



FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA

XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Método de mapeamento de ruído de tráfego rodoviário em áreas urbanas utilizando o software QGIS.

PEIXOTO, N.G.M.¹; AZEVEDO FILHO, M.A.N.².

¹ Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil, nara.peixoto@usp.br;

² Departamento de Engenharia de Transportes, Fortaleza, CE, Brasil, azevedo@det.ufc.br

Resumo

Os mapas estratégicos de ruído fornecem informações sobre esses níveis sonoros, o que fomenta o desenvolvimento de estudos epidemiológicos e planos preventivos e de controle de ruído. Para formulação dos mapas, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) vem sendo utilizados como alternativa aos softwares especializados devido a integração com base de dados e velocidade de compartilhamento e atualização de ferramentas. O objetivo desse estudo é propor um procedimento de modelagem do ruído rodoviário em áreas urbanas utilizando software livre QuantumGIS (QGIS). O desempenho foi comparado com o software comercial Cadna-A utilizando o modelo de cálculo RLS90. Para avaliar a aplicabilidade em diversos contextos urbanos, foram criados 192 locais hipotéticos através da combinação de parâmetros que influenciam a modelagem. Como resultados, foi obtida boa adequabilidade dos dados, com R^2 0,997, erro médio -0.06 dB(A) e 98,3% dos erros menores que 1 dB(A). Por outro lado, houve menor assertividade em vias com baixo volume de veículos e enviesamento dos erros quando analisados parâmetros altimétricos. Isso pode estar relacionado a limitação da modelagem 2D do procedimento, que negligencia efeitos de difração da onda sonora. Devido aos baixos erros, as diferenças são apenas perceptíveis em regiões do mapa com complexa geometria dos elementos simulados. Assim, o procedimento proposto pode ser uma ferramenta eficaz na elaboração de mapas estratégicos de ruído de tráfego rodoviário em meio urbano.

Palavras-chave: Ruído de tráfego, Mapeamento de ruído, Impacto Ambiental, SIG, Morfologia urbana.

PACS:

Method for noise mapping of road traffic in urban areas using open data GIS.

Abstract

The Strategic noise map provide information about sound levels, which promotes the development of epidemiological studies and preventive noise control plans. Geographic Information Systems (GIS) have been used for noise mapping as an alternative to specialized software, due to better integration with different databases and facilities of sharing and updating tools. The objective of this study is to propose a procedure for modeling traffic noise in urban areas using the open-source software Quantum GIS (QGIS). This procedure was compared with the software Cadna-A using the RLS90 model. To assess the applicability in other urban contexts, 192 hypothetical sites were created through the combination of parameters that influence the modeling. As result, good data adequacy was obtained with R^2 0.997 when comparing QGIS and Cadna-A. The mean difference between the software's results was 0.06 dB and 98.3% of the values were smaller than 1 dB. On the other hand, there was a bias in errors when analyzing altimetric parameters and less assertiveness was found on roads with low traffic volume. This may be related to the limitation of the 2D modeling of the procedure, which neglects the diffraction effects of the sound wave propagation. Due to the low error levels, the differences are only noticeable in regions of the map with complex geometry of the simulated elements. Thus, considering some limitations, the proposed procedure can be an effective tool in the provision of strategic noise maps in urban environments.

Keywords: Traffic noise; Noise map; Environmental impact; GIS; Urban morphology.



1. INTRODUÇÃO

Os Mapas Estratégicos de Ruído (MER) são importantes ferramentas que fornecem informações sobre os níveis de ruído urbano à população, aos técnicos e aos gestores. Os níveis sonoros são representados através de curvas isofônicas com valores expressos em dB, podendo representar situações existentes ou previstas. Isso permite a compreensão dos efeitos de alterações no sistema de transportes e uso do solo, como impactos decorrentes da implantação de novas vias [1], alterações no gabarito de edificações [2], e mudanças nas condições de tráfego [3]. Esses dados fomentam o desenvolvimento de planos preventivos, corretivos ou de acompanhamento de estratégias de controle de ruído.

A maioria dos mapeamentos sonoros utiliza *softwares* comerciais especializados na predição de ruído ambiental. Os mais utilizados são Soundplan, Cadna-A e Predictor, que apresentam resultados semelhantes e têm sido validados mundialmente [4]. Com interface simples e alto desempenho, podem trazer modelos determinísticos de simulação de ruído como CNOSSOS, RLS90 e NMPB. Por outro lado, não possibilitam a inserção de modelos estocásticos mais eficientes e adaptados às condições de cada localidade. Isso porque os programas dependem de um grupo restrito de colaboradores, o que limita a velocidade de atualização de ferramentas em cada versão. Além disso, a grande quantidade de dados requeridos na modelagem urbana faz necessária a utilização de dados importados de outras bases de informação, o que aumenta a complexidade do processo.

Como alternativa a essas limitações, os programas SIG de código aberto estão sendo cada vez mais utilizados [5]. A vantagem do SIG é permitir armazenar, analisar e manipular diferentes tipos de dados espaciais, proporcionando uma integração direta com diversos tipos de dados. Em sistemas SIG de acesso aberto, a evolução da tecnologia é mais rápida e é acompanhada do compartilhamento de dados com cidadãos e planejadores urbanos através de serviços geográficos distribuídos na Internet, como as plataformas de Infraestrutura

de Dados Espaciais. Nos SIGs livres, que não envolvem custos para sua utilização, uma rede de colaboradores auxilia usuários sobre dúvidas decorrentes da operação desses sistemas. Assim, a utilização de SIGs livres adiciona transparência aos processos, o que é fundamental no planejamento das cidades. Como desvantagem, os procedimentos atuais em SIG adotam premissas que podem causar erros maiores que os aceitáveis, como a modelagem 2D ao invés da 3D e a desconsideração de efeitos de difração e reflexão da onda sonora.

O programa mais utilizado é o ArcGIS que, embora seja também um *software* comercial, possui ferramentas de visualização espacial como o ArcView [6], ArcScene e ArcMap [7]. *Softwares* livres como o QuantumGIS (QGIS) e o OrbisGIS também possuem plugins desenvolvidos em estudos acadêmicos, como o Openoise [8], e o Noisemodelling [9], respectivamente.

O objetivo desse artigo é apresentar a proposta de um procedimento simplificado de modelagem do ruído em áreas urbanas utilizando *software* livre de geoprocessamento. Foi utilizado o *software* QGIS e seu desempenho foi comparado com o Cadna-A utilizando o modelo RLS90. Os dados foram testados em locais hipotéticos criados através das combinações dos parâmetros que influenciam a modelagem de ruído urbano. Isso possibilitou a mensuração das limitações do procedimento proposto e a viabilidade de implementação em diversos contextos urbanos.

2. METODOLOGIA

O *software* QuantumGIS (QGIS) é um SIG de código aberto disponível para os principais sistemas operacionais atualmente disponíveis. Ele suporta dados espaciais do tipo vetor (linhas, pontos ou polígonos) e raster (conjunto de pixels). Os dados vetoriais, em formato shapefile (SHP), também acompanham dados alfanuméricos, que são os atributos de cada elemento da camada vetorial. Esses dados podem ser importados e exportados para o formato *Comma-separated values* (CSV) ou editados no próprio arquivo através da tabela de

atributos. Também é permitida a interação direta com a linguagem Python através do console PyQGIS, o que facilita realizar processamentos em série, desenvolver e executar novos comandos.

Para a modelagem no procedimento proposto, devem ser inseridas no QGIS camadas que representam os principais elementos urbanos, como vias de tráfego, edificações e semáforos (Quadro 1). A partir desse modelo são exportados os dados georreferenciados de cada camada, em formato SHP, seguindo a nomenclatura indicada. Também devem ser exportados os dados alfanuméricos da camada “vias”, em formato CSV, o que facilita a atualização de um grande volume de dados. Esse arquivo CSV deve ter o nome “Fluxos” e cada coluna da tabela de atributos da camada “vias” deve ter a nomenclatura indicada no Quadro 2.

Esses dados são utilizados nos 5 módulos executados em linguagem Python e descritos na próxima sessão. Como arquivo de saída, o algoritmo gera um arquivo em CSV contendo os pontos receptores com valor LAeq (Figura 1). Esse arquivo deve ser importado para o QGIS para que seja executada a interpolação espacial. Ao final do processo, o mapa é gerado em Raster e pode ser exportado em formato de imagem como o TIFF, dentre outros.

As principais diferenças entre o procedimento proposto e o *software* comercial Cadna-A são vinculadas ao nível de detalhamento geométrico dos elementos que integram o ambiente de simulação. No procedimento proposto, as edificações são simplificadas como polígonos que representam os limites dos lotes ou das quadras urbanas, o que gera uma limitação quanto ao detalhamento de barreiras e muros. Isso dificulta a análise dos efeitos da difração e da transmissão da onda sonora, inviabilizando a análise dos níveis de ruído internamente às quadras. Assim, os níveis LAeq em edificações só podem ser calculados nos limites dos lotes, que podem ou não coincidir com as fachadas. Além dessa limitação, os dados altimétricos dos elementos urbanos não são considerados, embora alguns autores abordem essa possibilidade [10].

Quadro 1: Camadas vetoriais no QGIS.

Título da camada	Tipo de shapefile	Descrição dos elementos
vias	Linha	Vias de tráfego
edificacao	Poligono	Edificações e barreiras
contorno	Polígono	Área limite do mapa de ruído
semaforo	ponto	Semáforos

Quadro 2: Elementos urbanos na base de dados do QGIS na camada vias.

Nome da coluna	Descrição dos elementos
nome	Nome da via
Fluxo-leve	Fluxo horário de veículos leves
Fluxo-pesado	Fluxo horário de veículos pesados
Fluxo-moto	Fluxo horário de motos
vel	Velocidade média dos veículos
inclinacao	Inclinação da via
altura	Altura média das edificações ao longo da via
largura	Largura da via
pav	Tipo de pavimento

Outras limitações da modelagem estão vinculadas aos modelos de emissão e propagação sonora, que possuem premissas que podem limitar seu uso em alguns contextos. Nesse estudo foi utilizado o modelo RLS90, que era o único na versão disponível do Cadna-A. Esse modelo apresenta categorias de veículos leves (automóveis e motocicletas) e pesados (veículos com mais de 2,8 ton). Em caso de utilização de outros modelos, podem ser inseridos as equações nos módulos 2 e 3 (Figura

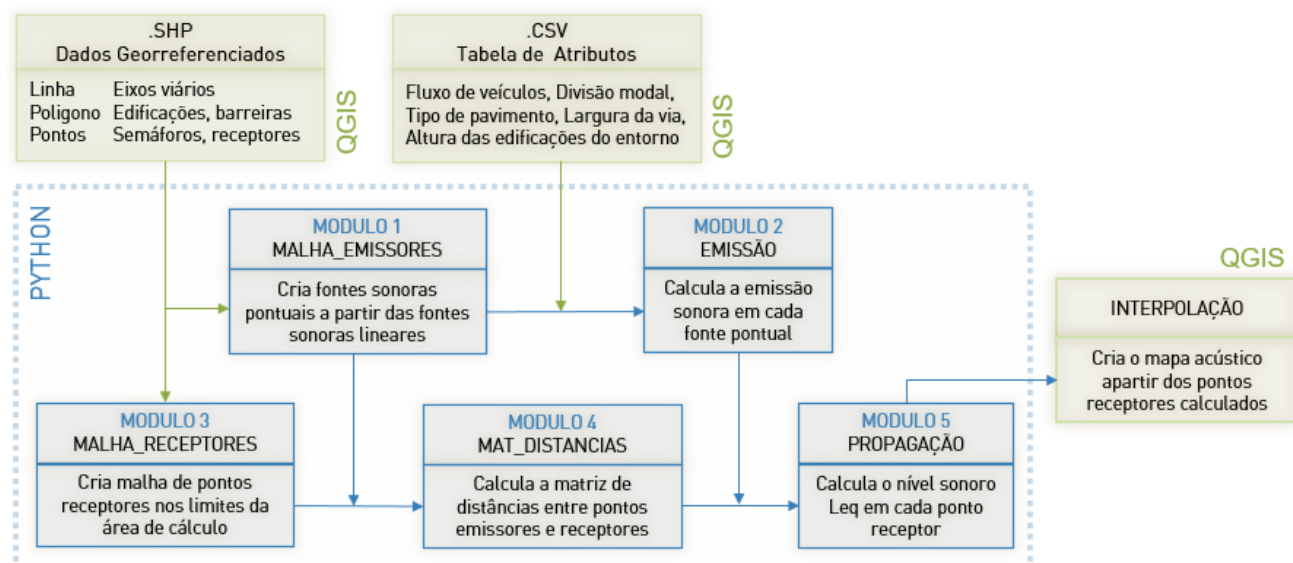


Figura 1: Fluxograma de execução dos módulos no procedimento proposto.

1) e alterados os dados descritos no Quadro 2. Tendo em vista essas limitações, considera-se que o procedimento possa ser válido para os contextos urbanos que cumpram as seguintes premissas:

- Não há interferência de fontes mecânicas ferroviárias, aeroviárias e industriais;
- Há apenas situações meteorológicas homogêneas (sem diretividade da fonte sonora) e velocidade dos ventos menor que 5m/s.
- Os pontos receptores devem estar, no máximo, a 5m de altura do solo;
- Os veículos trafegam em velocidade constante, exceto em situações próximas aos semáforos, onde são adicionados os efeitos de acelerações e desacelerações;
- As superfícies das edificações e barreiras são completamente refletoras. São desprezados efeitos de difração horizontal e vertical.

2.1 Cálculo dos níveis sonoros

O módulo 1, são criadas em Python fontes sonoras pontuais igualmente espaçadas a partir das fontes lineares da camada “vias”. Os eixos emissores E1, E2,... Ei, dessa camada devem ser alocados nas vias de acordo com o número de faixas (Figura 2). O comprimento “b” de partição deve ser menor do que a metade da distância “a” entre o receptor e o eixo emissor “Ei” da via [11]. Ou seja, o comprimento da partição depende da largura da via. Assim como no Cadna-A, os pontos de cada partição possuem o mesmo valor em dB. A exceção

ocorre quando um ponto está na região de influência de semáforos, onde são adicionados os efeitos devidos às acelerações e desacelerações. O parâmetro “Hubdist” é calculado a partir da menor distância entre um ponto emissor e um ponto da camada “semaforo”.

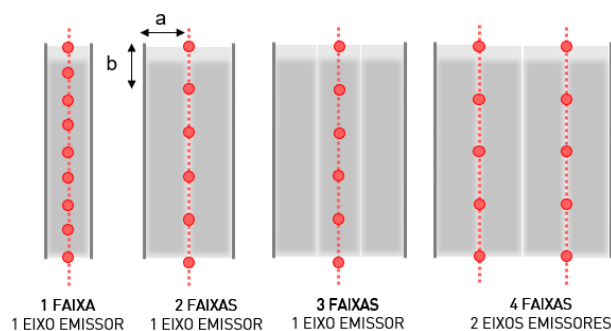


Figura 2: Alocação de pontos emissores ao longo das vias.

O módulo 2 cria uma malha de pontos receptores dentro dos limites da camada “contorno”. A norma ISO 9613 [12], define a inserção de pontos em uma malha regular, mas apenas esse processo pode induzir a falhas. Isso porque a variação dos níveis sonoros é maior quanto mais próximo estiver o ponto da fonte emissora e de barreiras refletoras [13]. Devido a isso são inseridos também pontos além da malha regular de receptores, definida a cada 5m. Esses pontos são adicionados no entorno da camada “edificacao”, distantes 2m dessa camada e com espaçamento igual ao adotado na grelha regular. Pontos receptores adicionais podem também ser

inseridos na camada “receptoresM”, sendo úteis no processo de validação da modelagem.

O módulo 3 cria uma única matriz de distâncias com receptores e emissores localizados dentro de um raio crítico centralizado em cada ponto receptor. Como os efeitos de difração são negligenciados, são desconsiderados os efeitos de pontos emissores em regiões de sombra acústica. Conforme ilustra a (Figura 3), caso a reta que liga o ponto emissor E_i e o ponto receptor R_k atravessasse algum polígono, esta ligação não é adicionada à matriz de distâncias.

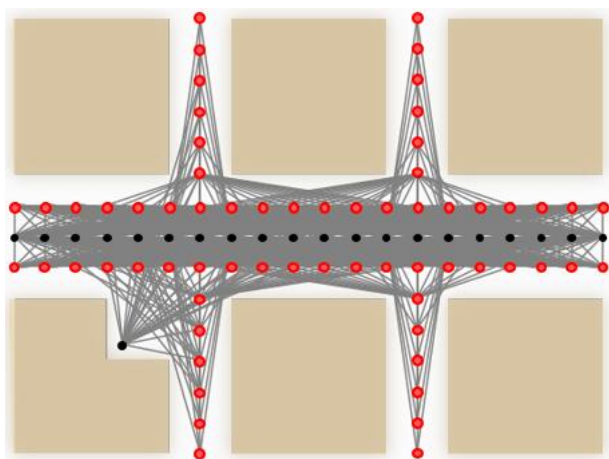


Figura 3: Efeito dos pontos emissores (preto) sobre os pontos receptores (vermelho).

Após a definição do “Hubdist” e da matriz de distâncias, o cálculo dos níveis sonoros pode ser efetuado. O módulo 4 calcula o valor equivalente (LAeq) para cada ponto emissor enquanto o módulo 5 calcula os efeitos de atenuação devido a propagação sonora no ar. Para cada ponto receptor são adicionados os efeitos de todos os emissores que fazem parte de sua matriz de distância. Enquanto os módulos anteriores dependem apenas das informações extraídas do QGIS, os módulos 4 e 5 podem variar consideravelmente com o modelo preditivo adotado. Independente disso, ao final do processo é gerado um arquivo CSV contendo para cada ponto receptor a geolocalização e um valor LAeq.

O mapa sonoro é gerado através da interpolação espacial processada no QGIS. Foi utilizado o método *Inverse Distance Weighted* (IDW), que fornece resultados satisfatórios nos casos em que há grande número de pontos uniformemente

distribuídos [14]. No método IDW (Figura 4), as amostras de pontos possuem um peso que depende do coeficiente utilizado, sendo testadas as potências 2 e 3. Quanto maior for o coeficiente, sobre menos pontos o valor calculado terá efeito e o valor do ponto desconhecido será mais semelhante ao valor dos pontos vizinhos.

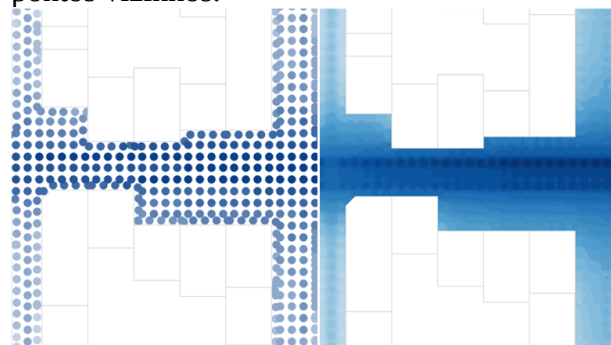


Figura 4: Malha de pontos e Interpolação espacial com método IDW.

2.2 Análise de Desempenho do Procedimento Proposto

Para mensurar o impacto das limitações do procedimento proposto, foram comparadas as diferenças entre os valores obtidos pelo método de mapeamento descrito e o Cadna-A. Foram criados locais hipotéticos com diferentes configurações espaciais e cenários com distintas características de tráfego viário. Pretendeu-se, com isso, abordar diversas possibilidades de aplicação dos procedimentos levando em consideração os fatores que influenciam a emissão e propagação dos níveis de ruído no meio urbano. A escolha desses parâmetros baseou-se nas variáveis do modelo RLS90 [15], descritas no Quadro 2. Foram desconsiderados os parâmetros sobre o efeito de barreiras e desníveis topográficos.

A organização espacial dos elementos urbanos nos cenários criados baseou-se em um estudo urbano em que o autor sugere um loteamento formado por uma grelha regular com quadras de 120 x 120m e lotes com largura mínima de 10m [16]. Para a presente análise, foram criados locais compostos por oito quadras de 120 x 120m, contendo lotes padrão de 12 x 50m, separadas por uma via principal e três vias secundárias (Figura 5). Os elementos construídos dentro das quadras foram



escolhidos de forma aleatória variando altura das edificações e recuo frontal e posterior. Para a altura das edificações foram formulados 2 cenários: Horizontal, com edifícios entre 4 e 10 m (Figura 6) e Vertical, com edifícios entre 19 e 43m (Figura 7). Na tipologia Horizontal, o recuo frontal das edificações no lote variou entre 0, 5 ou 10m. Já Na tipologia Vertical, o recuo frontal não foi considerado para que se obtivesse o máximo efeito de múltiplas reflexões de fachada. Adotou-se 4 m para a altura do primeiro andar das edificações e 3m para a altura dos demais andares.

Para as ambas as tipologias Vertical e Horizontal foram formuladas 4 configurações de sistema viário, onde variou-se a largura da Via Principal. Considerando que cada faixa de tráfego possui 3,5m de largura e que o canteiro central varia com a largura total da via, foram definidos locais com 1, 2, 3 e 4 faixas, totalizando 14m, 21m, 29m e 40m de largura, respectivamente. Para todos os locais foi inserida uma interseção semafórica no cruzamento entre a Via Principal e uma Via Secundária, que foi definida com a mesma largura da Via Principal. Para avaliar a influência desse semáforo (acelerações e desacelerações), 14 pontos foram posicionados ao longo da Via Principal e das Vias Secundárias, os quais metade foram posicionados a menos de 100m do semáforo.

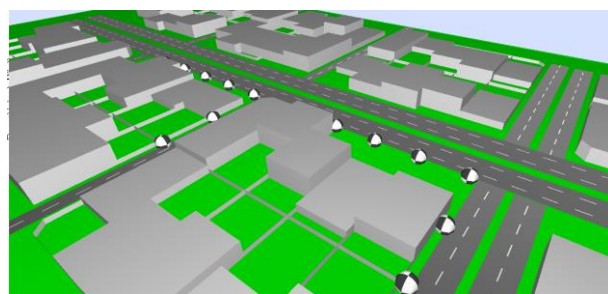


Figura 6: Visualização 3D de cenários Horizontais no CADNA-A

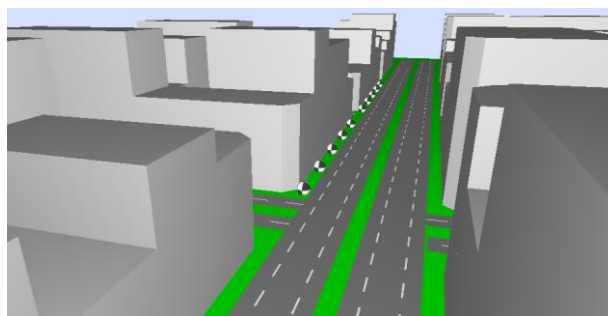


Figura 7: Visualização 3D de cenários Verticais no CADNA-A

Para o parâmetro inclinação do terreno, foram escolhidas 0% ou 6% de inclinação ao longo da Via Principal. Foram formulados também dois cenários para a altura dos pontos receptores em relação ao solo, sendo definidas as alturas de 2m e 4m. Os parâmetros relacionados ao tráfego de veículos foram escolhidos observando-se dados de várias pesquisas de tráfego [17-19]. Foram formulados 2 cenários com 5% ou 25% de porcentagem de veículos pesados. Considerando que os parâmetros velocidade,

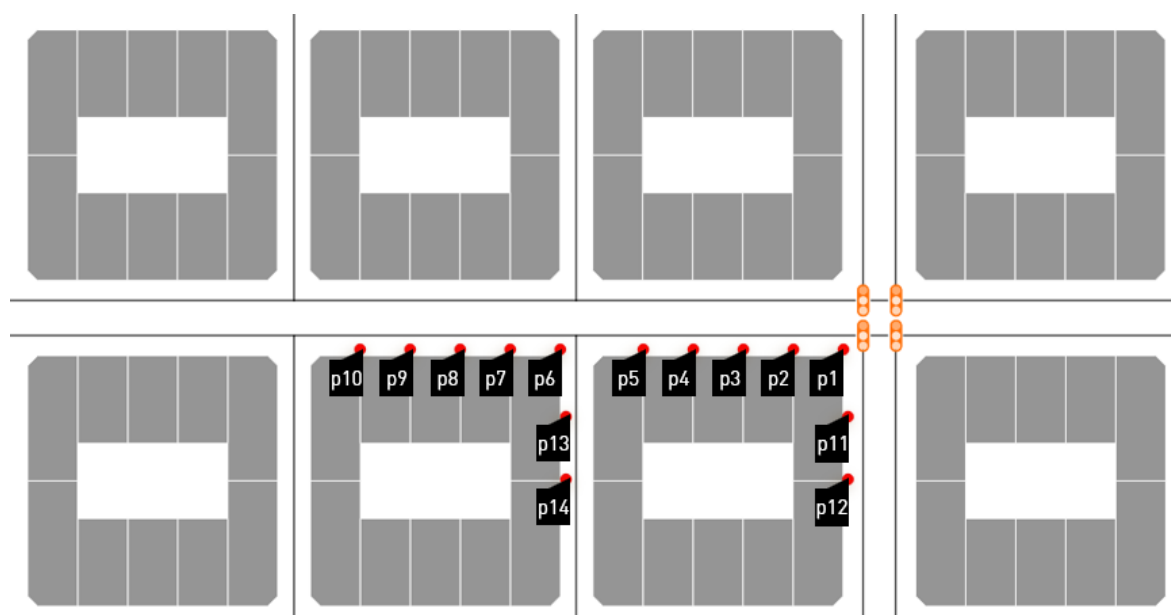


Figura 5: Organização espacial dos elementos construídos para comparação entre procedimentos.

volume de veículos e tipo de pavimento são variáveis dependentes, foram escolhidos 3 cenários as seguintes variações: Fluxo de 1000 veículos por hora e por faixa (veic/h/fa) com velocidade de 60km/h em pavimento asfáltico; Fluxo de 400 veic/h/fa com 40km/h em pavimento asfáltico; Fluxo de 400 veic/h/fa com 40km/h em pavimento intertravado.

Dessa forma, foram definidos 16 cenários obtidas da combinação de elementos urbanos, como altura das edificações (2 cenários), geometria da via (4 cenários) e declividade do terreno (2 cenários). Os desenhos foram realizados no *software* AUTOCAD e então importados para os *softwares* QGIS e Cadna-A. Outros 12 cenários dos parâmetros característicos da fonte e do receptor foram alterados no banco de dados e aplicados aos 14 pontos receptores, totalizando 2688 configurações de locais. Ressalta-se que, devido a modelagem 2D do procedimento no QGIS, os parâmetros inclinação da via, altura das edificações e altura de medição não foram modelados geometricamente no ambiente de simulação do QGIS, sendo esses fatores considerados apenas nos cálculos do modelo preditivo.

As análises estatísticas foram realizadas através utilizando a linguagem R no programa Rstudio. Adotou-se como premissa que o Cadna-A é representativo dos níveis sonoros nos locais simulados. Assim, os dados das diferenças entre as modelagens foram considerados como erros do procedimento testado. A normalidade dos erros foi analisada através do teste Shapiro-wilk. Também foram avaliados, como indicadores, a média, o desvio padrão e a porcentagem de erros maiores que ± 1 dB (E1) e $\pm 0,5$ dB (E05). Considerando que os valores para validação de modelos utilizados em diversos estudos variam entre ± 2 dB e $\pm 4,6$ dB [20], baixos valores de E05 representam bons resultados e altos valores E1 podem representar grande presença de valores discrepantes ou extremos (*outliers*).

3. RESULTADOS

3.1 Análise dos erros nos pontos receptores

Em ambas as modelagens foram obtidos níveis de ruído entre 60 dB e 87 dB, apresentando grande variabilidade de acordo com as condições estabelecidas nos cenários. Foi obtido R^2 de 0.997, média dos erros de -0.06, mediana de 0.04, desvio padrão de 0,39, E1 de 1,6% e E05 de 16,6% (Figura 8). Isso indica uma boa adequação do procedimento proposto em relação ao Cadna-A. Por outro lado, o teste de normalidade indica que os erros não seguem distribuição normal (p -valor < 0.05), o que pode estar associado à ocorrência de outliers. Ressalta-se que distribuições aproximadamente normais podem não levar a erros sérios de interpretação de médias simples, ao contrário do que acontece com a distribuição das estatísticas de segunda ordem [21]. Devido a isso, cabe uma avaliação mais detalhada sobre os parâmetros da modelagem, o que possibilita realizar melhorias.

Uma melhoria testada foi a alteração do parâmetro “partição”, a depender da largura total da via. Para isso foram combinados valores de partição entre 2, 3, 4 e 5m para cada uma das 4 possibilidades de número de faixas da Via Principal. Observou-se que quanto menor a partição, maior o tempo de processamento e isso nem sempre correspondeu a uma melhoria nos resultados. Com isso, optou-se pelo caso em que todas as vias são particionadas a cada 2m, já que é uma configuração espacial mais simples.

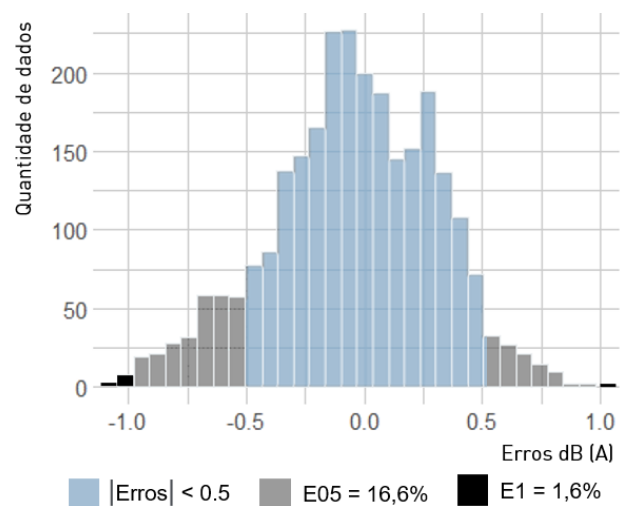


Figura 8: Histograma dos erros entre a modelagem QGIS em relação ao Cadna-A.

A análise dos erros para cada um dos 14 pontos receptores indicou que os pontos localizados



nas Vias Secundárias apresentaram maiores desvios padrão e maiores valores de E05, entre 20% e 38%. Os resultados mais críticos foram do ponto p11, que apresentou 0.29 como média de erro, e o ponto p13, que apresentou E1 de 12%. Além disso, o boxplot indicou maior presença de possíveis outliers nos pontos p13 e p14 (Figura 9). Isso indica que pontos mais distantes das fontes sonoras estão propensos a maiores erros. Quanto aos outros pontos, houve uma maior variabilidade de resultados nos pontos p1 a p5, que estão próximos ao semáforo. Isso possivelmente ocorre porque, enquanto o QGIS segue as equações do modelo RLS90, o Cadna-A apresenta um refinamento em relação aos efeitos de acelerações e desacelerações de veículos.

Os parâmetros do modelo foram analisados por pares, por exemplo 0% e 6% de inclinação do terreno, resultando que a maioria dos valores de média e mediana foram semelhantes. Isso é um indicativo de baixa influência de valores extremos. Algumas divergências foram encontradas, como no parâmetro número de faixas. Observou-se que os cenários com uma faixa de tráfego possuíram média de erros superior aos demais e E05 de 25%, enquanto para 2, 3 3 4 faixas de tráfego a variável E05 variou entre 13% e 15%. Isso indica que ruas mais estreitas estão propensas a subdimensionamento de resultados.

Os parâmetros Inclinação da via e Altura de medição também apresentaram divergência entre os resultados obtidos. O cenário com 6% de inclinação da via apresentou média de erros positivos (0.03), enquanto no outro cenário esses erros foram negativos (-0.16). O mesmo ocorreu comparando receptores a 2m e 4m de altura do solo, com média de erros 0.12 e -0.25, respectivamente. O parâmetro Altura de medição destaca-se ainda quanto a porcentagem de erros superiores a 1 dB, o que indica menor confiabilidade nos dados. Essa variabilidade de resultados pode estar associada a limitação da modelagem 2D, já que esses parâmetros estão relacionados a altimetria. Como esse viés pode obscurecer a compreensão dos demais parâmetros, nas análises posteriores também se considerou a exclusão de uma dessas variações.

Ressalva-se ainda que no parâmetro Altura das Edificações houve E05 de 22% para o cenário Horizontal e E05 de 12% para a variação vertical, o que indica menor assertividade na variação Horizontal. Isso possivelmente ocorre porque apenas no cenário Horizontal foram considerados os recuos frontais e muros nos lotes, que formam reentrâncias e ocasionam efeitos de difração e reflexão da onda sonora. Como não houve grande variação nos indicadores média, desvio padrão e E1, pode-se considerar que esses efeitos não possuem grande impacto nos resultados.

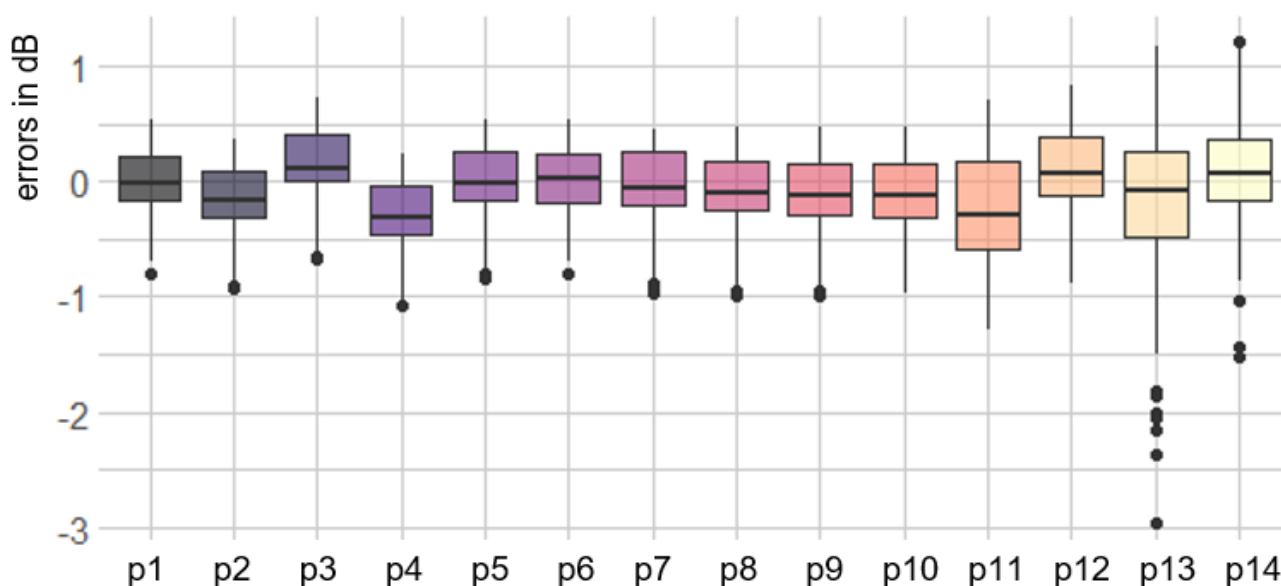


Figura 9: Boxplot dos erros entre modelagem OGIS e CADNA-A para cada receptor.

3.2 Análise do Mapeamento de Ruído

Para análise dos mapas de ruído, foram escolhidas três das 192 configurações espaciais formuladas. Primeiramente buscou-se cenários com baixos erros (Figuras 10 e 11) e poucos outliers para isolar o feito da interpolação espacial. Esse cenário possui edificações Horizontais com 2 faixas de tráfego na Via Principal, 10% de veículos pesados, pavimento asfáltico, baixa velocidade e alto volume de tráfego, 0% de declividade da via e altura de medição 2m. Para todas as situações, foram testados 3 valores de potência (2, 3 e 4) com o método IDW. Optou-se pela potência 3 por evidenciar menos os picos em torno dos pontos receptores medidos (Figura 12). Com exceção

das regiões internas às quadras, observa-se grande semelhança entre os valores nas vias.

Outra configuração avaliada apresentou os piores erros na modelagem (Figura 13). Trata-se de um cenário Horizontal com 2 faixas de tráfego na Via Principal, 10% de veículos pesados, pavimento asfáltico, baixa velocidade e alto volume de tráfego, 0% de declividade da via e altura de medição 2m. Percebe-se que na Via Principal os valores são bastante semelhantes, enquanto nas vias mais estreitas há maior divergência entre os dados. Além disso, assim como no caso anterior, a diferença de detalhamento geométrico entre os dois tipos de mapeamentos causou impacto visual devido aos valores internos às quadras. Isso por

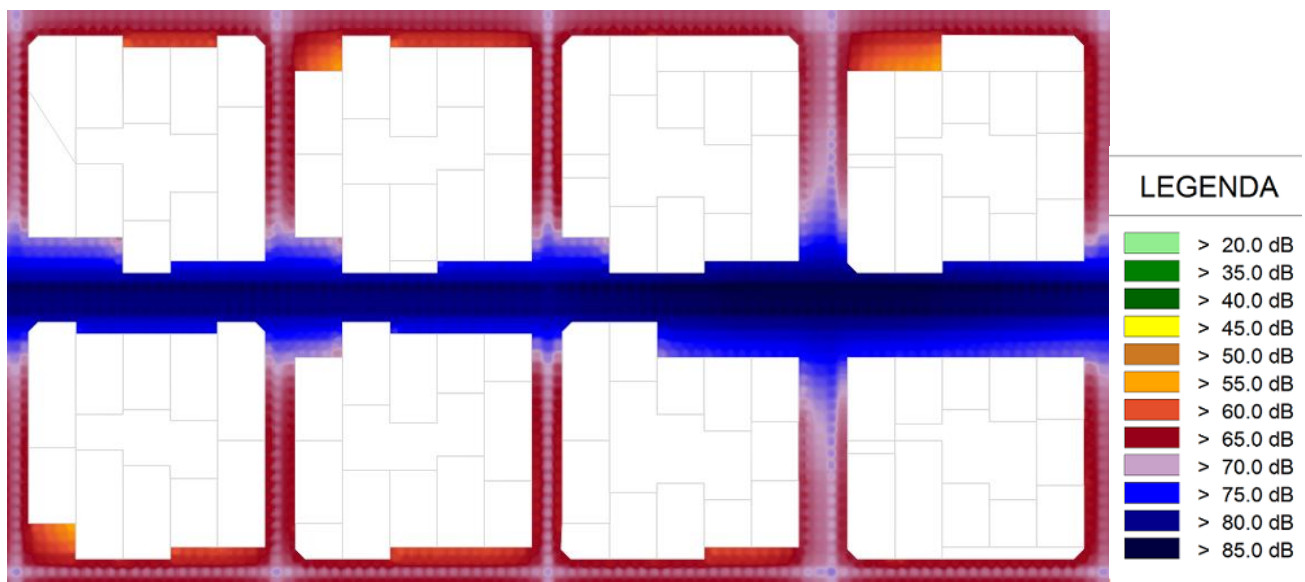


Figura 10: Mapas gerado no QGIS com menor erro entre modelagens.

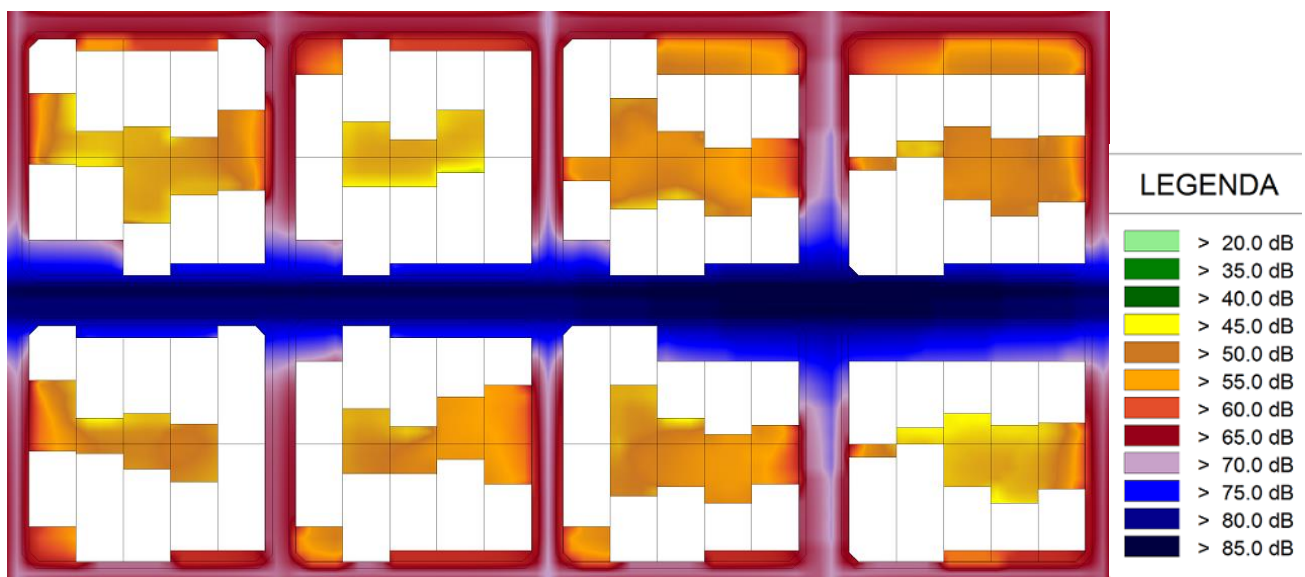


Figura 11: Mapas gerado no CADNA-A com menor erro entre modelagens.

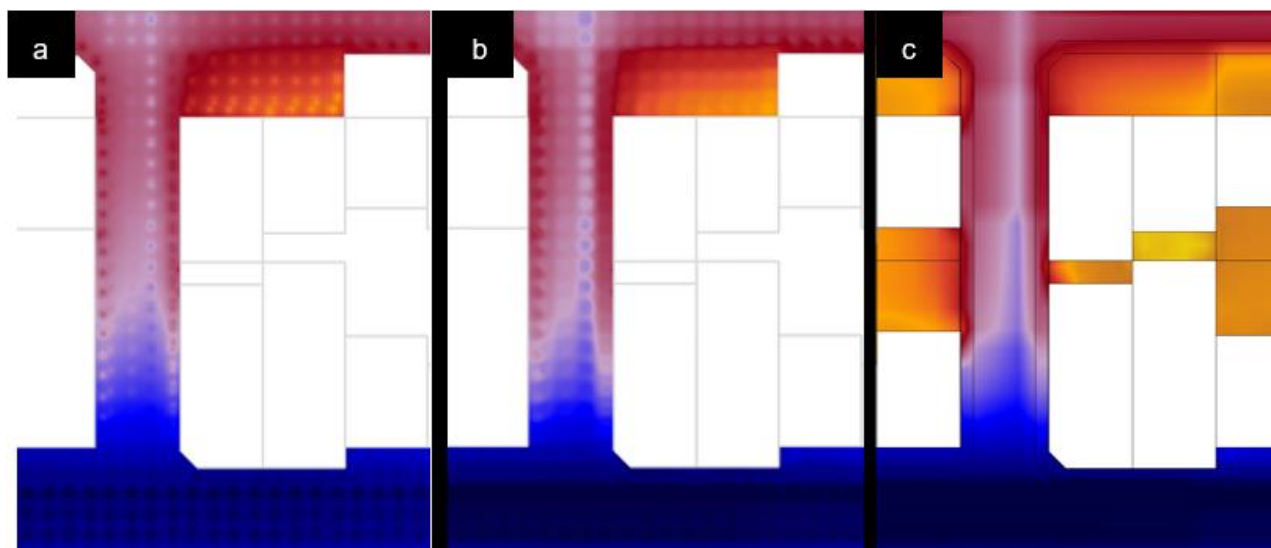


Figura 12: Diferenças visuais entre a interpolação com (a) potência 2 e (b) potência 3 no QGIS e entre (c) mapa gerado pelo Cadna-a.

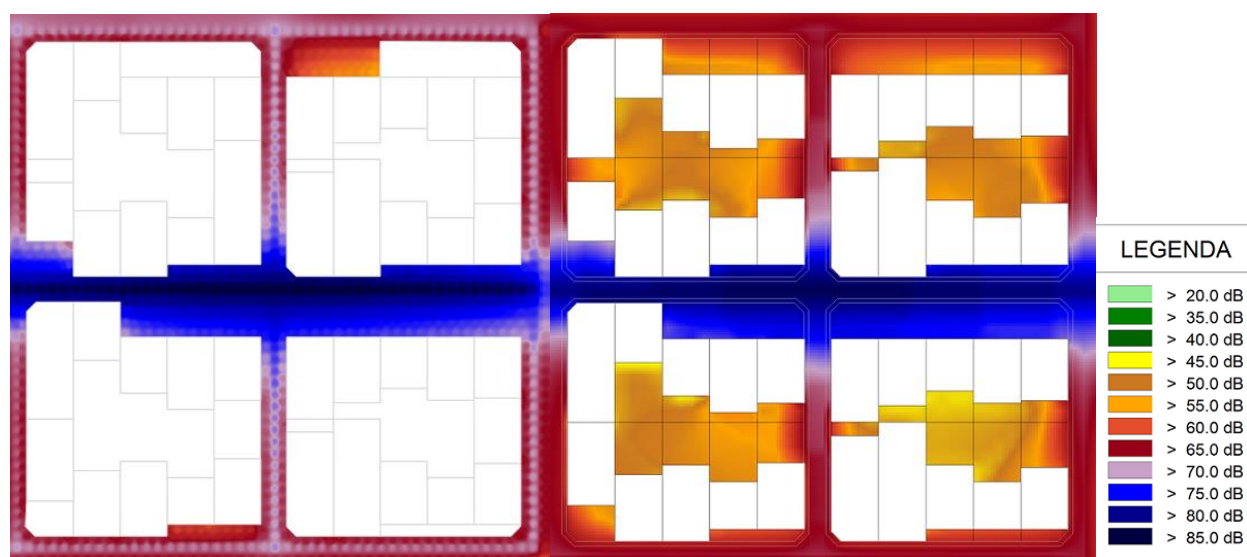


Figura 13: Mapas gerados com maior erro entre QGIS (à esquerda) e Cadna-A (à direita).

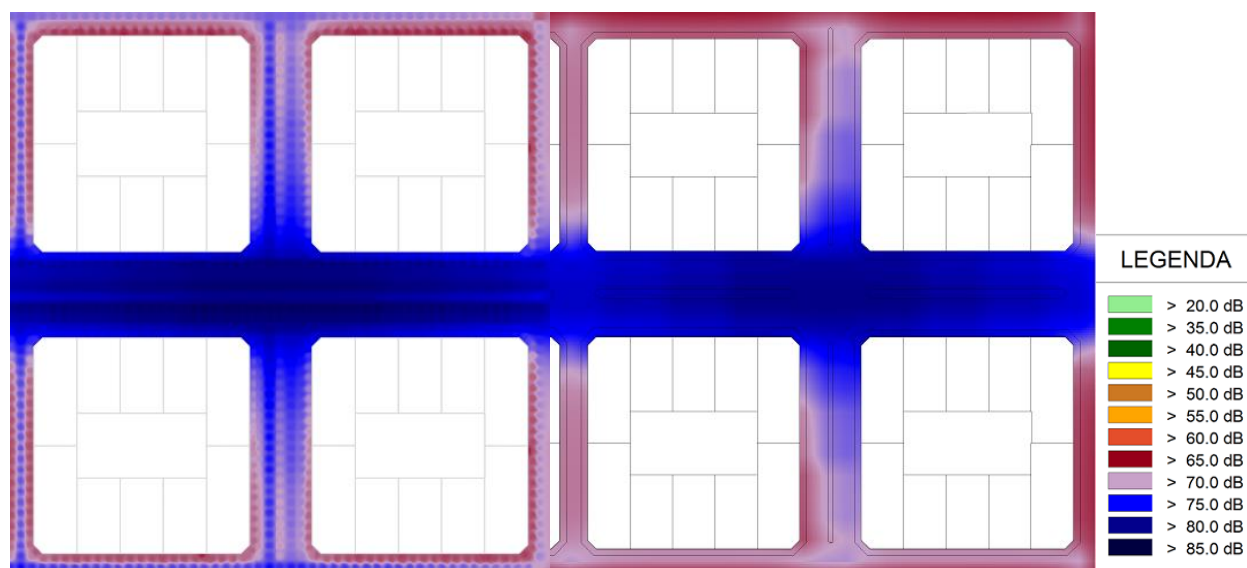


Figura 14: Mapas gerados em cenário Vertical de QGIS (à esquerda) e Cadna-A (à direita)

que no Cadna-A foram considerados muros e diferentes alturas de edificações, enquanto no QGIS os fatores altimétricos foram considerados apenas nas equações dos modelos.

O terceiro caso avaliado, trata-se de uma configuração vertical com 4 faixas, 3% de veículos pesados, alta velocidade e baixo volume de tráfego (Figura 14). Como no cenário vertical não foram consideradas as reentrâncias, dos muros e recuos, evidencia-se o resultado numérico obtido no qual as vias secundárias possuem menor assertividade. Os mapas obtidos pelo QGIS também apresentaram menor suavidade na transição entre as cores que representam os níveis sonoros, o que pode ser decorrência da sofisticação do algoritmo de interpolação do Cadna-A. Essa diferença foi mais perceptível em regiões com maiores diferenças entre valores, como em pontos próximos aos eixos viários e aos semáforos. Apesar disso, os resultados foram visualmente semelhantes, principalmente em regiões lindeiras às quadras das vias de maior tráfego.

4. CONCLUSÃO

O mapeamento de ruídos urbanos utilizando SIG oferece vantagens como o gerenciamento dos dados em única plataforma, colaboração e compartilhamento, com redes de desenvolvedores e acesso transparente aos usuários e gestores urbanos. Nesse trabalho foi desenvolvido um código aberto em linguagem Python, com o objetivo de mapear de forma simplificada o ruído ambiental gerado pelo transporte rodoviário. Os dados foram integrados com o *software* QGIS, sendo descritos os algoritmos desenvolvidos. Essa adaptabilidade permite atualizar e implementar modelos preditivos, o que fomenta o desenvolvimento de métodos mais coerentes com as características locais e a disponibilidade de dados.

A análise do desempenho do procedimento proposto foi baseada em cenários urbanos hipotéticos representando diversos contextos urbanos. Esses cenários foram desenvolvidos a partir de combinações dos atributos utilizados na modelagem de ruído, resultando em 192 cenários diferentes em 14 pontos receptores.

Comparando o procedimento proposto e o *software* comercial Cadna-A, foi obtido alto R^2 (0,997) e pequena média dos erros (-0,06), estando 98,3% dos erros abaixo de 1 dB e 83,4% dos erros abaixo de 0,5 dB. Isso representa uma boa adequabilidade dos dados, já que para validar mapeamentos sonoros utiliza-se na literatura o erro crítico entre 2 dB e 4,6 dB. Cabe ressaltar que a aplicação do método pressupõe uma validação em relação a medições sonoras reais.

As diferenças entre as modelagens também foram quantificadas para cada parâmetro utilizado na formulação dos cenários. Isso possibilitou identificar possíveis falhas na modelagem e direcionar recomendações para trabalhos futuros. Observou-se que pontos mais distantes da fonte sonoras mais intensa possuem resultados menos assertivos, o que é confirmado na análise visual dos mapeamentos. Também foram observados erros enviesados entre as variações dos parâmetros relacionados aos atributos altimétricos, como altura de medição, altura das edificações e declividade da via. Isso ocorre porque uma das principais limitações do procedimento em relação aos *softwares* comerciais é a modelagem 2D ao invés da 3D. Esse aprimoramento possibilitaria a análise dos efeitos da difração em barreiras e efeitos meteorológicos em alturas distantes do solo.

Para gerar os mapas a partir de pontos receptores calculados, utilizou-se o método da interpolação ponderada pelo inverso da distância (IDW). Foram comparados visualmente os resultados obtidos com três valores de potência e foi escolhida a potência 3, o que difere do valor mais utilizados na literatura. Comparando os mapas obtidos pelo QGIS e Cadna-A, as principais diferenças visuais estão em regiões próximas a muros e reentrâncias devido aos efeitos de difração desconsiderados no procedimento proposto.

Conclui-se que, embora alguns melhoramentos possam ser realizados no procedimento, há uma boa aderência em relação a um método tradicionalmente utilizado para mapeamento do ruído de tráfego rodoviário em meio urbano. Orienta-se utilizar o procedimento proposto em:



situações urbanas onde não haja interferência de outras fontes mecânicas ferroviárias, aeroviárias e industriais; em condições meteorológicas sem diretividade da onda sonora; em alturas de até 5m do solo; quando as informações dos níveis sonoros internos as quadras não são relevantes. A boa adequabilidade quantitativa dos resultados e visual dos mapas indicam recomendação do método para diversos tipos de pavimento, porcentagens de veículos pesados, velocidade de veículos e, principalmente, para vias com alto fluxo de veículos.

5. AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

REFERÊNCIAS

- [1] Fernandes, G. A. Impacto de Ruído de Tráfego em Edificações Escolares: Metodologia de Avaliação para Diretrizes de Planejamento Urbano. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002.
- [2] SAPATA, A.M.A. Monitoramento, Modelagem e Simulação dos Impactos e Efeitos Do Ruído de Tráfego em trecho de Cânion Urbano da Avenida Horácio Racanello da cidade de Maringá – Pr. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, PR, 2010.
- [3] Guedes, I.C.M.; Bertoli, S.R.; Zannin, P.H.T. Influence of urban shapes on environmental noise: A case study in Aracaju - Brazil, **Science of The Total Environment**, V. 412–413, P. 66-76. 2011.
- [4] Arana, M. et al. Strategic noise map of a major road carried out with two environmental prediction software packages. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 163, p.503-513, 2010.
- [5] Dadhich, A. P.; Goyal R.; Dadhich, R.P.N. An Assessment of Urban Space Expansion and its Impact on air Quality Using Geospatial Approach. **Journal of Urban and Environmental Engineering (JUEE)**, v.11, n.1, p.79-87, 2017.
- [6] Tang, U.W.; Wang, Z.S. Influences of Urban Forms On Traffic-Induced Noise And Air Pollution: Results From A Modeling System. **Environ. Model. Software**. V. 22, P. 1750-1764. 2007.
- [7] Murphy, E.; Rice, H.J; Meskell, C. Environmental Noise prediction, noise Mapping and Gis Integration: The Case of Inner Dublin, Ireland. **8th Intern. Transport Noise And Vibration Symposium**, St. Petersburg, 2006.
- [8] Arpa Piemonte. **Openoise Map Qgis Plugin**. 2019.
- [9] Bocher, E. *Et Al.* Noisemodelling: An Open Source Gis Based Tool To Produce Environmental Noise Maps. **Isprs International Journal Of Geo-Information**, V. 8, P. 30, 2019.
- [10] Dardanelli, G. *Et Al.* Analysis Of Technical Criticalities For Gis Modelling An Urban Noise Map. **Geographia Technica**, V. 12, N. 2, P 41- 61, 2017.
- [11] Setra. Road Noise Prediction. Methodologic Guide. 1 - Calculating Sound Emissions From Road Traffic. **Setra - Service D'études Sur Les Transports, Les Routes Et Leurs Aménagements**. Bagneux. France. 2009.
- [12] International Organization For Standardization. **Iso 9613-2: Acoustics — Attenuation Of Sound During Propagation Outdoors — Part 2: General Method Of Calculation**. Suíça. 1996.
- [13] Asensio, C. *Et Al.* Self-Adaptive Grids For Noise Mapping Refinement, **Applied Acoustics**, Volume 72, Issue 8, Pages 599-610, 2011.
- [14] Farcas, F.; Sivertun, Å. Road Traffic Noise: Gis Tools For Noise Mapping And A Case Study For Skåne Region. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.** V. 34. 2012.
- [15] Datakustik. Cadna-A State Of Art Noise Prediction Software. **Referene Manual**. Release 4.5. Greifenberg. Germany. 2014.
- [16] Santos, C.N.F. A Cidade Como Um Jogo De Cartas. **Editara Eduff**. 170p. Niterói. Brasil. 1988.
- [17] Rodrigues, F. (2010) Metodologia Para Investigação De Relação Entre Ruído De Tráfego E Condições Operacionais Do Fluxo Em Centros Urbanos. **Tese (Doutorado Em Engenharia De Transportes)**. Universidade Federal Do Rio De Janeiro. 2010.
- [18] Moura, V.R.; Melo, G.S.V.M E Santos W.S. Ruído E Configuração Espacial Urbana: Um Estudo De Caso Na Cidade De Belém Do Pará. **Pesquisa Em Arquitetura E Construção**, Campinas, V. 7, P. 237-251, 2016.
- [19] Kalaiselvi, R; Ramachandraiah, A. Honking Noise Corrections for Traffic Noise Prediction Models In Heterogeneous Traffic Conditions Like India, **Applied Acoustics**, V. 111, P. 25-38, 2016.
- [20] Wg-Aen. Good Practice Guide For Strategic Noise Mapping And The Production Of Associated Data On Noise Exposure. **European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise**. 129p, 2007.
- [21] Hotelling, H.; Pabst, M. R. Rank Correlation And Tests of Significance Involving no Assumption of Normality. **The Annals Of Mathematical Statistics**, Durham, V. 7, P. 29-43, 1936.