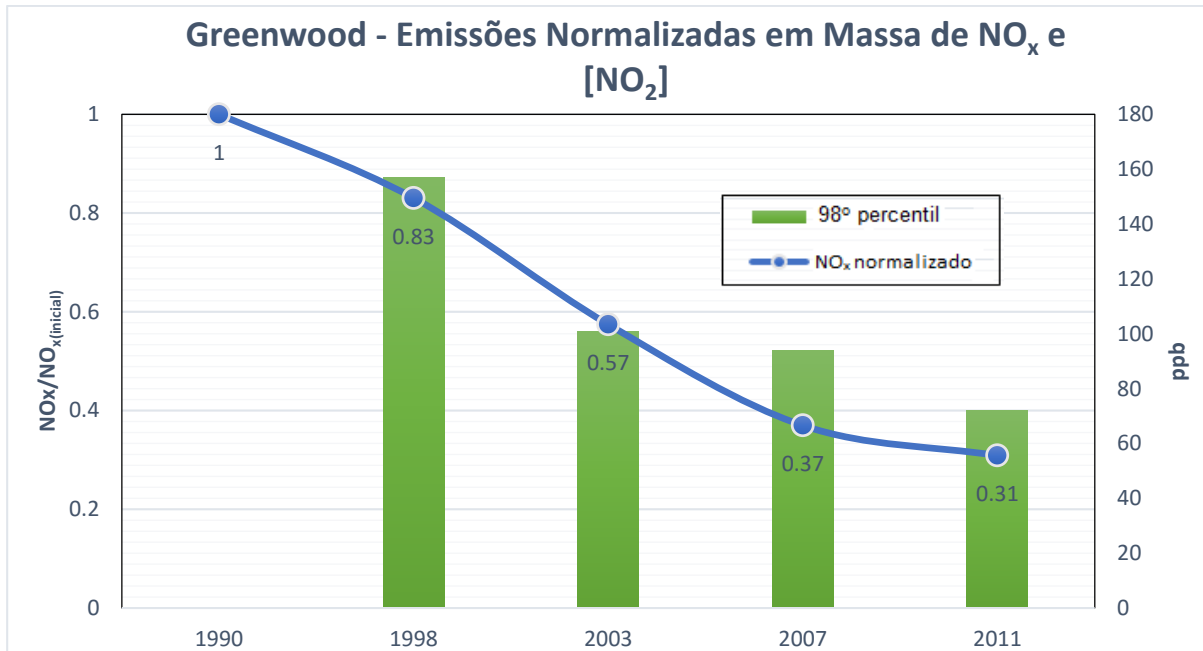


Figura 26 - Emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_{x(inicial)} é igual a 1,09 ton/dia de semana, e as concentrações de NO₂, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação Greenwood.
Fonte: Autoria própria (2015).

As concentrações de NO₂ (Figura 26) são as mais elevadas comparando-se com as outras estações, provavelmente por causa das autoestradas e horários de pico que proporcionam uma elevada emissão em massa de NO_x em um curto período de tempo.

A Tabela 7 apresenta a média diária para os dias da semana do volume de tráfego na região da estação de monitoramento Central Phoenix. Observando a Figura 11 é possível visualizar todas as principais ruas, avenidas e rodovias selecionadas dentro de um raio de aproximadamente 2,4 quilômetros da estação Central Phoenix (a avenida North Central é uma exceção porque é uma importante via de tráfego mesmo estando mais distante do que 2,4 quilômetros da estação).

Tabela 7 - Média anual do volume de tráfego para os dias da semana nas ruas, avenidas e rodovias próximas a estação de monitoramento Central Phoenix

Central Phoenix - Média Anual do Volume de Tráfego para os Dias da Semana						
Principais Ruas/Estradas	Distância (Km)*	1990	1998	2003	2007	2011
E Roosevelt St	0,08	10000	25000	x	x	x
N 16th St	0,144	30000	44000	24000	30000	28100
Fwy 10	0,432	79000	264000	262000	291000	271000
E Van Buren St	0,72	26000	25000	20000	24000	24300
Sr 51 Fwy	0,832	85000	145000	169000	176000	165000
E Mc Dowell Rd	0,864	38000	33000	26000	32000	27300
E Washington St	1,056	31000	25000	15000	x	10600
E Jefferson St	1,168	27000	25000	15000	x	10900
N 11th St	1,2	7000	x	x	x	x
N 24th St	1,472	36000	24000	36000	x	29000
N 7th St	1,776	35000	60000	33000	27000	32500
N Central Ave	2,576	29000	34000	15000	16000	13700

* Distância da estação de monitoramento do ar Central Phoenix.

Fonte: Autoria própria (2015).

A Tabela 7 mostra que a estação de monitoramento Central Phoenix tem mais ruas, avenidas e estradas principais em comparação as outras estações, demonstrando sua importância econômica no Condado de Maricopa. Conseqüentemente, a região Central é muito movimentada, com intensa circulação de veículos e pessoas, e com altas emissões de poluentes ao longo do dia. Além disso, esta região tem duas autoestradas muito próximas que são a Rodovia Interestadual 10 e a Rota Estadual 51, que possuem um intenso fluxo de veículos. Outra influência sobre as concentrações de poluentes nessa parte da cidade é a circulação dos ventos, de oeste para leste durante o dia, que podem carregar poluentes provenientes de outras regiões da cidade até a estação Central Phoenix. A maioria das ruas, estradas e rodovias tiveram uma diminuição nos volumes de tráfego desde 1998, novamente por causa da descentralização dos centros urbanos, por isso algumas ruas que eram consideradas importantes no passado não estão mais sendo estudadas atualmente, devido ao baixo volume de tráfego.

A Figura 27 mostra as emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_x(inicial) é igual a 1,18 ton/dia de semana, e também mostra as concentrações de NO₂, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação Central Phoenix.

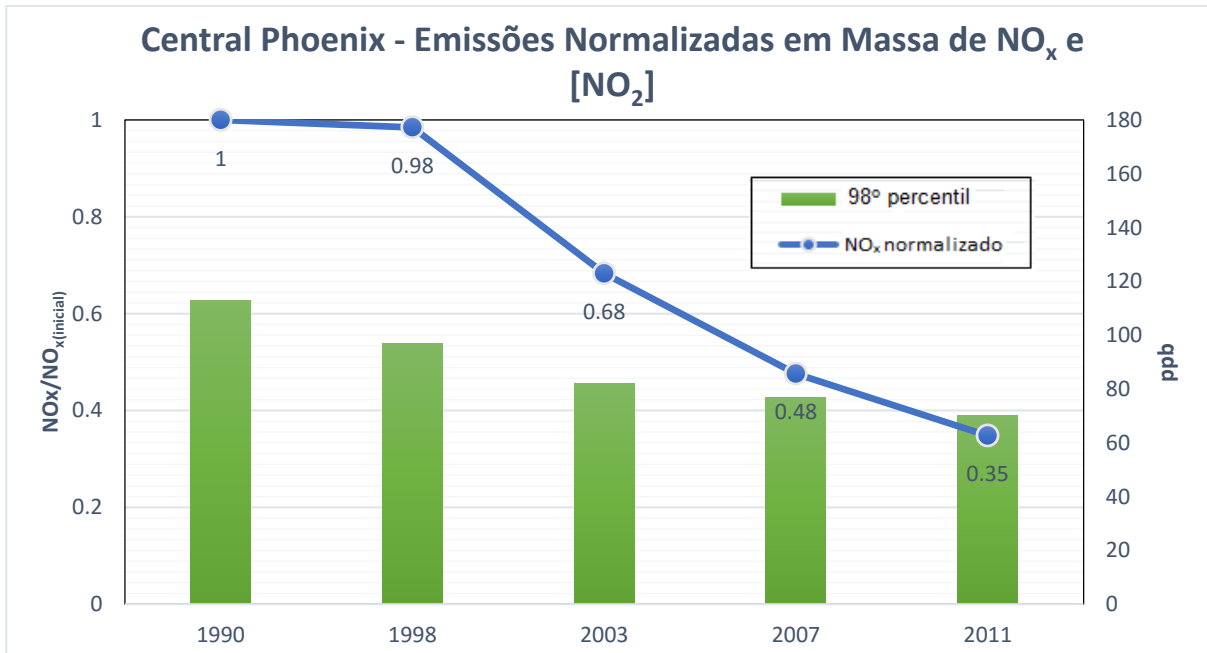


Figura 27 - Emissões normalizadas em massa de NO_x, NO_x(inicial) é igual a 1,18 ton/dia de semana, e as concentrações de NO₂, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias sem a média dos três últimos anos para a estação Central Phoenix.
 Fonte: Autoria própria (2015).

Analisando a Figura 27, as emissões em massa de NO_x estão diminuindo ao longo dos anos, 35% menos em 2011 do que em 1990. No entanto, há uma exceção, pois entre os anos de 1990 e 1998 as emissões em massa de NO_x diminuíram apenas 2%, mostrando que mesmo melhorando e reduzindo as emissões de poluentes em veículos, não foi suficiente para compensar a enorme expansão da frota veicular entre esses dois anos, principalmente em rodovias. As concentrações de NO₂ diminuíram substancialmente desde 1990, em uma curva decrescente até 2011. No entanto, as concentrações de NO₂ estão diminuindo menos desde 2003, porque as emissões de poluentes são relativamente elevadas em todo o horário comercial na área central de Phoenix (considerando a nova norma como referência, 98º percentil da distribuição horária das concentrações máximas diárias).

6 CONCLUSÃO

Os resultados do presente trabalho mostraram que todas as concentrações de NO_x estão dentro das normas determinadas pela EPA. Considerando a nova norma que começou a vigorar em 2010, alguns valores excederam a legislação, mas apenas em períodos anteriores a sua vigência, por isso não houve sanções.

As maiores concentrações de NO_x estão nas estações de monitoramento do ar Greenwood e Central Phoenix, respectivamente, com picos de concentrações de NO_2 (média das concentrações máximas horárias) de 160 ppb e 150 ppb (ambos no ano de 1999). A estação Greenwood apresenta altas $[\text{NO}_2]$, provavelmente por estar localizada próxima a rodovias com intenso fluxo de veículos ao longo do dia; já a estação Central Phoenix, por estar localizada em uma área comercial da cidade com intenso fluxo de veículos e pessoas.

A estação de monitoramento Buckeye é a que apresenta as menores concentrações de NO_x para uma área urbana, mesmo apresentando um pico nas concentrações de NO_2 (média das concentrações máximas horárias) de 100 ppb em 2014 (de 2009 até 2013 apresentou valores anuais próximos de 40 ppb). Essas baixas concentrações são provenientes de sua economia agrícola, da baixa densidade de tráfego e de sua localização no sentido de fluxo ascendente dos ventos (durante o dia) da área urbana.

Alamo Lake está localizada longe da região central de Phoenix e aproximadamente 65 quilômetros da pequena cidade mais próxima, resultando em mínimas concentrações de NO_x (concentrações de NO_2 , expresso em média das concentrações máximas horárias, que não ultrapassam 15 ppb). Esses valores são bem inferiores daqueles encontrados para as outras cinco estações urbanas de monitoramento do ar (Buckeye, West Phoenix, Greenwood, JLG Supersite e Central Phoenix).

As concentrações de NO são muito mais elevadas durante os dias que apresentam baixas concentrações de O_3 (inverno) do que nas altas (verão), destacando um pico na estação Greenwood de 160 ppb às 7h em 2013, por outro lado no verão essa concentração não ultrapassava 40 ppb. Já as concentrações de NO_2 não tiveram grandes variações entre esses dois períodos (valores próximos de 20 ppb às 7h na estação Central Phoenix), devido às grandes concentrações de NO que

ocorre no inverno por causa da fraca dispersão de poluentes e da inversão de temperatura na superfície ser mais duradoura. As concentrações de O₃ calculadas atingem valores baixos no inverno (média de 17 ppb na estação Central Phoenix às 16h em 2014) e muito altas no verão (média de 88 ppb na estação Central Phoenix às 16h em 2014).

Buckeye é a região com a maior expansão urbana, porém não foi possível estimar as emissões em massa de NO_x para essa estação devido à falta de dados. Em geral, as outras regiões apresentaram um declínio no volume de tráfego, principalmente em 2007 e 2011, por causa da descentralização urbana, a qual acontece em muitas outras grandes cidades ao redor do mundo.

No geral, observou-se que as emissões em massa de NO_x estão diminuindo com o passar dos anos (estação JLG Supersite apresentou uma redução de aproximadamente 80% de 1990 até 2011), apesar do aumento do tráfego urbano em algumas estações, decorrente dos veículos estarem cada vez mais eficientes e menos poluentes.

REFERÊNCIA

AMERICAN LUNG ASSOCIATION. **State of the Air 2014**, Chicago: Fighting for air, dez. 2014.

ARIZONA STATE PARKS. **Alamo Lake State Park**. Park's home page, 2015. Seção Photo Gallery. Disponível em: <<https://azstateparks.itinio.com/alamolake/>>. Acesso em: 8 ago. 2015.

BAUKAL, Charles. Controlling and minimizing pollutant emissions is critical for meeting air quality regulations. **Everything You Need to Know About NO_x**, Nova York, p. 18-24, nov. 2005.

BECKETT, William S. Ozone, Air Pollution, and Respiratory Health. **The Yale Journal of Biology and Medicine**, New Haven, n. 64, p. 167-175, fev. 1991.

BELL, Michelle L.; DAVIS, Devra L.; FLETCHER, Tony. A retrospective assessment of mortality from the London smog episode of 1952: The role of influenza and pollution. **Environmental Health Perspectives**, Pittsburgh, v. 112, n. 1, p. 6-8, jan. 2004.

BRINEY, Amanda. **Acid Rain: The Causes, History, and Effects**. About Education, 10 jul. 2015. Disponível em: <<http://geography.about.com/od/waterandice/a/Geography-Of-River-Deltas.htm>>. Acesso em: 8 ago. 2015.

EASTWOOD, Steve. **Brown Air in the Valley**. About Travel, jan. 2006. Disponível em: <<http://phoenix.about.com/od/weather/a/browncloud.htm>>. Acesso em: 20 jul. 2015.

ECOTECH. **EC9841 A & B Series Nitrogen Oxides Analyser**. Austrália: ECOTECH, 2007. 60 p. (Manual de serviço)

GOVERNMENT OF CANADA. **Frequently asked questions about the Air Quality Health Index (AQHI)**. Environment Canada, 9 jul. 2015. Disponível em: <<https://www.ec.gc.ca/cas-aqhi/default.asp?lang=En&n=3E3FDF68-1>>. Acesso em: 12 jul. 2015.

EPA. Using MOVES to Prepare Emission Inventories in State Implementation Plans and Transportation Conformity. Transportation and Climate Division Office and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency. **Technical Guidance for MOVES2010, 2010a and 2010b**: manual técnico. Estados Unidos da América, 2012. 63 p.

JACOBSON, Mark. **Air Pollution and Global Warming: History, Science, and Solutions**. 2. ed. Nova York: Cambridge University Press, 2012.

SICKLES, J. E.; RIPPERTON, W. C.; EATON, R. S. **Nitrogen Dioxide Photolytic, Radiometric and Meteorological Field Data**. Carolina do Norte, p. 1 – 188, mar. 1978.

KJELLSTROM, Tord; LODH, Madhumita; MCMICHAEL, Tony; RANMUTHUGALA, Geetha; SHRESTHA, Rupendra; KINGSLAND, Sally. **Disease Control Priorities in Developing Countries**. 2. ed. Washington (DC): World Bank, 2006.

MARICOPA COUNTY OPEN BOOKS. **Maricopa County Profile**. Maricopa County, Phoenix, 2015. Seção About Maricopa County. Disponível em : < <http://www.maricopa.gov/OpenBooks/profile.aspx>>. Acesso em: 15 jul. 2015.

MCAQD (MARICOPA COUNTY AIR QUALITY DEPARTMENT). **2012 Air Monitoring Network Review**, Phoenix, p. 1 – 111, set. 2012.

TELEDYNE. **MODEL 400E Photometric Ozone Analyzer**. San Diego: TELEDYNE, 2011. 357 p. (Manual técnico).

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **NOx: How nitric oxides affect the way we live and breathe**. Washington, DC, 1999, 6 p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Air Emission Sources**. EPA. United States, 21 out. 2015. Disponível em: < <http://www3.epa.gov/air/emissions/index.htm>>. Acesso em: 26 out. 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **History of Air Pollution**. EPA, ago. 2015. Seção Air Research. Disponível em: < <http://www2.epa.gov/air-research/history-air-pollution>>. Acesso em: 16 ago. 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Ground Level Ozone**. EPA, jun. 2015. Seção Air. Disponível em: < <http://www3.epa.gov/air/ozonepollution/>>. Acesso em: 1 jul. 2015.

URBAN, Michael, J.; BOJKOV, Bojan; CARTER, Brooke; DOGANCAI, Deborah; FERMANN, Eric. **Exploring Air Quality in Aura NO₂ Data**. Earth Exploration Toolbook, Eastchester, abr. 2011. Disponível em: <<http://serc.carleton.edu/eet/aura/index.html>>. Acesso em: 5 ago. 2015.

U.S. CLIMATE DATA. **Climate Phoenix – Arizona**. Temperatura – Precipitation – Sunshine – Snowfall, 2015. Seção Monthly. Disponível em: <<http://www.usclimatedata.com/climate/colorado/united-states/3175>>. Acesso em: 26 nov. 2015.

SPELLMAN, Frank, R. **The science of air: Concepts and applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

STERN, Arthur, C.; WOHLERS, Henry, C.; BOUBEL, Richard, W. LOWRY, William, P. **Fundamentals of Air Pollution**. 1. ed. New York: Academic Press, 1973.

VALLERO, Daniel, A. **Fundamentals of Air Pollution**. 4. ed. Burlington: Academic Press, 2008.

WINDFINDER. **Medições de vento e condições atmosféricas no aeroporto de Phoenix Sky Harbor**. Medições de ventos e condições atmosféricas, 2015. Seção Previsões e medições. Disponível em: <http://www.windfinder.com/report/phoenix_sky_harbor>. Acesso em: 26 nov. 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Ambient (outdoor) air quality and health**. WHO, mar. 2014. Seção Fact sheets. Disponível em: <<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>>. Acesso em: 20 jul. 2015.