



REGISTRO ESPACIAL E TEMPORAL DAS EMISSÕES SANITÁRIAS E CLIMÁTICAS DO TRANSPORTE URBANO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

Palavras-Chave: Monitoramento do ar, sensores, calibração.

Autores:

Antônio Moreira Maximo dos Santos [Unicamp]

Prof. Dr. Pedro José Perez Martinez (orientador) [Unicamp]

INTRODUÇÃO:

A poluição atmosférica causada por emissões veiculares se mostra como um problema grave, a impactar negativamente a saúde da população e a qualidade do ar. Para orientar o combate dessa problemática, a Região Metropolitana de São Paulo conta com o monitoramento do ar realizado pela **Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)**, a qual dispõe de diferentes estações fixas ao longo da região e registra os dados no Sistema de informações de qualidade do ar (QUALAR).

Para difundir o monitoramento da qualidade do ar, este projeto busca validar um modelo de registro de emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos tóxicos, baseados no modelo TransCAD, com uma resolução espacial e temporal de 0,5 km e 1 h, respectivamente, pelo uso de sensores de baixo custo, denominados NOTS, desenvolvidos pelo Prof. Dr. Pedro José Pérez-Martínez, em conjunto com técnicos de laboratório da Universidade Estadual de São Paulo especializados em eletrônica, e instalados na Região Metropolitana de São Paulo. Com a validação dos NOTS, torna-se possível o fornecimento de uma base alternativa de dados do ar a qual facilite a identificação de pontos críticos de má qualidade do ar e que assista no estabelecimento de políticas de mudanças climáticas na área de transportes, de saúde pública e planejamento urbano.

METODOLOGIA:

Atualmente, o monitoramento do ar realizado pela CETESB encontra-se disponível via *web*, pelo QUALAR, sistema criado em 2009. Para o projeto, as informações fornecidas pelo sistema serviram como base confiável de dados, especificamente, dos seguintes parâmetros: partículas inaláveis (MP_{10}), partículas inaláveis finas ($MP_{2,5}$), ozônio (O_3), dióxido de nitrogênio (NO_2), monóxido de nitrogênio (NO), dados em micrograma por metro cúbico; monóxido de carbono (CO), em parte por milhão; temperatura (TEMP), em graus Celsius e umidade relativa do ar (UR), em porcentagem. Foram utilizados os relatórios de dados horários, fornecidos em arquivo *Excel*.

Os NOTS foram desenvolvidos com os sensores fornecidos pela marca *Alphasense*, de empresa localizada no Reino Unido, sensores utilizados em diversas pesquisas, como as realizadas por **Di Antonio et al. (2019)**, **Bartonova et al. (2018)** e **Lad et al. (2018)**. Foram desenvolvidos 10 sensores NOTS, nominados numericamente, os quais abrangem o monitoramento de CO_2 , CO , NO_2 , NO , O_x , material particulado (MP) nas frações MP_1 , $MP_{2,5}$ e MP_{10} , temperatura e umidade relativa. A cada minuto, aproximadamente, os dados atmosféricos e de emissões veiculares próximas são registrados pelos sensores e são armazenados em um minicomputador *Raspberry*. Tais dados podem ser transferidos diretamente para um computador, através da leitura do cartão

de memória, ou enviados através da tecnologia *Bluetooth* ou *Wireless Ethernet*. A Figura 1 apresenta a montagem do primeiro protótipo do sensor.

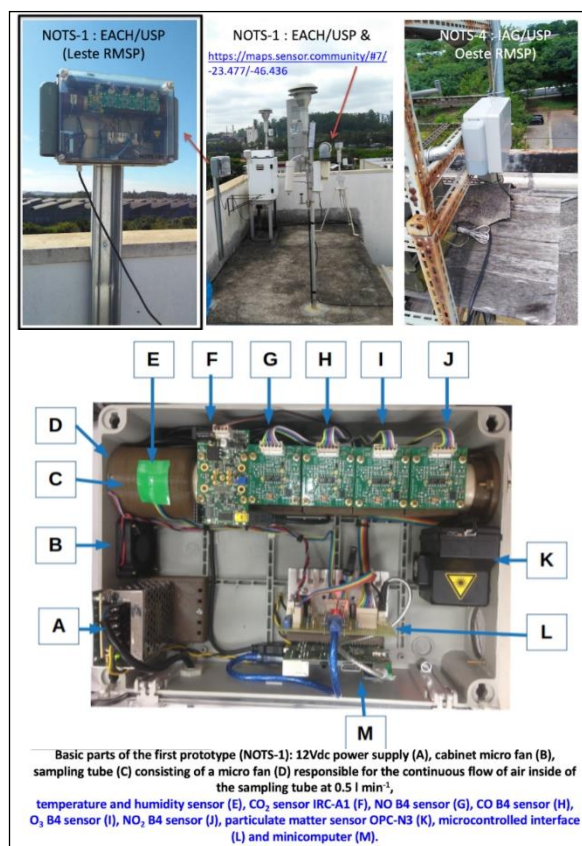


Figura 1 - Montagem do sensor NOTS.

Fonte: Novo mapeamento espacial de alta resolução de emissões de saúde e clima do transporte urbano na megacidade de São Paulo (NOTS) (2019).

Os sensores de CO, NO₂, NO e O_x fornecem as concentrações de gases na atmosfera por meio de eletrodos de trabalho (*SWE*) e eletrodos auxiliares (*SAE*), na grandeza de mili volt. Nos eletrodos de trabalho há um deslocamento da linha base devido a mudança de temperatura, além de um sinal adicional referente à concentração do gás específico que está sendo analisado pelo sensor. Já nos eletrodos auxiliares, expostos às mesmas condições atmosféricas, o deslocamento ocorre apenas devido a mudança de temperatura, logo, a subtração **SWE - SAE** oferece uma saída compensada, proporcional apenas à concentração do gás. Os sensores de CO₂ geram concentrações de gás em absorbância, enquanto os sensores de Temperatura, Umidade e Material Particulado fornecem os dados em graus Celsius, porcentagem e micrograma por metro cúbico, respectivamente. Para os parâmetros fornecidos em mili volts torna-se necessária a conversão dos dados para grandezas que se comuniquem diretamente com concentrações de material ou gases e conseqüentemente, com os impactos das emissões do transporte urbano. Para ajuste e calibração dos sensores, foi utilizado o método de regressão linear múltipla, o qual consiste

na correlação matemática entre diferentes fatores, sendo uma variável dependente, e uma ou mais variáveis independentes, como indicado na Figura 2. Tal método pode ser desenvolvido em diversos softwares, para este projeto fez-se uso do *Excel*.

As concentrações atmosféricas horárias registradas pelo sistema QUALAR foram utilizadas como variáveis dependentes, visto que indicam valores oficiais e confiáveis, enquanto a média horária dos dados coletados pelo sensor NOTS, como variáveis independentes, exigindo-se que exista certa proximidade física entre a estação da CETESB e o sensor de baixo custo em análise. Quando o ajuste estatístico entre as variáveis escolhidas demonstrou um ser um modelo validado, tomou-se então conhecimento das constantes e do termo erro do sensor (calculados pelo *Excel*), o que permite que o NOTS seja calibrado e utilizado em outro local, de maneira independente ao sistema QUALAR.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \chi_{1i} + \beta_2 \chi_{2i} + \dots + \beta_k \chi_{ki} + u_i$$

Diagram illustrating the multiple linear regression equation. The dependent variable Y is shown in a red box. The constant β_0 is in a purple box. The independent variables $\chi_{1i}, \chi_{2i}, \dots, \chi_{ki}$ are in green boxes. The coefficients $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ are in orange boxes. The error term u_i is in a blue box. Labels indicate: 'Variável dependente' (red), 'Variáveis independentes' (green), 'Constante' (purple), 'Coeficientes das variáveis independentes' (orange), and 'erro' (blue).

Figura 2 - Equação de regressão linear múltipla. Fonte: Regressão Linear Múltipla (2019).

De acordo com **Fossatti, Berti e Manosso (2019, pg. 25-28)**, algumas das características para a análise da qualidade de uma regressão linear múltipla adequada são: quanto mais próximo “R múltiplo” e “R² múltiplo” estiverem de 1, maior será a correlação entre variáveis; O “F de significação” precisa ser menor que 0,005 para o modelo ser validado e o “valor-P” precisa ser menor que 0,05 para validar a significância de uma variável independente (em grau de confiança igual a 95%). Foi avaliada a correlação entre os dados brutos do sensor por meio da descoberta

dos índices de correlação de Pearson, com cálculo realizado em *Excel* e com determinações definidas por **Hair et. al (2009)**: índices entre |0,6| e |1| apresentam correlação forte, e de |0,59| a |0,01|, fraca. Tal descoberta, encaminhou a testagem de quais dados dos sensores se correlacionam da melhor forma com os dados do parâmetro em análise. Deste modo, buscou-se atingir um modelo de regressão que apresentasse o melhor resultado possível.

A comparação temporal dos resultados obtidos pelo ajuste e calibração do NOTS com as concentrações oficiais da CETESB foi feita de maneira gráfica por meio do *Excel*, e para auxiliar o estudo, foram utilizados gráficos de dispersão que permitem a visualização da qualidade do ajuste estatístico. Utilizou-se dos dados de maio/2020 a setembro/2020 do sensor NOTS4, localizado no telhado do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências (USP), e das estações CETESB localizadas na Cidade Universitária USP (Ipen) e em Pinheiros, indicadas no mapa da Figura 3.

Levando em conta a variação da sensibilidade dos sensores NOTS ao longo do tempo, adotou-se uma vida útil de calibração dos sensores de aproximadamente um mês: os 15 dias iniciais para a coleta de dados e ajuste estatístico e calibração dos NOTS, e os 15 dias sucessores para o uso independente do NOTS, havendo perda da qualidade da calibração após terminado esse período. Além disso, assim como **Di Antonio et al. (2019)**, ao escolher-se o espaço temporal para realização do ajuste e calibração dos sensores, os dados de aproximadamente 1/3 desse espaço foram destinados à aplicação da regressão, e os outros 2/3 para validação do sistema de regressão obtido.



Figura 3 - Mapa da localização das estações CETESB e NOTS4.

Fonte: CETESB, Google MyMaps Adaptado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

O resultado do cálculo dos índices de Pearson considerando-se os dados de maio a setembro dos eletrodos de trabalho e auxiliares separadamente, está presente na Tabela 1. Os índices grifados em vermelho e verde indicam correlações fortes negativas e fortes positivas, respectivamente, enquanto os grifados em tonalidades mais claras das mesmas cores, correlações fracas.

	CO2_abs	Temp_°C	Humid_%	Ox(WE)_mV	Ox(AE)_mV	NO2(WE)_mV	NO2(AE)_mV	CO(WE)_mV	CO(AE)_mV	NO(WE)_mV	NO(AE)_mV	TOPC_°C	PM1_µg/m3	PM2.5_µg/m3	PM10_µg/m3	
CO2_abs	1,0000															
Temp_°C	-0,9122	1,0000														
Humid_%	0,8178	-0,8488	1,0000													
Ox(WE)_mV	0,0340	-0,1673	0,1831	1,0000												
Ox(AE)_mV	0,6602	-0,7484	0,7396	0,0268	1,0000											
NO2(WE)_mV	0,5933	-0,7383	0,7003	0,3831	0,7448	1,0000										
NO2(AE)_mV	0,5754	-0,6989	0,6851	0,0250	0,9321	0,8096	1,0000									
CO(WE)_mV	0,2878	-0,1367	0,1893	-0,0446	0,2281	0,3079	0,2109	1,0000								
CO(AE)_mV	0,6155	-0,6648	0,6272	-0,1041	0,5985	0,4136	0,5766	0,0081	1,0000							
NO(WE)_mV	-0,5573	0,7789	-0,6839	-0,4333	-0,6389	-0,8342	-0,6774	0,1565	-0,4785	1,0000						
NO(AE)_mV	-0,7124	0,8621	-0,7779	-0,2441	-0,8233	-0,9203	-0,8601	-0,1980	-0,5659	0,8828	1,0000					
TOPC_°C	-0,9251	0,9916	-0,8237	-0,1573	-0,7364	-0,7398	-0,6906	-0,1394	-0,6483	0,7729	0,8555	1,0000				
PM1_µg/m3	0,3067	-0,2187	0,2600	-0,0705	0,2105	0,1502	0,1615	0,2961	0,1105	-0,0338	-0,1493	-0,2237	1,0000			
PM2.5_µg/m3	0,3135	-0,2188	0,2520	-0,0687	0,2062	0,1496	0,1552	0,2722	0,1095	-0,0347	-0,1489	-0,2282	0,8559	1,0000		
PM10_µg/m3	0,3513	-0,2329	0,2095	-0,0881	0,2142	0,1775	0,1643	0,3609	0,0742	-0,0017	-0,1552	-0,2591	0,7845	0,8905	1,0000	

Tabela 1 - Índices de Pearson com eletrodos individuais.

Fonte: Acervo Próprio.

Com a aplicação das regressões lineares, foram obtidos diferentes modelos de equação válidos para ajuste e calibração dos sensores. A Equação 1 e a Figura 4 apresentam os resultados satisfatórios do processo para o parâmetro ozônio, com a utilização dos dados do sensor NOTS4 e da estação CETESB Cid. Universitária USP, e a Equação 2 e Figura 5, para parâmetro monóxido de carbono, com dados da estação CETESB Pinheiros.

$$[O_3]_{\text{ambiente}} = c_0 + c_1 * [CO_2] + c_2 * [Temp.] + c_3 * [O_x(WE)] + c_4 * [O_x(AE)] + c_5 * [NO_2(WE)] + u \quad [1]$$

$$[\text{CO}]_{\text{ambiente}} = c_0 + c_1 \cdot [\text{CO}_2] + c_2 \cdot [\text{Umid.}] + c_3 \cdot [\text{NO}_2(\text{AE})] + c_4 \cdot [\text{CO}(\text{WE})] + c_5 \cdot [\text{CO}(\text{AE})] + c_6 \cdot [\text{MP}_1] + c_7 \cdot [\text{MP}_{2.5}] + c_8 \cdot [\text{MP}_{10}] + u \quad [2]$$

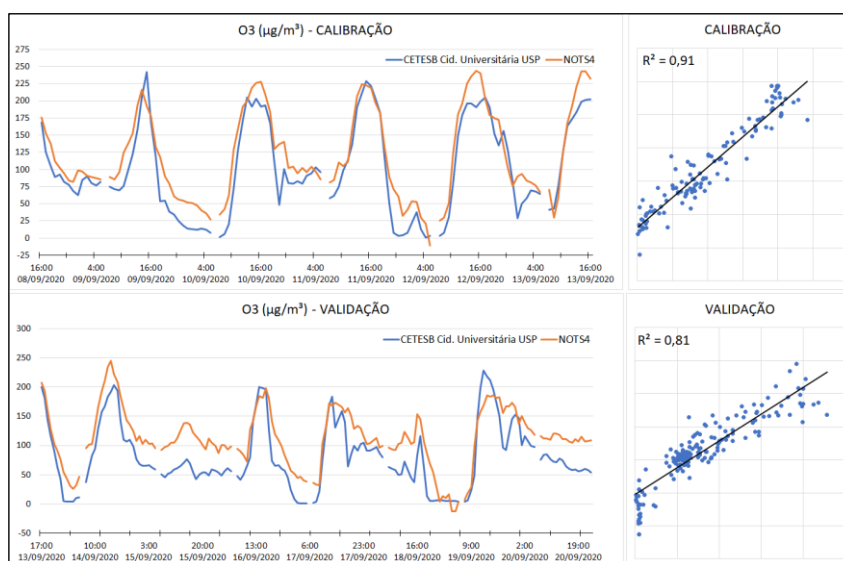


Figura 4 - Calibração O₃ - NOTS4 (08/09/2020 a 20/09/2020)
Fonte: Acervo Próprio.

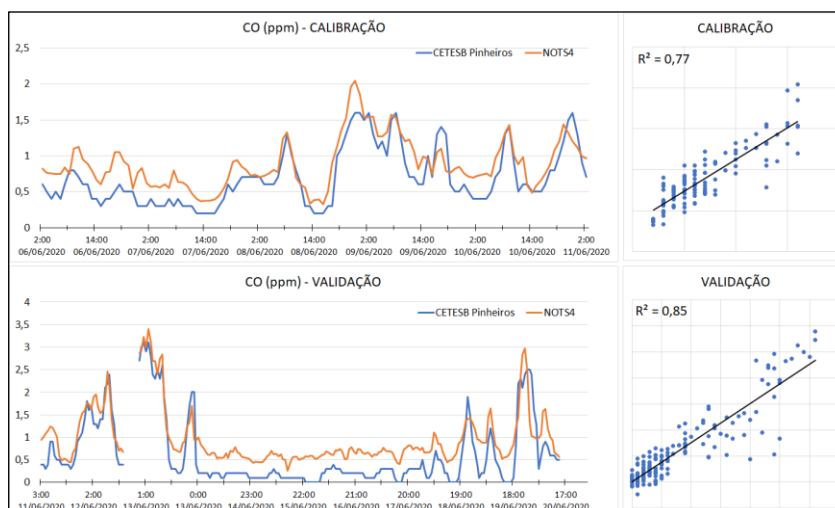


Figura 5 - Calibração CO - NOTS4 (06/06/2020 a 21/06/2020)
Fonte: Acervo Próprio.

CONCLUSÕES:

A testagem de diferentes modelos de regressão linear demonstrou que, para cada período e poluente estudado, o melhor resultado foi obtido considerando-se os dados de saída dos eletrodos de trabalho e o dos eletrodos auxiliares separadamente. Em geral, os parâmetros apresentaram uma grande aplicabilidade no ajuste estatístico por meio uso de regressões lineares múltiplas, com destaque para CO e O₃, a validar-se a possibilidade do uso dos sensores de maneira independente para criação de registros de emissões desses gases pelo transporte urbano.

BIBLIOGRAFIA

ATKINSON, Roger. Atmospheric chemistry of VOCs and NO_x. In: **Atmospheric Environment**. v. 34. 2000. p. 2063-2101. Disponível em: http://joenschem.com/yahoo_site_admin/assets/docs/atkinson2000r.93190106.pdf. Acesso em: 9 mar. 2021.

BARTONOVA, Alena *et al.* Node-to-node field calibration of wireless distributed air pollution sensor network. In: **Environmental Pollution**. v. 233. 2018. p. 900-909. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749117311818>. Acesso em: 9 mar. 2021.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Histórico**. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/>. Acesso em: 10 mar. 2021.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Mapa da Qualidade do Ar**. São Paulo. Disponível em: <https://servicos.cetesb.sp.gov.br/qa/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Sistema de Informações de Qualidade do Ar**. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/qualar/>. Acesso em: 12 mar. 2021.

CONCEIÇÃO, Gleice M. S.; SINGER, Julio M.; SALDIVA, Paulo H. N. Modelos MLG e MAG para análise da associação entre poluição atmosférica e marcadores de morbi-mortalidade: uma introdução baseada em dados da cidade de São Paulo. In: **Revista Brasileira de Epidemiologia**. v. 3. São Paulo. 2001. p. 206-219. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbepid/v4n3/07.pdf>. Acesso em: 18 mar. 2021.

Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar**. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/51058895. Acesso em: 12 mar. 2021.

Departamento de Astronomia, IAG. **Início das estações do ano (2005–2020)**. Disponível em: <https://www.iag.usp.br/astrologia/inicio-das-estacoes-do-ano>. São Paulo. Acesso em: 18 mar. 2021.

DI ANTONIO, Andrea *et al.* Characterising low-cost sensors in highly portable platforms to quantify personal exposure in diverse environments. In: **Atmospheric Measurement Techniques** v. 12 ed. 8. 2019. p. 4643-4657 Disponível em: <https://amt.copernicus.org/articles/12/4643/2019/>. Acesso em: 9 mar. 2021.

FOSSATTI, Emanuelle C.; BERTI, Sandra M.; MANOSSO, Thayane W. S. **Regressão Linear Múltipla: Como simplificar por meio do Excel e SPSS?**. Passo Fundo. Universidade de Passo Fundo. 2019. Disponível em: https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/texto-01-2019.pdf. Acesso em: 10 fev. 2021.

Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Qualidade do Ar**. Minas Gerais. Disponível em: <http://www.feam.br/qualidade-do-ar/qualidade-do-ar>. Acesso em: 16 mar. 2021.

HAIR, Joseph F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman. 2009.

Instituto Estadual do Ambiente. **Qualidade do Ar**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/monitoramento-da-qualidade-do-ar-e-meteorologia/>. Acesso em: 16 mar. 2021.

LAD, Chetan *et al.* Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. In: **Atmospheric Environment**. v. 194. 2018. p. 58-70. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231018306241>. Acesso em: 9 mar. 2021.

METROCLIMA. **Sobre: Projeto Metroclima**. São Paulo. Disponível em: <http://www.metroclima.iag.usp.br/about/>. Acesso em: 20 mar. 2021.

PÉREZ-MARTÍNEZ, Pedro J. **Novo mapeamento espacial de alta resolução de emissões de saúde e clima do transporte urbano na megacidade de São Paulo (NOTS)**. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo. 2019.