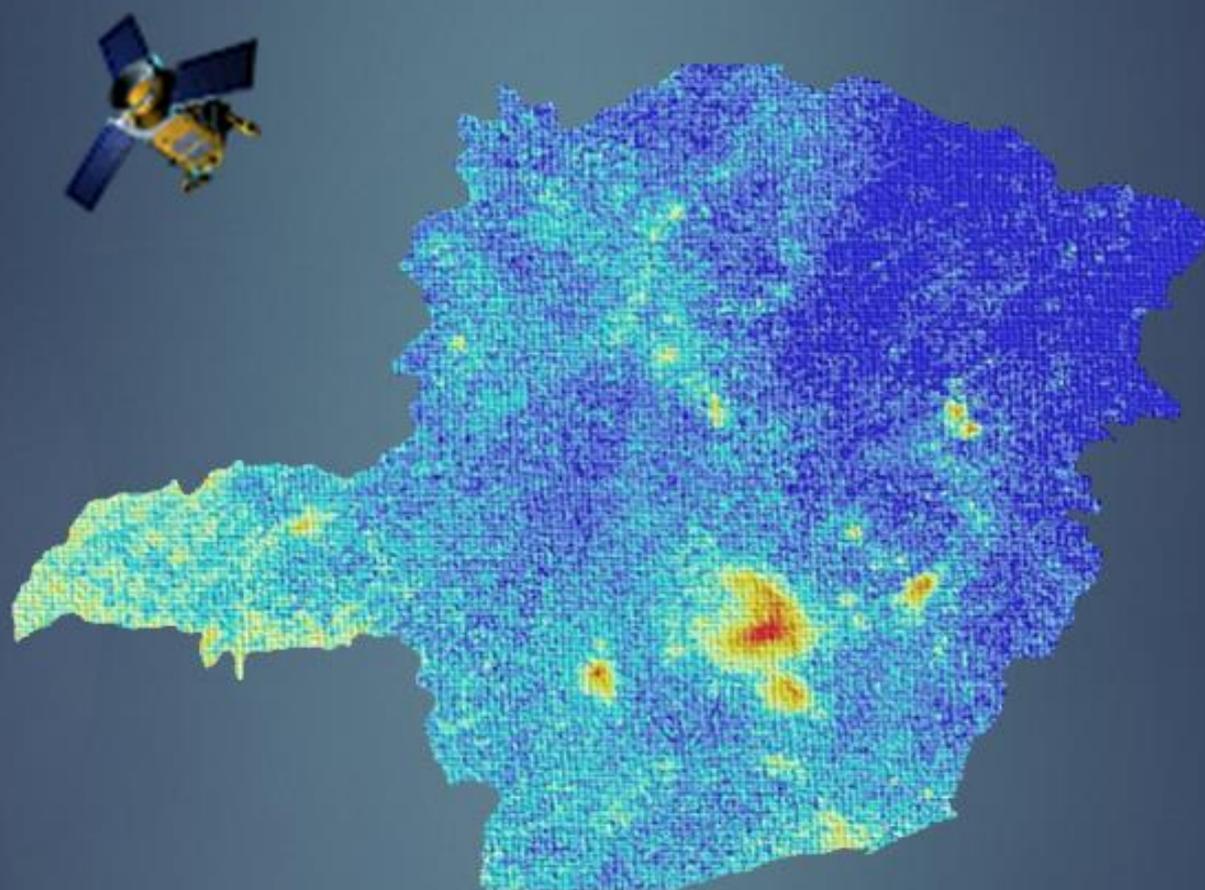


# Tendências espaciais e temporais da concentração média de NO<sub>2</sub> na coluna atmosférica em Minas Gerais a partir de dados orbitais

Avaliação inicial do impacto associado às medidas para controle da disseminação do COVID-19



RELATÓRIO TÉCNICO CONJUNTO GEAAD/GESAR Nº 01/2021

**Governo do Estado de Minas Gerais**

Romeu Zema Neto  
Governador

**Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – Semad**

Marília Carvalho de Melo  
Secretária

**Fundação Estadual de Meio Ambiente - Feam**

Renato Teixeira Brandão  
Presidente

**Diretoria de Gestão da Qualidade e Monitoramento Ambiental**

Alice Libânia Santana Dias  
Diretora

**Gerência de Monitoramento da Qualidade do Ar e Emissões**

Priscila Cristina Pizano de Souza Koch  
Gerente

Amanda Karine Chaves Ribeiro  
Analista Ambiental

Amanda Noronha Moreira de Carvalho  
Analista Ambiental

**Diretoria de Instrumentos de Gestão e Planejamento Ambiental**

Patrícia Rocha Maciel Fernandes  
Diretora

**Gerência de Avaliação Ambiental e Desenvolvimento Territorial**

Caroline Priscila Fan Rocha  
Gerente

Alessandro Ribeiro Campos  
Analista Ambiental

Éverton de Oliveira Rocha  
Analista Ambiental

## SUMÁRIO EXECUTIVO

- Em Minas Gerais, no período entre janeiro e junho de 2020, foi identificada uma redução na concentração média de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica de aproximadamente 10% em comparação com o mesmo período de 2019.
- Diferenças estatisticamente significativas entre a série de 2019 e 2020 foram encontradas, evidenciando um possível impacto associado às medidas adotadas para controle da disseminação do COVID-19 na tendência sazonal de redução de concentração do poluente no estado de Minas Gerais.
- Nos meses de maior intensificação das medidas para controle da disseminação do COVID-19 no estado, abril e maio de 2020, a redução média alcançou cerca de 21% em 2020, em relação a 2019, demonstrando na semana de 17 a 24 de abril o maior decréscimo percentual da série temporal, cerca de 33%.
- As observações em escala regional, segundo unidades de planejamento, indicaram um maior distanciamento entre as curvas de 2019 e de 2020 em regiões localizadas nas macrorregiões de Minas Gerais: Zona da Mata, Sul de Minas, Centro-oeste e Central.
- Na Região Metropolitana de Belo Horizonte houve uma redução média, em abril e maio de 2020, de aproximadamente 23% da concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera em relação a 2019.
- O nível de redução identificado sugere que houve melhoria da qualidade do ar e, conseqüentemente, menores impactos na saúde da população mineira em função da inalação de poluentes, sobretudo aquela residente nos grandes centros urbanos do estado.
- As condições meteorológicas de cada ano também influenciam nas alterações de concentrações de poluentes no ar entre diferentes anos, por este motivo esta foi uma análise inicial. Contudo, o presente trabalho trouxe fortes indícios do impacto positivo na qualidade do ar em função da diminuição da circulação veicular nos centros urbanos.
- Especificamente para a concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera, devido ao curto tempo de vida nessa camada da atmosfera e a distribuição não homogênea das fontes de emissão, a resolução espacial aprimorada do S5P/TROPOMI poderá auxiliar na distinção das variações na concentração em várias escalas de observação: estadual, regional e local.
- As análises apresentadas dependem de alto custo técnico e de processamento para a manipulação dos dados, extração, processamento e geração de resultados, que pode ser minimizado com a utilização de um ambiente de software adequado e hardware de alta capacidade.

## SUMÁRIO

1 CONTEXTO E OBJETIVO .....	03
2 MATERIAL E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	05
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	07
4 CONCLUSÃO .....	16
5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	17

## 1. CONTEXTO E OBJETIVO

Em 15 de março de 2020 foi instituído, por meio do Decreto nº 47.886, o Comitê Gestor do Plano de Prevenção e Contingenciamento em Saúde do COVID-19 – Comitê Extraordinário COVID-19, de caráter deliberativo, e com competência extraordinária de adotar e fixar medidas de saúde pública necessárias para a prevenção e controle do contágio pelo novo Coronavírus no estado de Minas Gerais. Com a promulgação da Deliberação COVID-19 nº 17, de 22 de março de 2020, foram estabelecidas as medidas emergenciais a serem adotadas pelos municípios no âmbito de suas competências, incluindo a suspensão de serviços, atividades ou empreendimentos.

De forma a controlar a pandemia, os governos municipais implementaram uma série de medidas que tiveram impacto direto na execução de várias atividades econômicas, como o fechamento temporário de estabelecimentos diversos, de forma a favorecer o isolamento social e prevenir o contágio pelo Coronavírus. Com a restrição de circulação de pessoas, reduziram-se as emissões provenientes do tráfego de veículos, importante fonte de poluição do ar nas grandes cidades, o que culminou, por sua vez, na diminuição da concentração de poluentes no ar associados essa fonte, como constatado nas análises realizados por órgãos e agências ambientais e instituições de ensino. Segundo informações da Confederação da Indústria, a pandemia de COVID-19 também resultou em alterações nas atividades industriais (Portal da Indústria, 2020), outro relevante grupo de fontes de emissão de poluentes atmosféricos.

Uma vez que a qualidade do ar tem relação com a saúde da população, se faz importante identificar a dimensão do impacto na qualidade do ar decorrente do evento de diminuição da circulação urbana, de forma a orientar políticas públicas de controle da qualidade do ar no Estado de Minas Gerais.

O monitoramento da qualidade do ar por meio de sensores orbitais, combinados a modelos dinâmicos robustos e dados auxiliares, capazes de medir a composição da atmosfera, destacaram-se durante o período da pandemia no sentido de quantificar e detectar poluentes atmosféricos como o dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), o ozônio (O<sub>3</sub>), o dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) e o monóxido de carbono (CO) de origem de emissões veiculares e industriais em grandes centros urbanos. A disponibilização dos dados derivados dessa tecnologia permitiu a realização de diversas avaliações ao redor do globo, graças à área de cobertura com uma resolução espacial e temporal útil, permitindo a aquisição de informações adicionais.

O sensor *TROPospheric Monitoring Instrument* (TROPOMI), desenvolvido em conjunto pela Holanda e pela Agência Espacial Europeia (ESA), foi lançado em 13 de outubro de 2017 a bordo do satélite Sentinel-5 Precursor (S5P) para monitorar a composição química da atmosfera. Essa foi a primeira missão de satélite no programa de observação europeu *Copernicus Earth* a ser dedicado a essa finalidade.

O TROPOMI é um espectrômetro com bandas espectrais em ultravioleta (UV), visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR). A combinação entre essas faixas de comprimento de onda e seu tempo de revisita permitem ao TROPOMI a observação diária dos principais constituintes atmosféricos, incluindo ozônio (O<sub>3</sub>), dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), dióxido enxofre (SO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), formaldeído (CH<sub>2</sub>O), aerossóis e nuvens (Veefkind *et al.*, 2012).

As medições feitas pelo S5P/TROPOMI foram utilizadas em diversos estudos relacionando a redução de poluentes atmosféricos com a diminuição do fluxo e emissão veiculares em diversas partes do mundo, principalmente nos grandes centros urbanos, sendo observado como efeito a melhoria da qualidade do ar.

Lorente *et al.* (2019) concluíram que as medições pelo S5P/TROPOMI NO<sub>2</sub> fornecem informações de boa qualidade e com alta resolução para a detecção remota por satélite, possibilitando o monitoramento diário detalhado das emissões dos NO<sub>x</sub> de Paris (França) para períodos sem nuvens.

O estudo desenvolvido recentemente por Bauwens *et al.* (2020) utilizando o S5P/TROPOMI, por exemplo, identificou reduções sem precedentes de NO<sub>2</sub> na China, Coréia do Sul, Europa Ocidental e EUA como resultado de medidas de saúde pública aplicadas para conter o surto por COVID-19 em janeiro-abril de 2020.

Este estudo teve como objetivo analisar o impacto das medidas adotadas para controle da disseminação do COVID-19 nas tendências espaciais e temporais da concentração do poluente NO<sub>2</sub> na coluna troposférica sobre o estado de Minas Gerais, observadas por meio do sensor S5P/TROPOMI.

Trata-se de uma análise preliminar e a escolha do NO<sub>2</sub> deu-se por se tratar de um poluente cujas alterações em seus níveis trazem indícios de mudanças na atividade humana, com uma resposta rápida, por ser um poluente que permanece estacionado próximo às fontes de emissão, com curto ciclo de vida. No entanto, os dados precisam ser processados e interpretados com cuidado, uma vez que os níveis de NO<sub>2</sub> sofrem influência de processos dinâmicos e químicos na atmosfera e assim, a quantidade observada por satélite na coluna troposférica pode ser diferente da concentração presente no nível do solo.

Os resultados encontrados poderão ser utilizados na avaliação da potencialidade da tecnologia e sua adicionalidade ao monitoramento da qualidade do ar no âmbito do estado de Minas Gerais, e no estudo de fenômenos atmosféricos inseridos em diferentes escalas espaciais, local, regional ou global, e em determinada escala temporal.

## 2. MATERIAIS E PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O S5P está em uma órbita quase polar, síncrona solar, com um cruzamento equatorial ascendente às 13:30 h (hora local média solar). Em uma órbita síncrona ao sol, a superfície é sempre imageada no mesmo ângulo do sol.

O espectrômetro de imagem multiespectral TROPOMI detecta radiação refletida ou espalhada de volta ao espaço pela atmosfera e superfície da Terra. Conhecida a assinatura digital espectral de cada gás-traço atmosférico alvo, sua concentração pode ser calculada através da identificação dessas “impressões digitais” únicas desses constituintes em diferentes partes do espectro eletromagnético.

Por focar na observação da coluna troposférica, onde as concentrações podem variar rapidamente, o TROPOMI, combinando a cobertura global diária com uma alta resolução espacial de 7 × 7 km, foi projetado para produzir imagens que cobrem as faixas espectrais de 270 a 500 nm (UV e visível), de 675 a 775 nm (NIR) e de 2305 a 2385 nm (SWIR).

A partir dessas imagens e de um conjunto auxiliar de dados, o sistema de processamento do TROPOMI obtém as estimativas da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna atmosférica baseando-se em algoritmos (DOMINO-2 e UE QA4ECV NO<sub>2</sub>) adaptados a partir daqueles desenvolvidos para o sensor OMI. Esse sistema de modelagem de recuperação-assimilação usa o modelo global de transporte químico TM5-MP tridimensional com uma resolução de 1x1 grau como um elemento essencial para seus cálculos.

O modelo de processamento para obtenção dos produtos NO<sub>2</sub> do S5P/TROPOMI, desenvolvido de acordo com recomendações de qualidade dos dados (Boersma *et al.*, 2018), vem sendo validado sistematicamente, apresentando resultados positivos. A acurácia e a precisão estimada *ex-ante* foram de 10%, ou seja, 1x10<sup>5</sup> mol./cm<sup>2</sup> na condição sem a presença de nuvens (Veefkind *et al.*, 2012).

Griffin *et al.* (2019) identificaram uma alta correlação entre a densidade das colunas verticais do TROPOMI NO<sub>2</sub> com as observações de NO<sub>2</sub> por aeronave e na superfície com um baixo viés (15–30%) na área de influência de uma planta industrial. Jalongo *et al.* (2020) também tiveram resultados satisfatórios no processo de validação com base em observações terrestres na cidade de Helsinki (Finlândia), indicando aplicabilidade preliminar para o monitoramento dos níveis de poluição em locais urbanos.

Para a criação da base de dados para suporte das análises dos produtos NO<sub>2</sub> do S5P/TROPOMI neste estudo, com foco na região da atmosfera sobre o estado de Minas Gerais, foi necessário o desenvolvimento de três grandes processos: i) download dos produtos, constituídos por imagens digitais, através da plataforma pública de disponibilização <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/>; ii) armazenamento; e iii) processamento computacional intensivo.

Para a dimensão espacial e temporal definida neste estudo, esses processos são, geralmente, uma barreira. Com forma de superar essa limitação utilizou-se computação de alto desempenho, combinando códigos na linguagem *Python* (versão 3.7) para a manipulação, extração dos dados, processamento e geração de resultados gráficos, com hardware de alta capacidade. Para tanto, foi utilizada uma máquina virtual cedida pela *Research and User Support (RUS)*, um serviço desenvolvido e operado por um consórcio relacionado Comissão Europeia que visa apoiar a expansão das atividades de P&D.

As imagens S5P/TROPOMI/L2 (nível 2 de processamento) são disponibilizadas através de arquivos no formato NetCDF (*Network Common Data Form*), uma biblioteca livre que possui funções de manipulação de dados armazenados em matrizes que contêm dimensões, variáveis e metadados. Foram obtidas através da plataforma de disponibilização 618 imagens com recobrimento espacial da área de estudo, resultando em um conjunto de dados com o horizonte temporal entre 17 de outubro de 2018 e 30 de junho de 2020.

De maneira geral, a etapa de processamento de dados compreendeu três subetapas: i) criação de um subset espacial; ii) reamostragem; e iii) filtragem de qualidade. Ao final dessas etapas foram obtidas séries temporais dos produtos NO<sub>2</sub> do S5P/TROPOMI com o nível 3 (L3) de processamento.

O fornecimento das imagens é feito através de arquivos únicos para toda cobertura geográfica do imageamento (de polo-a-polo) e faixa de recobrimento lateral (*wide swath*) de 108° (aproximadamente 2.600km na superfície). Isso resulta em um grande conjunto de dados que requer uma capacidade de processamento e armazenamento compatível. Por esse motivo, nesse estudo foi criado o *subset* espacial das imagens para a região sudeste do Brasil, a partir do qual era possível realizar análises com foco na atmosfera sob o território de Minas Gerais.

A etapa de reamostragem foi necessária, devido ao fato de as imagens estarem na forma de uma grade irregular, determinada pela órbita da passagem do satélite, o que dificulta o processo de combinação de várias imagens. Para criar uma grade de pixels espaciais regulares, os dados foram reamostrados em uma grade de referência para a área de estudo e georreferenciados na projeção WGS84 e sistema de coordenadas geográficas (latitude / longitude).

Para assegurar significância das análises dos dados e seus resultados, foi desenvolvida a etapa de avaliação de qualidade com a implementação de funções condicionantes para filtragem e exclusão dos pixels nas imagens com a indicação de baixa qualidade das medições.

Um grande desafio no monitoramento da composição química da atmosfera por meio da abordagem por sensoriamento remoto está em diminuir a degradação da precisão em função das condições meteorológicas no momento do imageamento. Boersma *et al.* (2004), avaliando as contribuições para o erro na estimativa de NO<sub>2</sub> na troposfera por sensores orbitais, indicou que os erros devido às incertezas nos parâmetros do modelo, tal como a nebulosidade, têm uma representação significativa.

Isso faz, portanto, com que a fração de nuvens em subpixel seja uma das principais fontes de erro na estimativa de concentração de NO<sub>2</sub> pelo TROPOMI. Para redução do efeito da nebulosidade e outras fontes de erros relacionados ao processamento, conjuntamente aos produtos do S5P/TROPOMI/L2 é fornecida uma camada que resume os diferentes fatores que afetam a qualidade das medições. Essa medida agregada chamada *quality assurance value (qa\_value)* foi utilizada neste estudo para rastrear pixels de baixa qualidade.

Para filtrar erros e estimativas problemáticas, foram excluídos pixels com *qa value* inferior à 0,5 (em que 0 significa que não há dados e 1 o maior nível de precisão) e com fração de nuvens superior à 0,4 (valor que varia entre 0 a 1, sendo 0 a ausência de nuvens) seguindo as especificações do manual do usuário (Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2).

O método de análise de variância (ANOVA) foi escolhido para calcular a significância estatística das diferenças entre as médias semanais no período de abril, maio e junho de 2020, com a adoção das medidas de restrição associadas ao controle da disseminação do COVID-19, e de 2019, de modo que fosse possível inferir sobre a existência de efeitos externos para além da variação sazonal da concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera.

O teste estatístico ordinário de ANOVA unidirecional foi usado para verificar se havia diferença de distribuição entre os dois grupos de médias semanais (média móvel de 7 dias consecutivos) da medida da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica estimada pelo TROPOMI, tendo por hipótese nula (H<sub>0</sub>) a afirmação de que não há diferença significativa entre os grupos de médias e por hipótese alternativa a afirmação de que houve fortes evidências (dados da amostra) contra a hipótese nula. O nível de significância estabelecido foi de 0,05.

Para avaliação dos pré-requisitos para execução da ANOVA, foram realizados os seguintes testes: i) Shapiro-Wilk, para a normalidade dos resíduos (erros) em cada grupo; ii) o teste de Bartlett para variâncias iguais em cada grupo (homoscedasticidade).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas áreas urbanas o NO<sub>2</sub> é emitido principalmente por processos de combustão decorrentes do tráfego rodoviário, com destaque para os veículos movidos a diesel e, em menor grau, a gasolina, além da indústria de transformação e usinas de termoeletricas.

As evoluções das médias mensais de NO<sub>2</sub> obtidas para o estado de Minas Gerais, subdividido nas regiões de planejamento, de abril a junho dos anos de 2019 e 2020, seguem apresentadas na Figura 1. Ressalta-se que, tendo o S5P/TROPOMI uma revisita diária, tais médias foram obtidas, pixel-a-pixel, portanto, por intermédio de um conjunto de 30 observações.

Nos mapas pode-se observar a distribuição espacial do poluente nos diferentes meses e anos analisados. O padrão predominante é naturalmente a persistência de altos valores médios sobre os municípios de Belo Horizonte, Contagem e Betim, região correspondente à maior densidade populacional de Minas Gerais (3,6 milhões de habitantes) combinada com uma intensa concentração de indústrias de transformação e de frota veicular. Observa-se que as concentrações mais elevadas em Minas Gerais, para todo o período, estão concentradas na região metropolitana de Belo Horizonte, alcançando também regiões de seu entorno como o vale do aço, oeste e vertente (Figura 2).

Em abril de 2020, houve uma diminuição significativa na concentração de NO<sub>2</sub> quando comparada ao mesmo mês de 2019. Esse foi o primeiro mês, dentre os analisados, em que o impacto das medidas emergenciais adotadas no estado de Minas Gerais foi sentido, com a suspensão de serviços, atividades ou empreendimentos a partir do dia 22 de março de 2020.

Nos meses seguintes, maio e junho de 2020, observa-se uma redução das diferenças de concentrações de NO<sub>2</sub> quando comparadas ao mesmo período de 2019. A concentração do poluente em junho de 2020 foi similar ou muito próxima a do ano anterior, possivelmente em função do início da flexibilização das medidas adotadas para controle da pandemia.

**Figura 1. Minas Gerais: Média mensal da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica em abril-maio-junho de 2019 e 2020.**

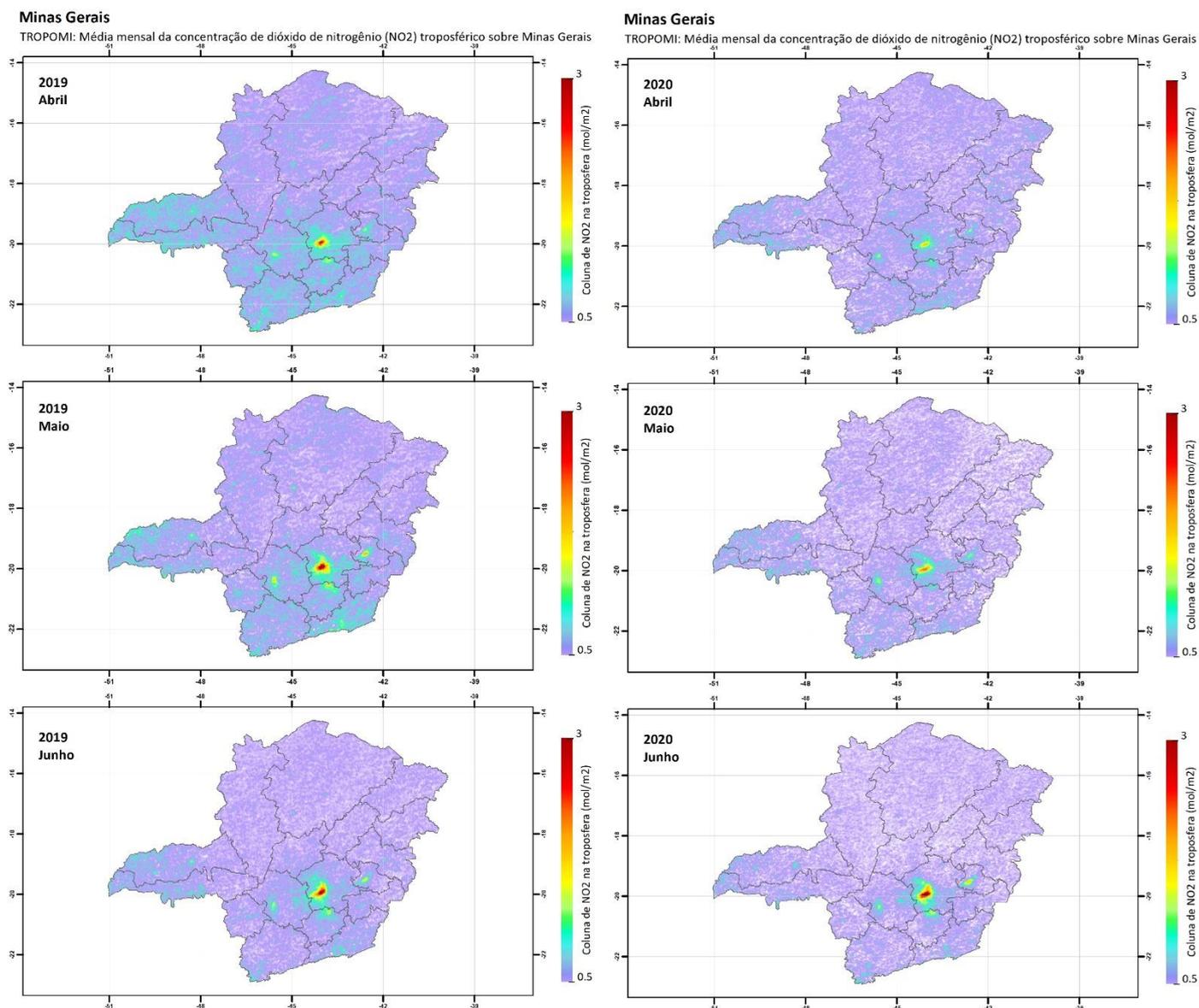
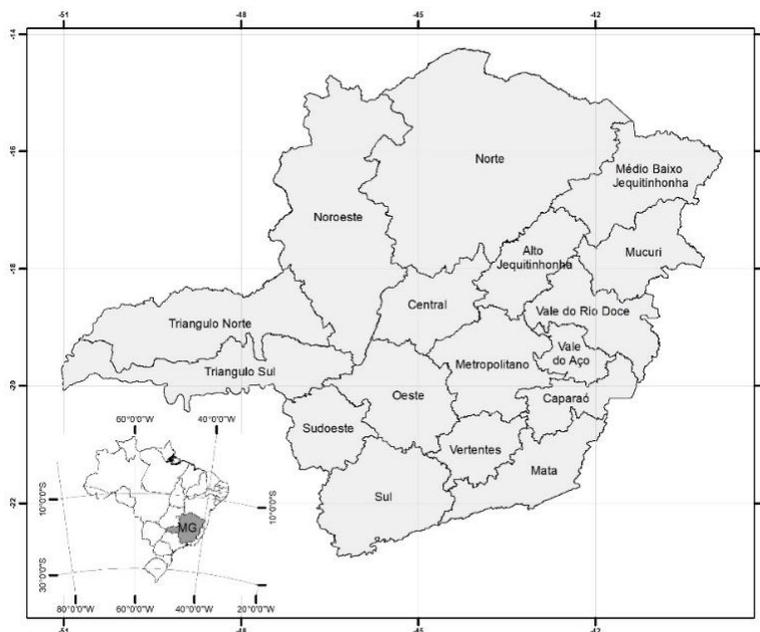


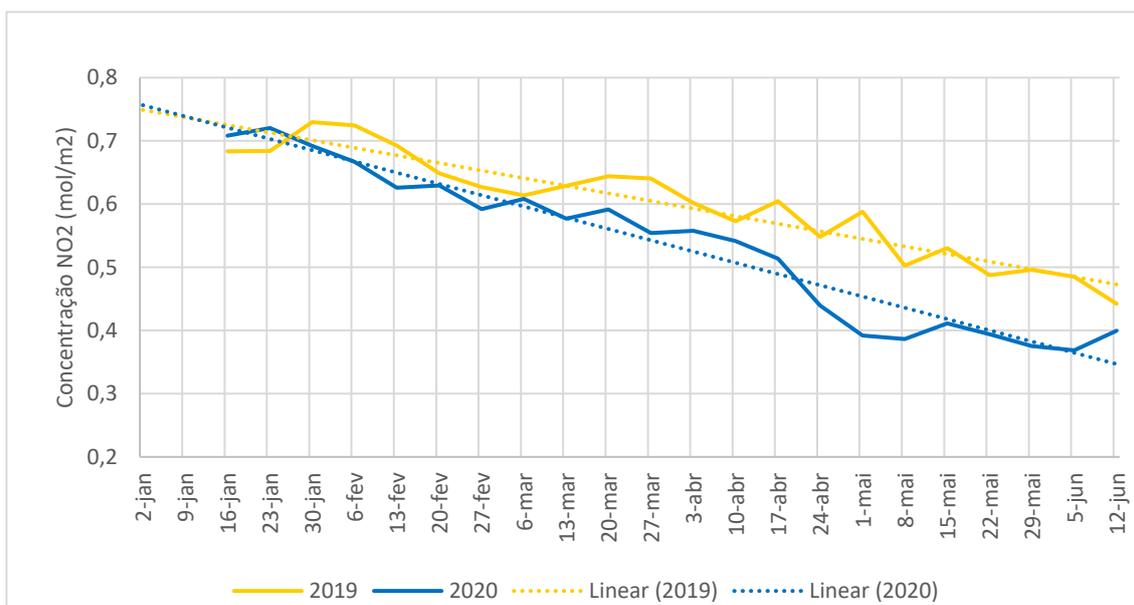
Figura 2. Minas Gerais: Limite das regiões de desenvolvimento



Fonte: Infraestrutura estadual de dados espaciais - IEDE

No Gráfico 1 observa-se a evolução e tendência da média semanal da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica, de janeiro a junho de 2019 e de 2020. É possível perceber que no início da série analisada os dados se aproximam em valores de concentração, mantendo-se dentro de uma mesma faixa. Com o decorrer do tempo, observa-se um afastamento entre as curvas de médias, estando as concentrações de NO<sub>2</sub> com valores inferiores no ano de 2020, em comparação ao ano anterior, 2019.

Gráfico 1. Minas Gerais: Evolução e tendência da média semanal janeiro/junho da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica em 2019 e 2020.



A partir de abril de 2020, logo após a adoção das medidas emergenciais, as diferenças entre as concentrações de NO<sub>2</sub> tendem a ser mais expressivas entre os anos analisados. Entre a terceira semana de abril e a terceira

semana de maio, a diferença entre as duas curvas atingiu seu ápice e, após este período, voltaram a se aproximar, possivelmente a partir da flexibilização das medidas de controle da pandemia. A partir de junho, a curva sugere uma tendência de retorno a uma condição próxima à constatada em 2019. As linhas de tendência foram traçadas para facilitar a interpretação das curvas de série temporal de cada ano. Contudo, é importante ressaltar que as condições meteorológicas de cada ano também podem influenciar nas alterações de concentrações de poluentes no ar entre anos e por este motivo, esta foi uma análise inicial.

É importante ainda notar que, considerando os dois anos analisados, as séries apresentadas no Gráfico 1 também sugerem a existência de uma tendência de decaimento temporal nas concentrações de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica para ambos os anos, possivelmente associado a elementos sazonais.

Conforme Martins (1996), fatores meteorológicos e climáticos como velocidade e direção de vento, temperatura, umidade relativa, precipitação são determinantes na dispersão ou concentração de poluentes atmosféricos. Ainda, segundo Martins (2009) o vento é o primeiro mecanismo atmosférico de transporte.

O estudo realizado por Lorent *et al.* (2019) reportou o impacto das correntes de vento sob a área urbana de Paris. A distribuição espacial e concentração de NO<sub>2</sub> indicaram reduções e aumentos expressivos na direção, sentido e velocidade das correntes de vento no período monitorado. Seus resultados sugerem a associação entre as baixas concentrações NO<sub>2</sub> em colunas localizadas na região nordeste e altas na sudoeste com a presença de ventos de aproximadamente 32km/h predominantemente no sentido nordeste para sudoeste.

A presença de correntes de vento são fatores característicos em Minas Gerais no outono, iniciado em 20 de março. O Atlas Eólico de Minas Gerais (Amarante, 2010) demonstra a presença desses fatores em seus resultados de monitoramento de velocidade dos ventos, em que para algumas regiões do estado uma significativa variação (entre 7 e 10 m/s) nesse período.

Por outro lado, com as aplicações dos métodos estatísticos, diferenças significativas entre a série de 2019 e 2020 foram encontradas, evidenciando um possível impacto associado às medidas para controle da disseminação do COVID-19 nessa tendência sazonal no estado de Minas Gerais.

Na Tabela 1 encontram-se os testes estatísticos aplicados às séries temporais apresentadas no Gráfico 1. Os testes realizados consideraram um nível de significância de 5% (0,05). O resultado da análise de variância das médias dos dados entre 2019 e 2020 apresentou um p-valor de 0,0489 (inferior ao nível de significância), sugerindo que as diferenças das concentrações entre os dois anos são estatisticamente significativas. As premissas para realização da análise foram atendidas com o mesmo nível de significância.

**Tabela 1. Minas Gerais: Análise de variância (ANOVA) entre as concentrações médias semanais de NO<sub>2</sub> identificadas pelo S5P/TROPOMI no período de janeiro a junho de 2019 e 2020.**

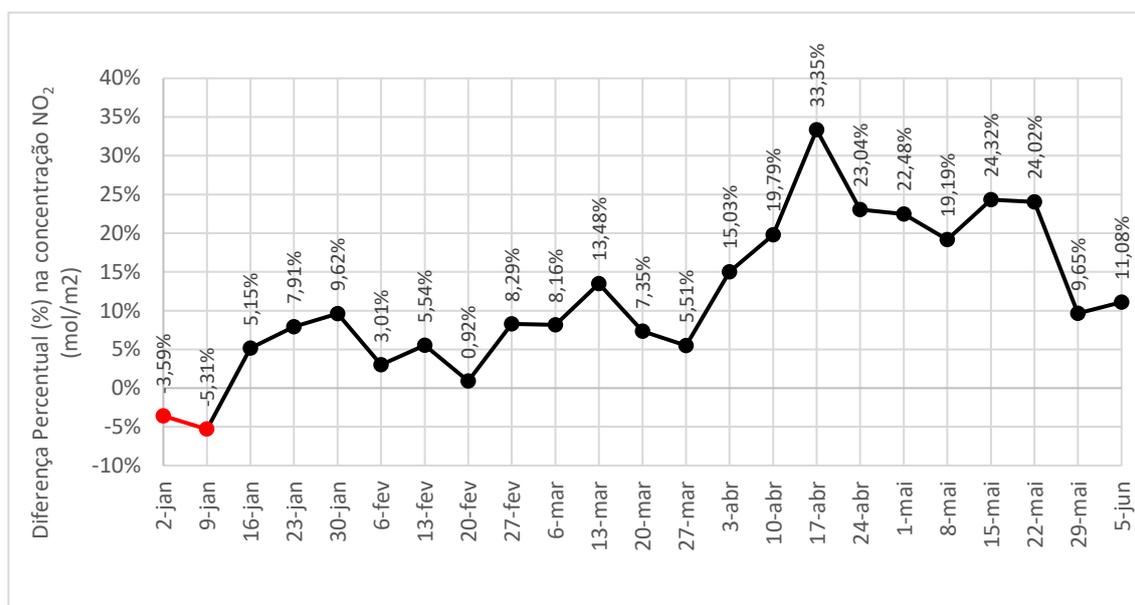
Shapiro-Wilk		Teste de Bartlett		ANOVA	
w	p-valor	w	p-valor	f	p-valor
0,8921	0,3930	1,1458	0,2844	6,067662	0,0489

Com isso, pode-se afirmar com segurança de 95% que as médias na concentração de NO<sub>2</sub> em Minas Gerais identificadas pelo S5P/TROPOMI em 2020 superaram o padrão de variação “normal” para o período (tendo como referência 2019). Isso reforça a hipótese de que as medidas para controle da disseminação do COVID-19 impactaram a concentração do poluente NO<sub>2</sub> na coluna troposférica sob o estado de Minas Gerais.

De janeiro a junho, a concentração média de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica sobre Minas Gerais foi aproximadamente 10% inferior em 2020 em comparação com 2019 (Gráfico 2). Nos meses de abril e maio a

redução média alcançou porcentagem próxima de 21%. O pico de redução ocorreu na semana de 17 a 24 de abril de 2020, em que a concentração média de NO<sub>2</sub> em Minas Gerais, identificada pelo S5P/TROPOMI, foi 33% inferior se comparada a 2019.

**Gráfico 2. Minas Gerais: Diferença percentual na tendência média semanal janeiro/junho da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica entre os anos de 2019 e 2020.**



Na Figura 3 são apresentadas as tendências das médias semanais das concentrações por Região de Desenvolvimento do estado de Minas Gerais, para 2019 (em laranja) e para 2020 (em azul). A área sombreada divide-se em anterior (área branca) e posterior (área cinza) à adoção das medidas emergenciais adotadas pelo Estado. Ressalta-se que, para estes dados, não foram realizados testes estatísticos de significância.

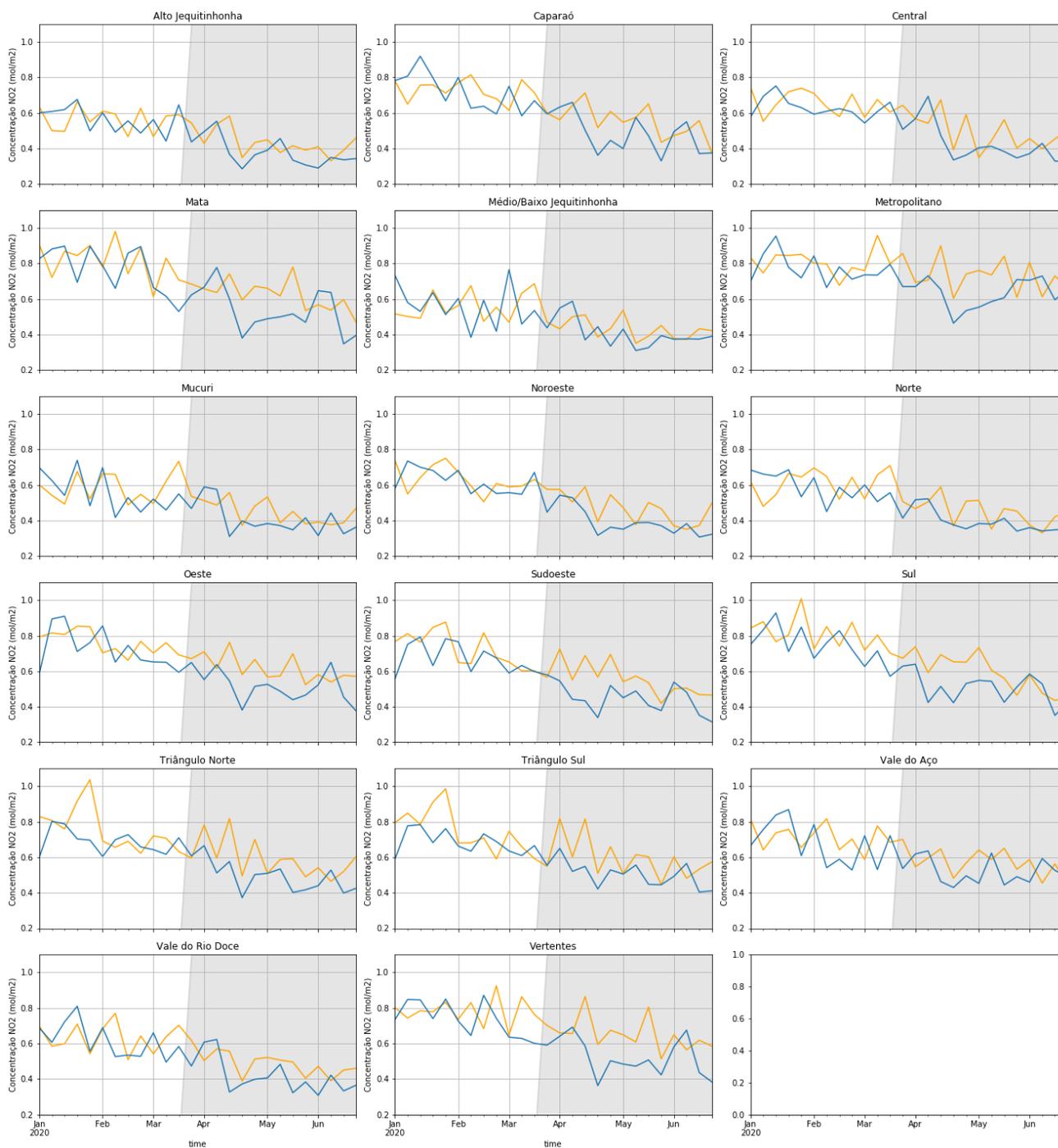
A tendência da evolução da qualidade do ar para NO<sub>2</sub> depende das atividades predominantes em cada uma das regiões. Assim, em regiões nas quais a contribuição de emissão de poluentes é majoritariamente originária de atividades industriais, é possível que a redução nas concentrações seja menos relevante, visto que não houve paralisação total dos empreendimentos deste ramo.

Porém, sabe-se que a pandemia afetou de forma distinta diferentes segmentos do mercado, sejam por razões relacionadas às questões operacionais, como diminuição de mão de obra com o atendimento de medidas de segurança adotadas, afastamento de trabalhadores pertencentes a grupos de risco, impossibilidade de trabalho remoto dependendo da função desempenhada, sejam por regulações decorrentes do próprio mercado, como diminuição de demanda.

Em contrapartida, para regiões de polo comercial e alto fluxo de pessoas, como é o caso da capital mineira, Belo Horizonte, espera-se um maior impacto na redução de emissão de poluentes atmosféricos, visto que a maior contribuição é proveniente de fontes veiculares.

Como observado na análise anterior, o período entre abril e maio foi o que apresentou maior diferença nas concentrações de NO<sub>2</sub> entre os dois anos analisados, para o estado de Minas Gerais. Ainda, como constatado pelas Figuras 1 e 2, as regiões onde usualmente foram identificadas as maiores concentrações deste poluente, foram também as regiões onde identificaram-se as maiores diminuições das concentrações de NO<sub>2</sub> após o período de adoção de medidas emergenciais de controle no ano de 2020 (Figura 3), que são: Metropolitano, Oeste, Vertentes, Mata, Sul, Sudoeste, Triângulo Norte e Triângulo Sul.

**Figura 3. Regiões de desenvolvimento de Minas Gerais: Tendência das médias semanais das concentrações de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica para 2019 (linha laranja) e 2020 (linha azul).**



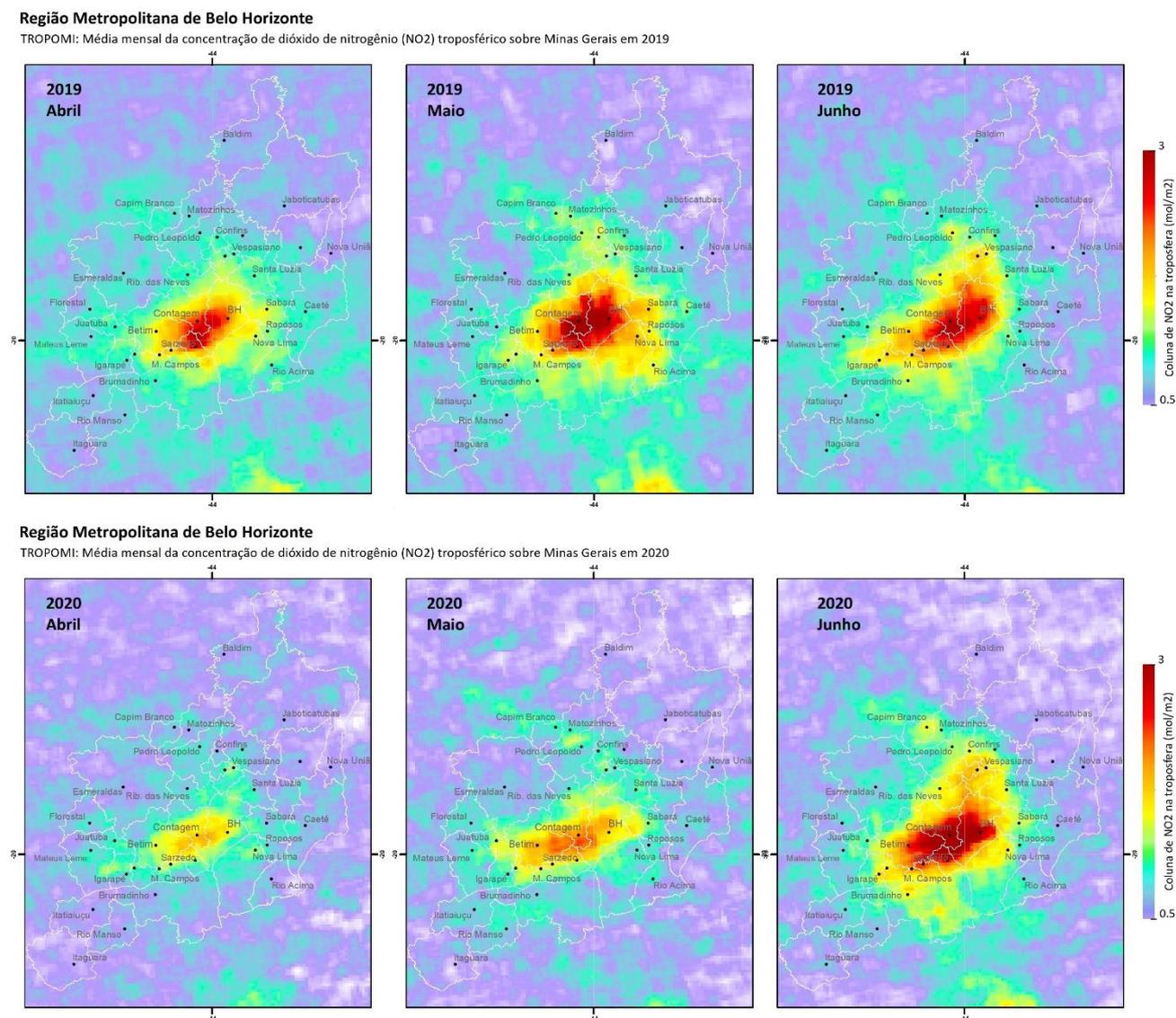
A Figura 4 faz um recorte da Região Metropolitana de Belo Horizonte (RMBH), a qual reforça a redução das concentrações de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica no período inicial de medidas emergenciais, com a identificação de diminuição da mancha vermelha (que representa valores mais elevados de concentrações) e também com uma diminuição do alcance da mancha amarela (valores intermediários).

Nas médias mensais do ano de 2019 foi observado um comportamento característico regional em quase toda RMBH, contudo, mais concentrado, na ordem de 3 mol/m<sup>2</sup>, na parte central onde localizam-se os municípios

de Betim, Contagem e Belo Horizonte, os quais possuem maior densidade populacional, fluxo de veículos e atividades industriais.

Em 2020, nos meses de maior intensidade das medidas de restrição de algumas atividades econômicas e a redução de fluxo de veículos, o monitoramento na parte central da RMBH apresentou uma concentração na ordem de 1,8 mol/m<sup>2</sup> para abril e 2,4 mol/m<sup>2</sup> para maio, o que corresponde a uma redução respectivamente de 40% e 20% em relação ao período de 2019 nessa região considerada mais crítica.

**Figura 4. Região Metropolitana de Belo Horizonte: Média mensal da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica em abril-maio-junho de 2019 e 2020.**

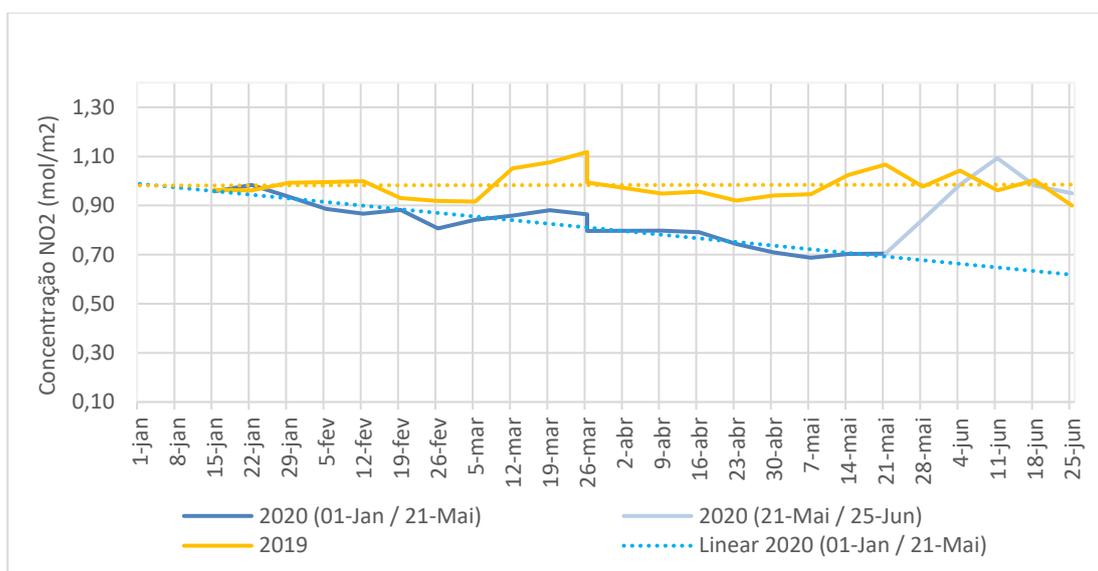


O Gráfico 3 apresenta as tendências das concentrações médias semanais de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica comparando os anos de 2019 e 2020 do período analisado. De forma geral, a evolução das concentrações para a RMBH seguiu comportamento similar ao do próprio Estado, com um aumento da amplitude entre as curvas com o decorrer da série, com uma tendência de retorno à situação “normal” a partir da última semana de maio.

As médias semanais na concentração de NO<sub>2</sub> no ano de 2020 apresentaram valores inferiores às de 2019 em quase todo o período analisado. Novamente, as linhas de tendência auxiliam na interpretação das curvas de série temporal de cada ano, que se aproximam em janeiro e distanciam-se com o decorrer das semanas.

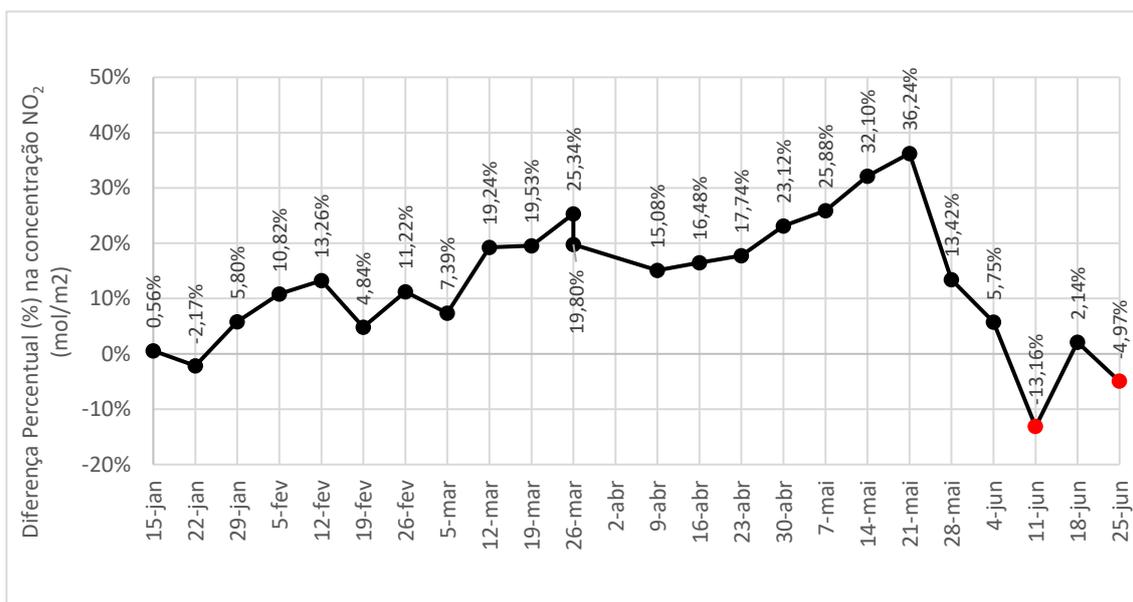
A partir da última semana de maio pode-se identificar uma alteração da série temporal, quando se inicia uma tendência de aumento da concentração de NO<sub>2</sub> estimada pelo S5P/TROPOMI. A partir desse momento, nota-se o restabelecimento dos padrões típicos para o período, tendo como referência a série de 2019. Importante mencionar que ocorreu uma flexibilização parcial em meados de maio e uma maior abertura em junho. A série temporal do S5P/TROPOMI para a região sugere que ocorreu o incremento na concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera como resultado desse padrão.

**Gráfico 3. RMBH: Tendência na média semanal janeiro/junho da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica nos anos de 2019 e 2020.**



Nesse período entre 01 de janeiro e 21 de maio de 2020, a concentração média de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica da RMBH alcançou uma redução máxima de aproximadamente 36% em 2020 em comparação com 2019 (Gráfico 4). A redução média em abril e maio foi de cerca de 23% nesta região. Em concordância ao padrão observado no Gráfico 3, a partir da semana de 11 de junho de 2020, iniciaram variações médias superiores ao mesmo período de 2019.

**Gráfico 4. RMBH: Diferença percentual na tendência média semanal janeiro/junho da concentração de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica entre os anos de 2019 e 2020.**



O resultado da análise de variância das médias dos dados entre 2019 e 2020 para a RMBH (Tabela 2) indicou a existência de diferenças estatisticamente significativas. Desta forma, pode-se afirmar, com segurança de 95%, que os dados de 2019 e 2020 se assemelham em comportamento, mas que há uma diferença significativa nos valores resultantes em cada ano, sendo as concentrações de 2020 significativamente menores em comparação com o ano de 2019.

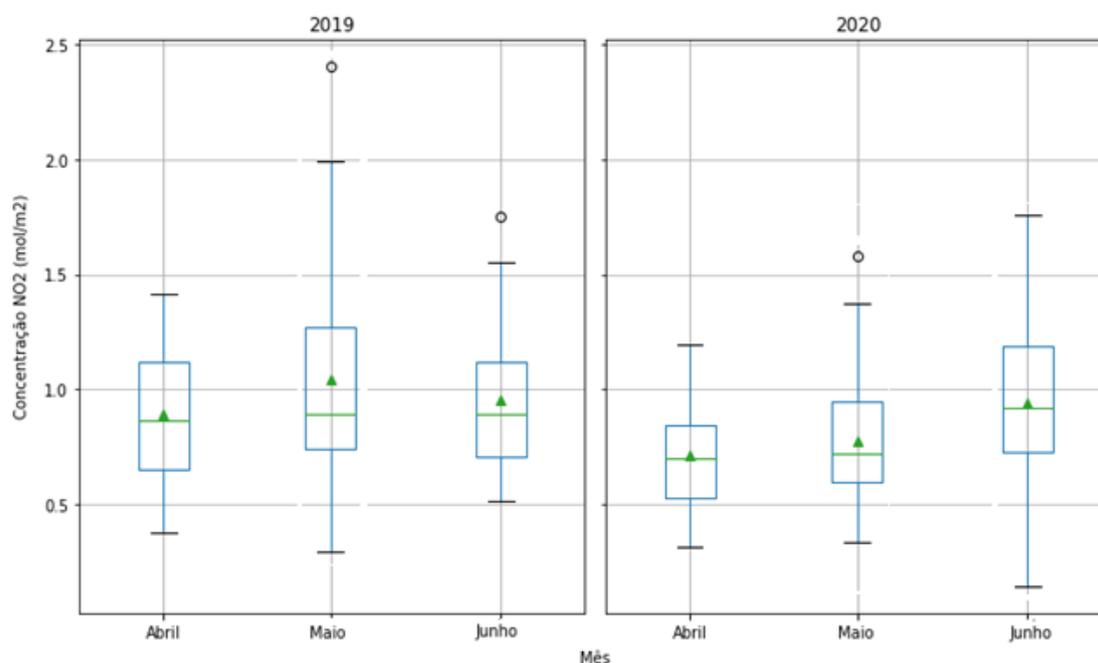
Assim como para a escala estadual, o resultado do teste estatístico reforça as evidências de que as medidas para controle da disseminação do COVID-19 resultaram na diminuição da concentração do poluente NO<sub>2</sub> majoritariamente provenientes de processos de combustão em fontes móveis e fixas na coluna troposférica na RMBH. Um impacto positivo na qualidade do ar e, conseqüentemente, na saúde da população.

**Tabela 2. RMBH: Análise de variância (ANOVA) entre as concentrações médias semanais de NO<sub>2</sub> identificadas pelo S5P/TROPOMI no período de janeiro a junho de 2019 e 2020.**

Shapiro-Wilk		Teste de Bartlett		ANOVA	
w	p-valor	w	p-valor	f	p-valor
0,9730	0,7039	1,3077	0,2528	11,5623	0,0013

Por fim, o Gráfico 5 apresenta a distribuição dos dados discutidos anteriormente. Em geral, observa-se para o ano de 2020 medidas de tendência central mais reduzidas do que de 2019, exceto para o mês de junho, em que estas apresentaram-se bastante próximas ao ano anterior. Também é possível notar que para este mês, em 2020, houve distribuição mais ampla das concentrações, indicando a flexibilização em parte do período e/ou em diferentes municípios.

**Gráfico 5. RMBH: Box-plot das concentrações médias diárias de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica identificadas pelo S5P/TROPOMI nos meses de abril, maio e junho de 2019 e 2020.**



#### 4. CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo analisar o impacto associado às medidas para controle da disseminação do COVID-19 nas tendências espaciais e temporais da concentração média do poluente NO<sub>2</sub> na atmosfera em Minas Gerais, a partir de dados orbitais.

Utilizando computação de alto desempenho para processamento e análise de 618 imagens com recobrimento espacial do estado, esse estudo identificou reduções significativas da concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera em Minas Gerais, nos meses de abril e maio de 2020, em comparação ao mesmo período de 2019. Essa tendência apresentou alta possibilidade de associação com as medidas de distanciamento social aplicadas a partir de março de 2020, com o objetivo de reduzir a disseminação do COVID-19.

O nível de redução identificado sugere que houve melhoria da qualidade do ar e, conseqüentemente, menor impacto na saúde da população mineira em decorrência de inalação de poluentes, para algumas regiões do Estado, sobretudo aquela residente nos grandes centros urbanos do estado. Entretanto, ressalta-se que os benefícios na saúde decorrentes da melhoria da qualidade do ar são constatados a longo prazo e devem ser baseados no monitoramento realizado em superfície, tendo em vista que para esse caso temos os padrões definidos na Resolução CONAMA nº 491/2018.

Na abrangência territorial da divisão administrativa do estado, no período entre janeiro e junho de 2020, foi identificada, a partir do sensor S5P/TROPOMI, uma redução na concentração média de NO<sub>2</sub> na coluna troposférica de, aproximadamente, 10% em comparação com o mesmo período de 2019. Nos meses de maior intensidade das medidas de controle, abril e maio de 2020, a redução média alcançou cerca de 21%, tendo na semana de 17 a 24 de abril o maior decréscimo percentual da série temporal, quando a concentração média semanal estimada foi 33% inferior a 2019.

Na região metropolitana de Belo Horizonte, que concentra quase 30% da população de Minas Gerais e a maior frota veicular desse estado, houve uma redução média, em abril e maio de 2020, de cerca de 23% da concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera.

Para uma avaliação mais consistente da relação entre concentração de poluentes na atmosfera e medidas de controle adotadas durante a pandemia, é necessária análise mais aprofundada que considere uma maior série temporal de dados, inventários de fontes de emissão industriais, informações sobre as alterações no quantitativo da produção e conseqüente impacto nas emissões atmosféricas, bem como estudo conjunto com as variáveis meteorológicas em cada período analisado.

Somente após a avaliação integrada de diferentes dados é possível compreender quais são os instrumentos a serem propostos, no âmbito da política pública, para a manutenção da melhoria da qualidade do ar, constatada a partir das medidas de distanciamento social. Contudo, o presente trabalho trouxe fortes indícios do impacto positivo na qualidade do ar em função da diminuição da circulação veicular nos centros urbanos.

Os resultados encontrados poderão ser utilizados na avaliação da potencialidade da tecnologia e sua adicionalidade de agregação ao monitoramento da qualidade do ar no âmbito do estado de Minas Gerais, e no estudo de fenômenos atmosféricos inseridos em diferentes escalas espaciais (local, regional ou global) e em determinada escala temporal.

De forma geral, o monitoramento da poluição ambiental pelos métodos de sensoriamento remoto da Terra é uma importante área de pesquisa em avanço para o desenvolvimento sustentável. Especificamente para a concentração de NO<sub>2</sub> na troposfera, devido ao curto ciclo de vida nessa camada da atmosfera, de horas a dias, e a distribuição não homogênea das fontes de emissão, a resolução espacial aprimorada do S5P/TROPOMI poderá auxiliar na distinção das variações na concentração em grandes áreas urbanas.

Conjuntamente a isso, a riqueza de informações disponíveis através dos produtos desse sensor oferece oportunidades potenciais de aprimorar o monitoramento da qualidade do ar em regiões remotas onde as medições em superfície são escassas.

No âmbito das competências institucionais da Fundação Estadual do Meio Ambiente, embora uma investigação mais aprofundada deva ser realizada para compreender como as estimativas por dados orbitais se relacionam com processos e padrões conhecidos, alguns benefícios potenciais podem ser citados, como a avaliação da eficácia a longo prazo de políticas públicas de redução de emissões atmosféricas estadual e uma visão em escala local e regional para uma melhor identificação da intensidade, evolução e a variabilidade espaço-temporal de gases traços e de aerossóis que afetam a qualidade do ar em Minas Gerais.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARANTE, O.A.C. Atlas eólico: Minas Gerais. Org. AMARANTE, O.A.C; SILVA, F.J.L.; ANDRADE, P.E.P. Belo Horizonte, MG: CEMIG, 2010.

BOERSMA, K.F.; ESKE, H.J.; BRINKSMA, J. Error analysis for tropospheric NO<sub>2</sub> retrieval from space. **Journal of Geophysical Research**. V. 109, fev. 2004.

BOERSMA, K. F.; ESKE, H. J.; RICHTER, A.; DE SMEDT, I.; LORENTE, A.; BEIRLE, S.; VAN GEFFEN, J. H. G. M.; ZARA, M.; PETERS, E.; VAN ROOZENDAEL, M.; WAGNER, T.; MAASAKKERS, J. D.; VAN DER A, R. J.; NIGHTINGALE, J.; DE RUDDER, A.; IRIE, H.; PINARDI, G.; LAMBERT, J. C.; COMPERNOLLE, S. C. Improving algorithms and uncertainty estimates for satellite NO<sub>2</sub> retrievals: results from the quality assurance for the essential climate variables (QA4ECV) project. **Atmospheric Measurement Techniques**, n. 11, p. 6651-6678, dez. 2018.

BRASIL. Resolução CONAMA Nº 491/2018, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.

GRIFFIN, D.; ZHAO, X.; MCLINDEN, C.A.; BOERSMA, F.; BOURASSA, A.; DAMMERS, E.; DEGENSTEIN, D; ESKE, H.; FEHR, F.; FIOLETOV, V.; HAYDEN, K.; KHAROL, S.K.; LI, S.; MAKAR, P.; MARTIN, R.V.; MIHELE, C.; MITTERMEIER, R.L.; KROTKOV, N.; SNEEP, M.; LAMSAL, L.N.; LINDEN, M.; GEFFEN, J.; VEEFKIND, P.; WOLDE, M. High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. **Geophysical Research Letters**, n. 46, p. 1049–1060, jan. 2019.

IALONGO, I.; VIRTA, H.; ESKE, H.; HOVILA, J.; DOUROS, J. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO<sub>2</sub> observations with ground-based measurements in Helsinki. **Atmospheric Measurement Techniques**. n. 13, p. 205-218, jan. 2020.

LORENTE, A.; BOERSMA, K.F.; ESKE, H.J.; VEEFKIND, J.P.; VAN GEFFEN, J.H.G.M.; ZEEUW, M.B.; DENIER VAN DER GON, H.A.C.; BEIRLE, S.; KROL, M.C. Quantification of nitrogen oxides emissions from build-up of pollution over Paris with TROPOMI. **Nature – Scientific Reports**. n. 9, p. 1-10, dez. 2019.

MARTINS, L. A. A Temperatura do Ar em Juiz de Fora – MG: Influência do Sítio e da Estrutura Urbana. – Departamento de Geografia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP – Rio Claro, 1996, 168p. Dissertação (Mestrado em Geografia).

MINAS GERAIS. Decreto nº 47.886, de 15 de março de 2020. Dispõe sobre medidas de prevenção ao contágio e de enfrentamento e contingenciamento, no âmbito do Poder Executivo, da epidemia de doença infecciosa viral respiratória causada pelo agente Coronavírus (COVID-19), institui o Comitê Gestor do Plano de Prevenção e Contingenciamento em Saúde do COVID-19 - Comitê Extraordinário COVID-19 e dá outras providências. Minas Gerais, Belo Horizonte, 15 de mar. 2020.

MINAS GERAIS. DELIBERAÇÃO DO COMITÊ EXTRAORDINÁRIO COVID-19 Nº 17, de 22 de março de 2020. Dispõe sobre medidas emergenciais de restrição e acessibilidade a determinados serviços e bens públicos e privados cotidianos, enquanto durar o estado de CALAMIDADE PÚBLICA em decorrência da pandemia Coronavírus – COVID-19, em todo o território do Estado. Minas Gerais, Belo Horizonte, 22 de mar. 2020

PORTAL DA INDÚSTRIA, 2020. Sondagem Industrial - Indústria continua se recuperando, mas impactos da pandemia seguem fortes. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/estatisticas/sondagem-industrial/>. Acesso em: jul.2020.

VEEFKING, J.P.; ABEN, I.; MCMULLAN, K.; FORSTER, H.; VRIES, J.; OTTER, G.; CLASS, J.; ESKEES, H.J.; HAAN, J.F.; KLEIPOOL, Q.; WREELE, M. VAN; HASEKAMP, O.; HOOGEVEEN, R.; LANDGRAF, J.; SNEL, R.; TOL, P.; INGMANN, P.; VOORS, R.; KRUIZINGA, B.; VINK, R.; VISSER, H.; LEVELT, P.F. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. **Remote Sensing of Environment**, n. 120, p. 70-83, fev. 2012.