

XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

VULNERABILIDADE DA POPULAÇÃO AO RISCO DE INUNDAÇÃO RELACIONADO À BARRAGEM DA LAGOA DA PAMPULHA - MG

*André Felipe Rocha da Silva*¹; *Julian Cardoso Eleutério*²; *Nilo de Oliveira Nascimento*³

RESUMO

O mapeamento de vulnerabilidade é uma etapa da avaliação de risco que pode ser conduzida em diferentes escalas, dependendo do nível de detalhe requerido. Com intuito de fornecer subsídios para uma avaliação de eficiência de sistema de alerta. O presente trabalho objetivou mapear a vulnerabilidade em microescala da população ao risco de inundação relacionado à barragem da Lagoa da Pampulha. Foram utilizados apenas dados secundários provenientes do Censo demográfico de 2010 e das bases de dados disponibilizadas pela empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte. Os resultados, dentro das hipóteses adotadas e limitações, demonstraram o potencial e a importância da disponibilidade de bases de dados sobre populações e equipamentos urbanos para subsidiar a elaboração de estudos subsequentes.

Palavras-Chave – Avaliação de risco de inundações; Exposição; Microdados.

INTRODUÇÃO

No processo de avaliação do risco de inundações, a análise de exposição da população é uma etapa que consiste na caracterização dos elementos em risco de áreas potencialmente impactadas pelos eventos de inundação dos cenários considerados (Merz *et al.*, 2010). Essa análise se concretiza pelo mapeamento de vulnerabilidade e pode ser conduzida em diferentes escalas, dependendo do nível de detalhe requerido na avaliação de risco.

Geralmente, análises de risco realizadas em macroescala almejam produzir resultados de maneira simplificada ou de levantar ordens de grandeza referentes a parâmetros de interesse na análise. Já análises em microescala são requisitadas em situações de otimização de investimentos por meio da avaliação da relação custo-benefício de medidas estruturais e/ou não-estruturais para redução do risco (de Moel *et al.*, 2015), de análises de perdas de vidas e de eficiência de sistemas de alerta e da evacuação de populações (Di Mauro *et al.*, 2012).

A avaliação de riscos relacionados à eventuais falhas de barragens se tornou uma obrigação legal, que define, entre outros instrumentos, a necessidade de elaboração de Planos de Segurança de Barragens e Planos de Ações Emergenciais (PAE). Estudos de ruptura hipotéticas e propagações de hidrogramas de ruptura são necessários à determinação de áreas potencialmente inundáveis, e análises de exposição e vulnerabilidade são necessários à compreensão dos impactos potenciais e à elaboração de medidas de mitigação. Nesse contexto, a Barragem da Pampulha, em Minas Gerais, é objeto de estudos diversos (Braz *et al.*, 2015; Vianini Neto, 2016; Resende *et al.*, 2017; Vieira *et al.*, 2020).

1) Engenheiro mestre e aluno do programa de pós-graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos; andre.felipe194@gmail.com.

2) Professor pesquisador no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, e no programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil; julian.eleuterio@gmail.com.

3) Professor pesquisador no Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, e no programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil; niloon@ehr.ufmg.br.

A Barragem da Pampulha forma um reservatório urbano, a lagoa da Pampulha, com capacidade de 10 hm³, ao norte de Belo Horizonte. Atualmente, a estrutura tem como função de contenção de sedimentos, paisagismo e amortecimento de eventos de cheia no Ribeirão Pampulha, viabilizando o aeroporto da Pampulha. A região a jusante do barramento é, por sua grande maioria, ocupada por uma área urbana altamente adensada de Belo Horizonte. O trecho possuiu aproximadamente 16,7 quilômetros de percurso, seguindo pelo Ribeirão Pampulha até confluência com o Ribeirão do Onça, que tem como foz o Rio das Velhas (Vianini Neto, 2016).

Com intuito de fornecer subsídios para estimativa de perdas de vidas e concepção e avaliação de sistemas de alerta e evacuação em caso de rompimentos de barragens de forma geral (Silva *et al.*, 2021), o presente trabalho traz um estudo de caso para o qual a exposição e vulnerabilidade da população é levantada em microescala na área potencialmente atingida em caso de uma inundação decorrente de ruptura da barragem da Lagoa da Pampulha. Este trabalho, além de integrar resultados do projeto de extensão entre a Universidade Federal de Minas Gerais e a Prefeitura de Belo Horizonte para desenvolvimento do Plano de Ações Emergenciais da Barragem da Pampulha, é oriundo de um resumo expandido publicado no II Encontro Nacional de Desastres (Silva *et al.*, 2020), e tem como objetivo principal detalhar a metodologia de obtenção de informações necessárias a esse tipo de estudo.

METODOLOGIA

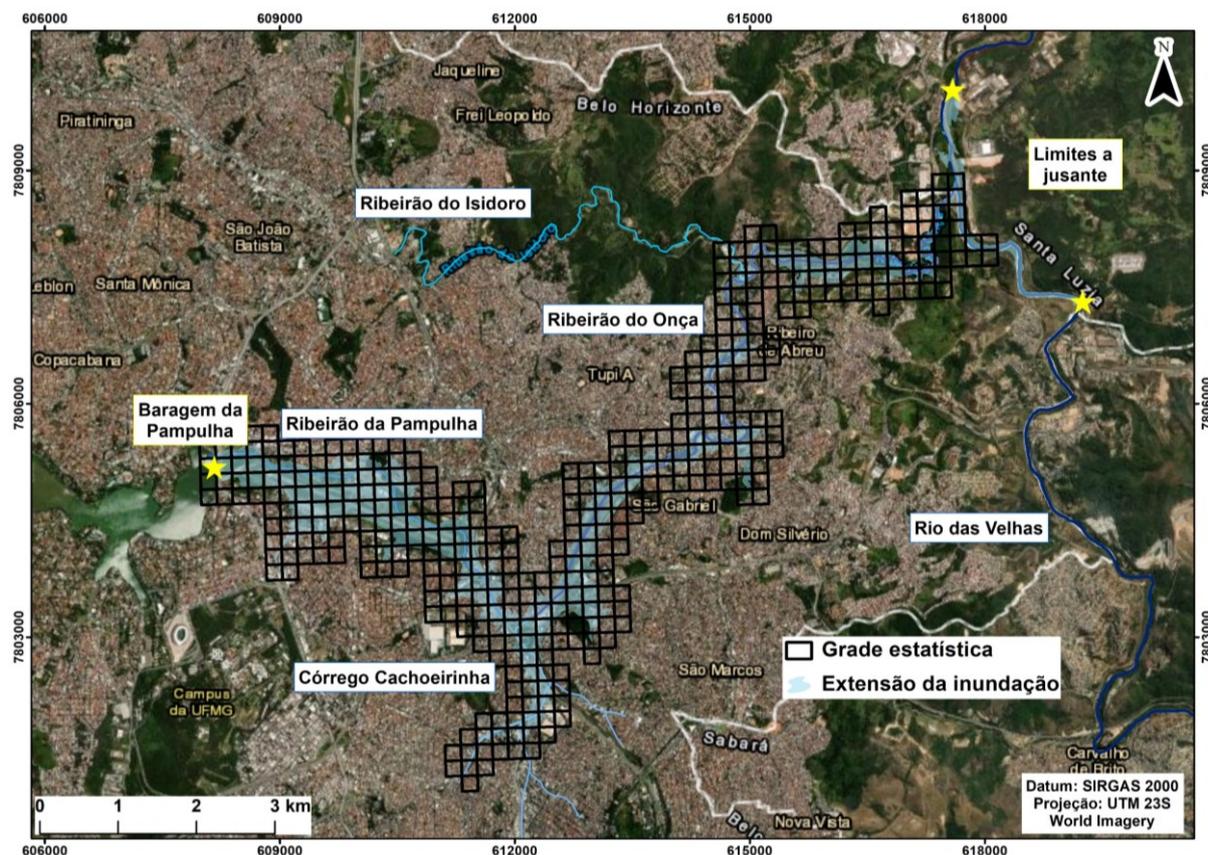
A análise de exposição da população no vale de jusante da barragem da Pampulha foi realizada exclusivamente com base em dados secundários. Foram realizadas análises das bases de dados do censo demográfico de 2010 e das bases de dados disponibilizadas pela empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte (Prodabel).

Para o tratamento dos dados censitários, foi inicialmente utilizada a grade estatística (IBGE, 2016) para delimitação da área de interesse e para levantamento das populações em domicílios. A grade estatística é composta por um conjunto de áreas regulares que dividem os territórios geopolíticos com intuito de integrar dados de origens diversas agregados em unidades geográficas incompatíveis. A menor unidade geográfica de resultados do censo demográfico é o setor censitário, que não possui uma forma homogênea. Assim, por meio de processos estatísticos de agregação e desagregação, informações contidas (população e domicílios) nesses setores censitários são transferidas para áreas de 1 km x 1 km, em zonas rurais, e 200 m x 200 m, em zonas urbanas, homogêneas e sem variação ao longo do tempo.

O processo de agregação é caracterizado pela soma de dados básicos que se encontram dentro da unidade desejada seguindo uma regra espacial de inclusão, ou seja, os domicílios representados espacialmente por pontos que se encontram dentro de uma determinada área são somados. Porém, por diversos fatores, como malha viária incompleta, falhas operacionais e/ou técnicas, há uma quantidade significativa de registros do censo sem informação de localização. Por isso, a necessidade de aplicação do processo de desagregação, que transfere, por meio de métodos dasimétrico ou de ponderação (a depender de dados de malha viária e/ou de uso e ocupação do solo), os dados existentes em um suporte espacial para outro suporte espacial, por meio da criação de um denominador espacial comum entre as unidades de origem e de destino (IBGE, 2016). Para o processo de decisão na escolha de qual método utilizar para elaboração da grade, o IBGE se baseou no estudo de Bueno (2014).

Foram selecionadas 428 grades estatísticas para a análise (Figura 1), abrangendo área superior à potencialmente atingida, segundo recomendações de Hill *et al.* (2018), pelo estudo hidráulico realizado com hidrograma de ruptura de Dinésio Franco (2015).

Figura 1: Grade estatística utilizada para levantamento e compilação de dados referentes à exposição da população.



Também foram utilizadas amostras de domicílios e de pessoas dos microdados do censo demográfico de 2010 para caracterização das construções (tipologia de ocupação e material de construção, específicos para os domicílios) e da população (idade e presença em determinada construção em diferentes períodos do dia). Os microdados contêm todas as informações levantadas nas entrevistas feitas nos domicílios visitados, as quais podem ser encontradas no dicionário dos microdados do Censo (IBGE, 2010).

Esses dados são agrupados em áreas de ponderação que são unidades geográficas, formadas por um agrupamento de setores censitários. Essa é a menor unidade geográfica disponível para identificação dos microdados da amostra, de maneira a preservar o sigilo em relação aos informantes da pesquisa. Desse modo, os resultados obtidos considerando as áreas de ponderação de interesse foram arranjados de maneira proporcional e distribuídos de forma homogênea na região afetada (IBGE, 2010). A Tabela 1 apresenta as variáveis dos microdados consideradas para esta análise de exposição.

Para determinação do número de domicílios a serem visitados durante a realização do Censo, as frações de amostragem (domicílios entrevistados em relação à quantidade total de domicílios dos municípios) foram especificadas considerando a população do município. Para Belo Horizonte, por exemplo, cujo município possui mais de 500.000 habitantes, a fração foi de 2%. Com isso, para cada elemento das amostras dos microdados, é determinado um peso amostral, o qual foi considerado nesta análise de exposição.

Para complementar e auxiliar a análise, foram selecionados diversos dados da Prodabel, pelo Portal de Geoprocessamento da Prefeitura de Belo Horizonte, que dispõe de diversos arquivos vetoriais contendo informações geoespacializadas sobre o município. Foram obtidos dados dispendo sobre a divisão territorial (regionais e áreas de ponderação do censo do demográfico de 2010), a malha

urbana (edificações), o uso e ocupação do territorial (tipologias de uso e ocupação dos lotes), a educação (equipamentos de ensino de diferentes níveis), a saúde (Centros de Saúde e Unidades de Pronto Atendimento), a assistência social (Centros de Referência de Assistência Social e Centros de Referência Especializada de Assistência Social) e as atividades econômicas (microempresas e empresas de pequeno e outros portes).

Tabela 1: Variáveis das amostras de domicílios e de pessoas utilizados na análise de exposição.

Código	Variável
V0002	Município
V0010	Peso
V0011	Área de ponderação
V0202	Material predominante, paredes externas
V0629	Curso que frequenta
V0630	Série/ano que frequenta (fundamental)
V0631	Série que frequenta (médio)
V0660	Município que trabalha
V0661	Retorna do trabalho para casa diariamente
V4002	Tipo de espécie (domicílio)
V6461	Ocupação
V6471	Atividade
V6930	Posição na ocupação e categoria do emprego
V6940	Subgrupo e categoria do emprego

As análises de população realizadas consideraram as seguintes tipologias de construção: 1) construções consideradas como domicílios residenciais; 2) construções relacionadas ao ensino, saúde e assistência social; e 3) construções destinadas ao exercício de atividades comerciais/industriais. A caracterização da população na área de interesse considerou variáveis relevantes para formulação de estratégias de alerta e evacuação, em caso de risco, tais como: faixa etária da população com distinção para o número de habitantes com mais de 65 anos (fator mobilidade) e os horários de permanência (diurno, às 14:00, e noturno, às 02:00) das pessoas nos edifícios segundo sua tipologia.

Levantamento de dados para os domicílios

Para os domicílios, identificou-se uma população total de 107.029 pessoas residindo em 32.868 domicílios na área de interesse. Devido à grande quantidade de edificações na área de interesse e à impossibilidade de uma discretização precisa das áreas residenciais com localização dos domicílios com base nos dados disponíveis, optou-se por gerar, de forma aleatória, os domicílios sobre as edificações em lotes residenciais ou desconhecidos, respeitando o quantitativo de residências em cada grade. A Figura 2 ilustra as edificações caracterizadas pelo uso e ocupação do lote.

A população foi alocada de maneira homogênea também em cada grade, e a presença nas residências durante o dia e a noite foi estimada por meio das seguintes hipóteses adotadas com as variáveis de educação e trabalho dos microdados:

Para o período da noite:

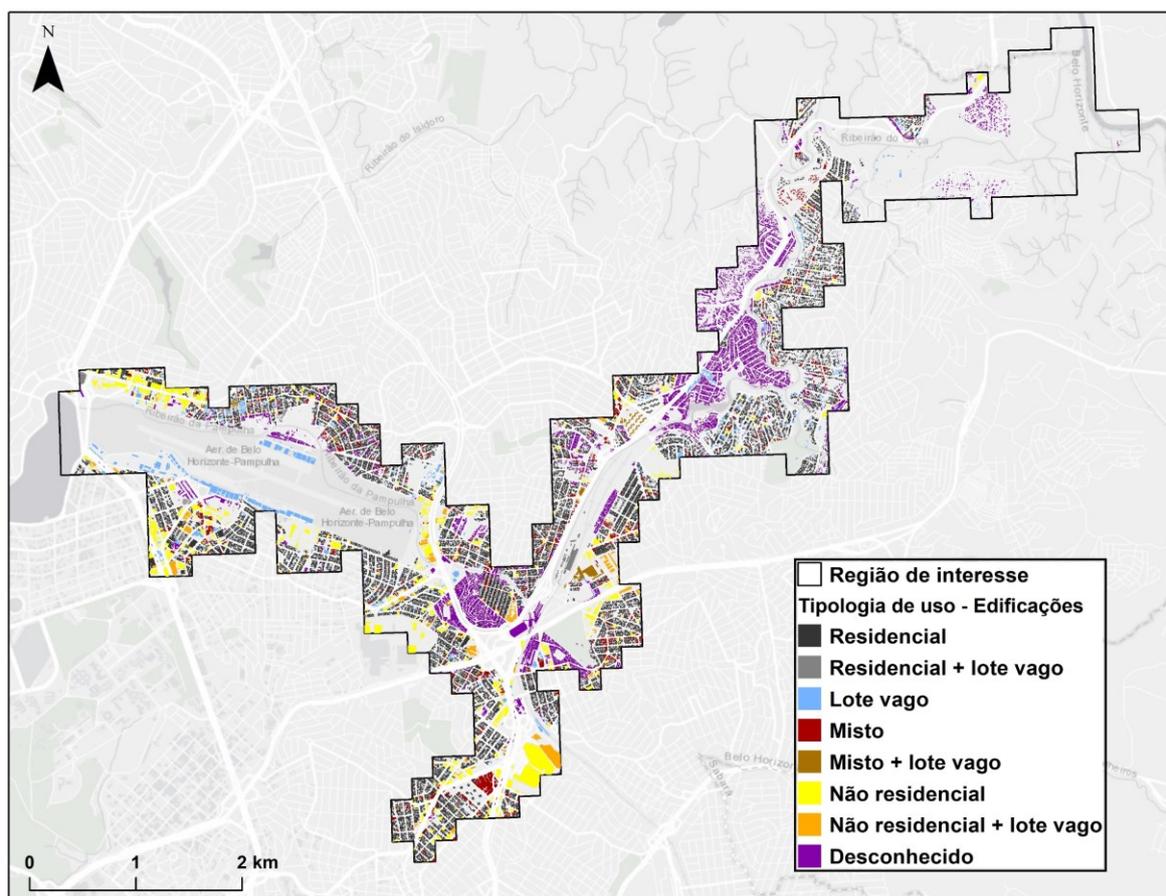
- pessoas que retornam para casa diariamente.

Para o período da tarde:

- pessoas que não trabalham;
- pessoas que realizam trabalho doméstico no município;
- pessoas que trabalham no domicílio;
- pessoas que estudam de manhã (adotado do sexto ano do fundamental até o terceiro ano do ensino médio) e que não trabalham; e
- 50% das pessoas que cursam ensino superior e que não trabalham.

Especificamente para essa tipologia de construção, por meio da amostra de domicílios dos microdados, as residências foram classificadas em relação à tipologia de ocupação como: residencial unifamiliar (RES1); apartamentos (RES3); dormitório institucional (RES4); penitenciária e casa de recuperação (RES5); e asilo ou orfanato (RES6). Os materiais de construção considerados foram alvenaria e madeira.

Figura 2: Distribuição espacial das edificações por tipologia de uso e ocupação do solo.



Levantamento de dados para equipamentos relacionados ao ensino, saúde e assistência social

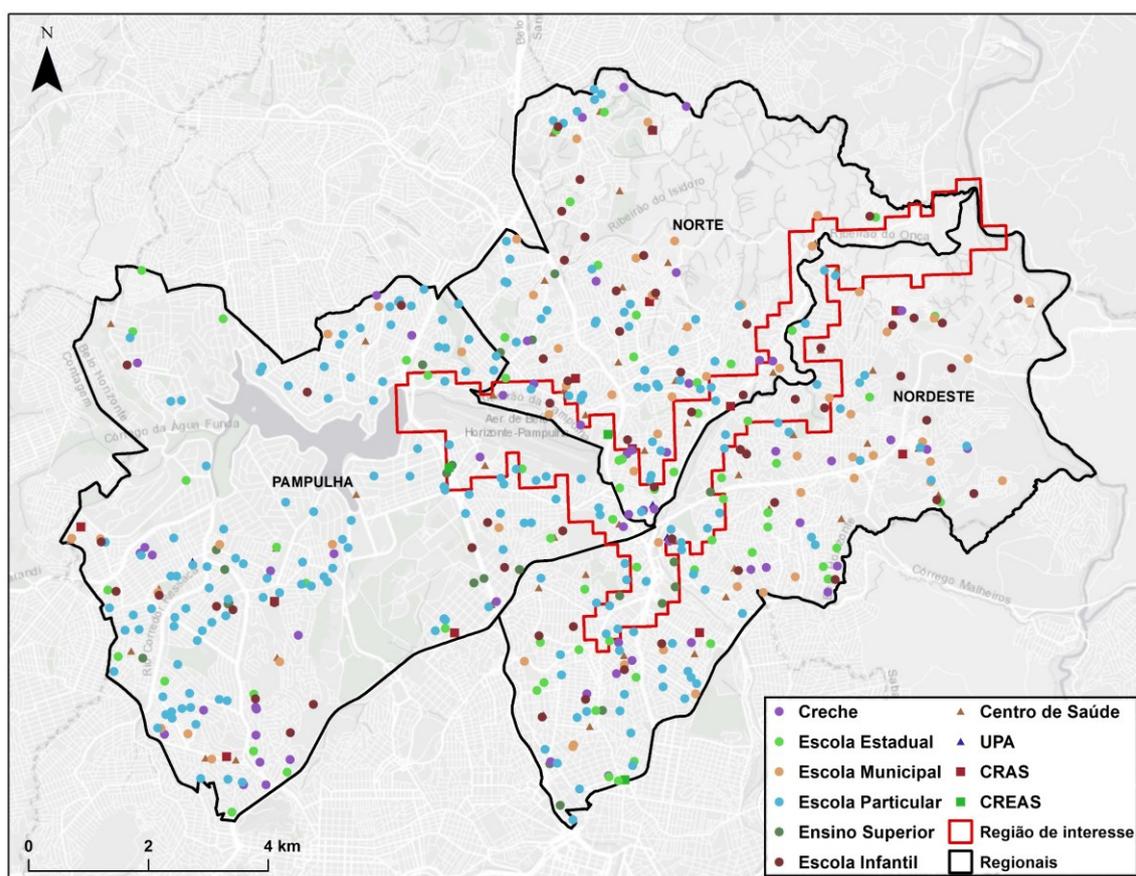
Os equipamentos de ensino, saúde e assistência social foram obtidos por meio de dados da Prodabel, arquivos vetoriais com informações contendo a localização de creches, escolas (infantil, fundamental, estadual, particular e superior), centros de saúde, Unidades de Pronto Atendimento

(UPA), Centros de Referência de Assistência Social (CRAS) e Centros de Referência de Assistência Social (CREAS).

As variáveis de educação e trabalho dos microdados e áreas das construções foram utilizadas para determinação das populações em período noturno ou diurno. Em grande maioria, as zonas de abrangência desses equipamentos são menores comparadas a uma área de ponderação, porém, a influência dessas construções extrapola essas áreas abrangência e de ponderação (Nunes e Faria, 2015). Logo, foi adotada a respectiva regional (Pampulha, Norte, Nordeste) em que a construção se localiza como zona de abrangência para realização das análises subsequentes. Ao todo são 583 unidades localizadas nas regionais, sendo que 84 delas se encontram no interior da área de interesse (Figura 3).

Para determinação da população segundo critérios adotados anteriormente, foram utilizadas informações a respeito da escolaridade e trabalho (local, ocupação e atividade) da amostra de pessoas na área de interesse, segundo os microdados do censo demográfico de 2010. Em todas as situações, foram utilizadas as variáveis de local de trabalho e de estudo para que somente fossem consideradas pessoas que permanecem no município.

Figura 3: Distribuição espacial dos equipamentos nas regionais e área de interesse, segundo dados da Prodabel.



Os dados foram analisados separadamente para cada regional por meio da agregação das áreas de ponderação contidas na respectiva regional. Foram agregadas oito, seis e seis áreas de ponderação para regional Nordeste, Norte e Pampulha, respectivamente.

Os valores obtidos para toda regional foram distribuídos para cada construção por meio de uma ponderação considerando como peso a área calculada das edificações para cada lote em que se

localiza a construção. A utilização da área das edificações presentes no lote para ponderação foi adotada com o intuito de evitar a superestimação de população em lotes com grandes áreas não ocupadas (campos de futebol, estacionamentos, áreas verdes, etc.), sendo que nos casos em que existiam mais de um equipamento no lote, a área total da edificação foi distribuída de maneira homogênea para todos os equipamentos presentes no respectivo lote.

Levantamento de dados para populações e construções relacionadas a atividades econômicas

Diferentemente das tipologias de construções anteriores, para atividades econômicas, todo o município de Belo Horizonte foi adotado como zona de abrangência. Os dados também foram obtidos pela Prodabel, que dispõe de informações sobre atividades econômicas existentes em Belo Horizonte. Esses dados informam a localização da atividade, o tipo de atividade, a área utilizada, porte da empresa, data de início, natureza jurídica, razão social e CNPJ. Na base de dados, constam 379.402 atividades no município de Belo Horizonte, sendo 12.324 atividades na área de interesse.

Foram desconsideradas as atividades em zonas exclusivamente residenciais (para evitar dupla contagem, visto que na análise de domicílios já foram consideradas pessoas que trabalham em residências nessas áreas) e atividades semelhantes aos equipamentos tratados anteriormente. Com base nessa análise, foram identificadas 156.241 e 5.070 atividades econômicas em Belo Horizonte e na área de interesse, respectivamente.

Variáveis de trabalho dos microdados e a área dessas construções foram utilizadas para quantificação das populações em duas categorias em relação às hipóteses sobre o seu funcionamento em diferentes períodos do dia. Como atividades noturnas (02:00) foram considerados: bares e estabelecimento especializados em serviços de bebidas, com entretenimento; casas de festas e eventos e discotecas e danceterias.

As pessoas que possuem trabalho no município (exceto aquelas que possuem atividades semelhante às já utilizadas na análise de exposição de construções de ensino, saúde e assistência social) e fora do domicílio foram consideradas ocupantes dessas atividades econômicas. A distribuição populacional foi de maneira proporcional, igualmente ao realizado na análise dos equipamentos.

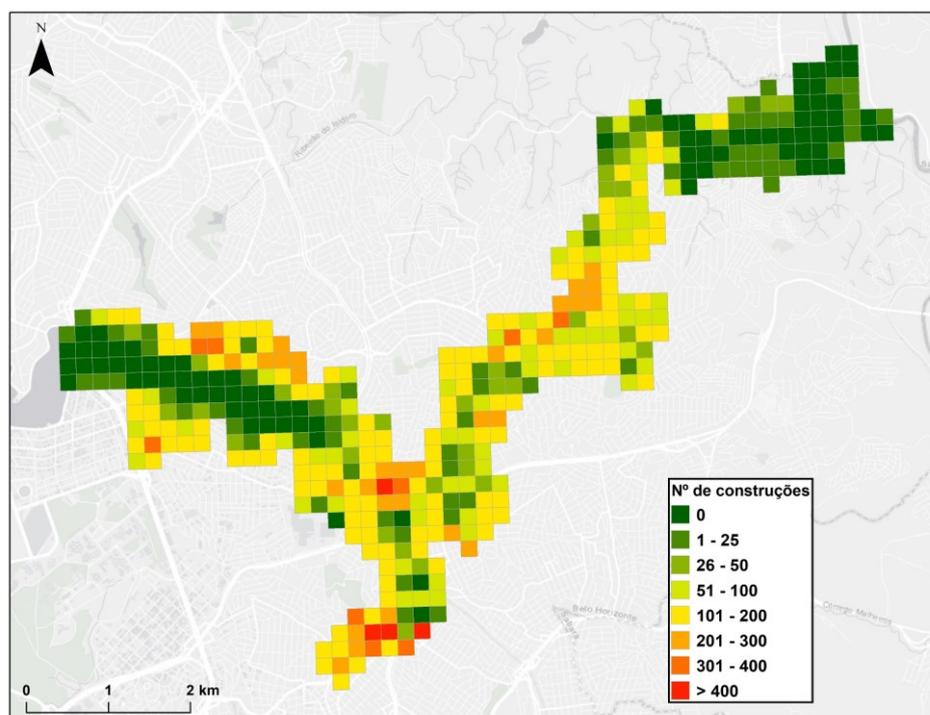
RESULTADOS

Por meio do mapeamento, foram estimadas 38.022 construções na área de interesse. As populações foram estimadas em 101.865 e 106.520 pessoas, em horários diurnos e noturnos, respectivamente. Em relação à caracterização dos domicílios, identificou-se o predomínio da tipologia residencial unifamiliar (25.656 domicílios) seguida por apartamento (6.953 domicílios) e do material de construção alvenaria (32.532 domicílios). Na Tabela 2 são apresentados os resultados discretizados por tipologia de construção e pelo fator mobilidade e na Figura 4 é apresentado o número de construções estimadas agregadas nos limites da grade estatística.

Tabela 2: Estimativa da distribuição da população na região de interesse em horário diurno e noturno.

Tipo de ocupação	Nº de construções	População diurna		População noturna	
		<65 anos	>65 anos	<65 anos	>65 anos
Residencial	32.868	48.218	7.099	97.855	7.722
Equipamentos	84	18.051	180	696	7
Comerciais	5.070	27.687	630	232	8

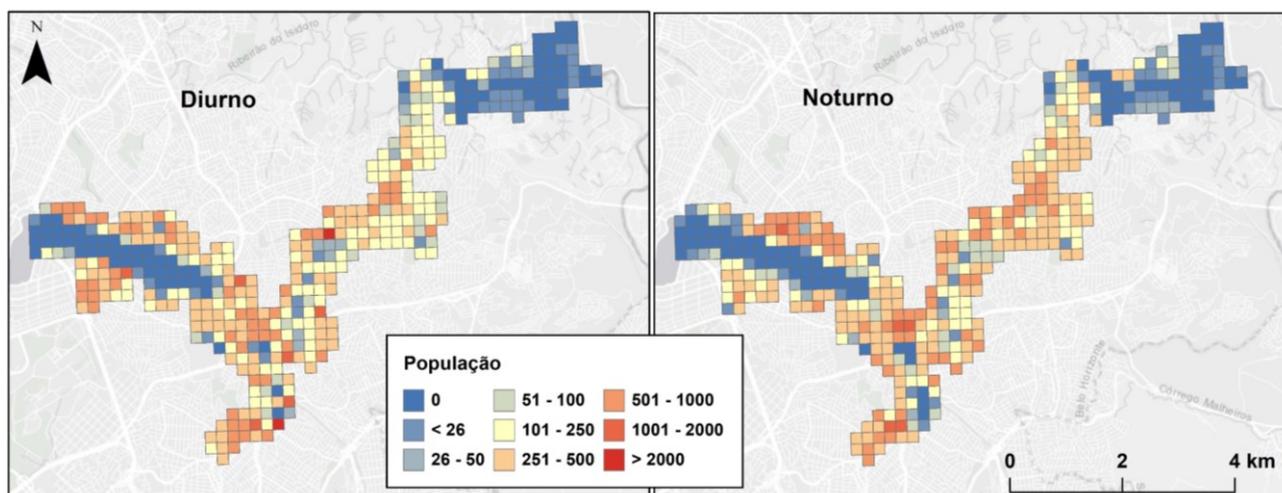
Figura 4: Número de construções estimadas agregadas nos limites da grade estatística.



Durante o período noturno, há predominância da população nos domicílios. Por outro lado, no período diurno, há um equilíbrio, com a população concentrada em equipamentos e em construções comerciais, demonstrando a tendência de aproximadamente 53% da população presente nos domicílios nesse período não estarem nessas residências durante o dia. A Figura 5 apresenta a população agregada em cada grade utilizada e demonstra que, para o período da noite, a população se distribui de modo mais homogêneo no vale a jusante comparado ao período diurno, no qual há a concentração da população nos primeiros quilômetros logo a jusante da barragem.

Neste estudo, a caracterização das construções e da população abrangeu uma região um pouco maior que a extensão de inundação pelo fato do uso de diferentes unidades geográficas e por ser recomendada tal escala de caracterização para o planejamento em situações de emergência. Desse modo, diversas construções e uma parcela da população não estão sujeitas ao contato direto com inundação do cenário do adotado.

Figura 5: Populações estimadas agregadas nos limites da grade estatística para períodos diurnos e noturnos.



Analisando a exposição direta da população em risco, por meio da sobreposição dos mapas de exposição gerados e a extensão da inundação apresentada na Figura 1, estima-se que uma população de 15.793 pessoas pode ser impactada diretamente por um evento de ruptura diurno, enquanto 14.675 estariam diretamente expostas para um evento com ocorrência noturna. O número total de edificações expostas alcança 5.012, sendo 4.320 edificações classificadas como residenciais, 692 como comerciais e 10 equipamentos.

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Os resultados apresentados demonstram o potencial e a importância da disponibilidade de bases de dados sobre populações e equipamentos urbanos para subsidiar a elaboração de estudos subsequentes. A análise de exposição deste estudo foi realizada exclusivamente com base em dados secundários e diversas hipóteses foram adotadas durante o desenvolvimento e execução da metodologia. Além disso, os valores obtidos pela análise foram arranjados de maneira proporcional e distribuídos de forma homogênea ou ponderada na região afetada e devido à falta de informação, o número de pavimentos das construções não foi um dado considerado na análise.

Outra fonte de incerteza é o fato de o censo demográfico ocorrer no intervalo de tempo de 10 anos. Logo, informações sobre as construções e sobre a população podem estar desatualizadas. Desse modo, um esforço posterior em campo é necessário para confirmar as estimativas e identificar equipamentos em função de graus de sensibilidade. Populações transitando pelas vias públicas, bem como acréscimos de população relacionados a eventos isolados que possam ocorrer dentro da área de interesse, também devem ser objetos de trabalhos futuros mais aprofundados.

Face à grande quantidade e qualidade de dados, em geral, limitações em análise de exposição em microescala ainda são bem comuns, sendo uma das principais motivações para o uso ainda não frequente de modelos de avaliação de riscos de inundações que necessitam de dados dessa escala, como por exemplo o modelo HEC-LifeSim, utilizado em Silva *et al.* (2021), com base nos dados explorados no presente trabalho para essa finalidade.

Países como os Estados Unidos já possuem um inventário de construções com a caracterização detalhada de diversas tipologias de construções e da população no banco de dados do *National Structure Inventory* (NSI). No contexto nacional, destaca-se a extrema relevância do censo demográfico e espera-se que, com avanços de gestão e tecnológicos, essa base de dados se torne cada vez mais útil e aplicável na avaliação de riscos de inundações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, ao CNPQ, à FAPEMIG e à UFMG pelo amparo concedido para o desenvolvimento das pesquisas, e à Prefeitura de Belo Horizonte pelo fornecimento de bases de dados adotadas no estudo de caso.

REFERÊNCIAS

- BUENO, M. C. D. (2014). *Grade estatística: uma abordagem para ampliar o potencial analítico de dados censitários*. 239f. Tese (Doutorado em Demografia) —UNICAMP.
- BRAZ, M. G.; OLIVEIRA, M. L.; MELO, B. R. (2015). “*Considerações a Lei 12334/2010 à Luz de um Rompimento Hipotético de uma Barragem em Meio Urbano. Estudo de Caso: Barragem da Pampulha*” in Anais do XXVIII Congresso da ABES, Rio de Janeiro.

- DI MAURO, M.; DE BRUIJN, K. M.; MELONI, M. (2012). “Quantitative methods for estimating flood fatalities: towards the introduction of loss-of-life estimation in the assessment of flood risk”. *Natural Hazards* 63, pp.1083-1113.
- DINÉSIO FRANCO ENGENHARIA/GEOTECNIA (2015). *Plano de Segurança, Relatório, Volume IV - Plano de Ação de Emergência – PAE*. P1503-SUDECAP-S-BA-RL-05-GE_r0.
- HILL, P.; KAVANAGH, C.; LANG, S.; NORTHFIELD, S. (2018). “Applications of Simulation Model to Estimate Potential Loss of Life” in *Anais do XXVI International Congress on Large Dams*, Vienna, Austria.
- IBGE (2010). *Descrição das variáveis da amostra do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro.
- IBGE (2016). *Grade Estatística*. Rio de Janeiro.
- MERZ, B.; KREIBICH, H.; SCHWARZE, R.; THIEKEN, A. (2010). “Review article 'Assessment of economic flood damage'”. *NHESS* 10(8), pp. 1697-1724.
- de MOEL, H.; JONGMAN, B.; KREIBICH, H.; MERZ, B.; PENNING-ROUSELL, E.; WARD, P. J. (2015). “Flood risk assessments at different spatial scales”. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 20(6), pp. 865-890.
- NUNES, A. D. S. V.; FARIA, L. A. D. (2015). “ATLAS ESCOLAR: da jurisdição à região escolar”. *Revista do Instituto de Ciências Humanas* 10(13), pp. 66-79.
- RESENDE, A. P.; ROCHA, F. F.; PALMIER, L. R. (2017). “Análise Probabilística para Propagação de Onda de Cheia Associada à Ruptura Hipotética de Barragens – Estudo de Caso: Barragem da Pampulha” in *Anais do XXII SBRH*, Florianópolis.
- SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C.; NASCIMENTO, N. O. (2020). “Análise de exposição da população do vale a jusante da barragem da Lagoa da Pampulha a inundações – Belo Horizonte/MG” in *Anais do II Encontro Nacional de Desastres*. ABRH.
- SILVA, A. F. R.; ELEUTÉRIO, J. C.; NASCIMENTO, N. O. (2021). “Alerta e Redução de Perdas De Vidas Associadas à Ruptura Hipotética da Barragem da Pampulha –MG” submetido ao XXIV SBRH, Belo Horizonte.
- VIANINI NETO, L. (2016). “Estudo de ruptura da barragem da Pampulha, em Belo Horizonte: retroanálise da brecha do acidente de 1954 e ruptura hipotética nas condições atuais”. 286f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - UFMG.
- VIEIRA, L. M. S.; PALMIER, L. R.; NASCIMENTO, N. O.; ELEUTÉRIO, J. C. (2020). “Avaliação de Hidrogramas de Ruptura para Simulação da Ruptura Hipotética da Barragem da Pampulha - MG” in *Anais do II Encontro Nacional de Desastres*. ABRH.