

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

ANA LUIZA ALMEIDA SOARES  
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Cesar Pedrosa Silva

**AVALIAÇÃO DE APIS DE GEOCODIFICAÇÃO EM GRANDES  
CIDADES BRASILEIRAS**

Ouro Preto, MG  
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS  
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO

ANA LUIZA ALMEIDA SOARES

**AVALIAÇÃO DE APIS DE GEOCODIFICAÇÃO EM GRANDES CIDADES  
BRASILEIRAS**

Monografia apresentada ao Curso de Ciência da Computação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Ciência da Computação.

**Orientador:** Prof. Dr. Rodrigo Cesar Pedrosa Silva

Ouro Preto, MG  
2023

# Resumo

As APIs de geocodificação online desempenham um papel significativo em aplicações que requerem informações de localização. Para garantir a qualidade dessas aplicações, é essencial avaliar a precisão das APIs utilizadas. Este estudo tem como objetivo avaliar a qualidade de cinco APIs de geocodificação implementadas no TerraLAB: Google Maps, Mapbox, TomTom, Here e Open Route Service (ORS). A avaliação foi realizada com base no erro de geocodificação em comparação com uma base de dados de referência na região metropolitana de São Paulo.

Utilizamos várias métricas para a análise comparativa, incluindo média, desvio padrão, mediana, média aparada em 5%, taxa de resposta (proporção entre solicitações de geocodificação e respostas) e taxa de acerto (quantidade de endereços com erro menor que 150 metros). Além disso, conduzimos uma análise espacial do erro e investigamos a relação entre discrepância e erro, usando a medida de covariância. Devido a problemas na aplicação que coleta as geocodificações, esta etapa do projeto se concentrou apenas nas APIs Mapbox, TomTom e Here, resultando em um desempenho geral insatisfatório. A maioria das APIs apresentou uma taxa de resposta baixa, com a maior delas ficando abaixo de 90%, o que impactou a integridade do experimento. Em relação à taxa de acerto, todas as APIs obtiveram valores considerados insatisfatórios pela nossa equipe de pesquisa. Além disso, observamos a ocorrência de erros significativos que prejudicaram a análise espacial. No que diz respeito à relação entre discrepância e erro, não pudemos identificar uma correlação forte, possivelmente devido ao número limitado de geocodificações realizadas. Para a próxima fase do projeto, planejamos repetir a análise com as APIs restantes para os dados de São Paulo e estender a avaliação para os dados de Belo Horizonte.

**Palavras-chave:** GeoAPIs. Qualidade.

# Abstract

Online geocoding APIs play a significant role in applications that require location information. To ensure the quality of these applications, it is essential to assess the accuracy of the APIs used. This study aims to evaluate the quality of five geocoding APIs implemented in TerraLAB: Google Maps, Mapbox, TomTom, Here, and Open Route Service (ORS). The evaluation was conducted based on geocoding error compared to a reference database in the metropolitan region of São Paulo.

We used various metrics for comparative analysis, including mean, standard deviation, median, trimmed mean at 5%, response rate (the ratio of geocoding requests to responses), and accuracy rate (the number of addresses with errors less than 150 meters). Additionally, we conducted a spatial analysis of the error and investigated the relationship between discrepancy and error using the covariance measure. Due to issues with the application collecting geocodings, this project phase focused only on the Mapbox, TomTom, and Here APIs, resulting in overall unsatisfactory performance.

Most APIs exhibited a low response rate, with the highest among them falling below 90%, which impacted the experiment's integrity. Regarding the accuracy rate, all APIs obtained values considered unsatisfactory by our research team. Furthermore, we observed significant errors that hindered spatial analysis. Concerning the relationship between discrepancy and error, we could not identify a strong correlation, possibly due to the limited number of geocodings performed.

For the next phase of the project, we plan to repeat the analysis with the remaining APIs for São Paulo data and extend the evaluation to Belo Horizonte data.

**Keywords:** GeoAPIs. Quality

# **Lista de Ilustrações**

# Lista de Tabelas

# Lista de Abreviaturas e Siglas

|       |  |
|-------|--|
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| DECOM | Departamento de Computação               |
| UFOP  | Universidade Federal de Ouro Preto       |
| PLN   | Processamento de Linguagem Natural       |
| SIG   | Sistema de Informação Geográfica         |
| ORS   | Open Route Service                       |

# Sumário



# 1 Introdução

## 1.1 Endereços e Geocodificação

Quase tudo o que acontece,  
acontece em algum lugar. Saber o  
local onde algo acontece pode ser  
fundamental.

---

(??)

Em (??), os autores exploram a relação entre a humanidade e a localização. Para eles, é evidente que a maior parte das atividades humanas ocorre no planeta Terra, e, portanto, a vida está profundamente ligada à localização. Assim sendo, compreender e manipular informações geográficas é essencial para qualquer aplicação que envolva a humanidade. Além disso, os autores explicam que decisões importantes podem ter consequências geográficas. Um exemplo disso seria uma transação financeira que, em casos extremos, poderia desencadear uma crise econômica em uma região específica.

O endereço é a principal maneira de conceitualizar a localização no mundo atual(??). Isso ocorre devido ao fato de os endereços serem utilizados em diversas aplicações de diferentes áreas de estudo, como na saúde (??????), nas ciências sociais (??), na análise criminal ou judiciária (??), na análise ambiental (??), na ciência da computação (??), na economia (??) e em outros campos.

Para atingir esse objetivo, é necessário criar uma representação computacional do endereço para que as aplicações possam utilizá-la. A representação mais comum é a utilização de coordenadas x e y em um plano, geralmente representando latitude e longitude. Esse processo de transformação em um endereço nessas coordenadas é chamado de Geocodificação ou Georreferenciamento e envolve três etapas (??):

- Processamento do endereço de entrada: o endereço é lido, dividido em componentes (rua, número, bairro, etc.), padronizado e cada campo é atribuído a uma categoria; por fim, as categorias necessárias são indexadas.
- Busca na base de referência: com base no algoritmo escolhido, é realizada uma busca na base de referência para selecionar e classificar potenciais candidatos como resposta.
- Seleção do(s) candidato(s) para resposta: após a busca, a classificação gerada é analisada e os melhores candidatos são selecionados.

Além de representar um endereço computacionalmente, o georreferenciamento utilizando latitude e longitude oferece várias vantagens (??):

- Precisão espacial: é capaz de indicar com alta precisão a localização de um determinado endereço.
- Cálculos de distância: como é um sistema espacial, permite a obtenção de distâncias e, por consequência, o cálculo de outras métricas para o endereço.
- Compreensão global: é um sistema usado mundialmente e, geralmente, é mais fácil de identificar e entender.

Apesar de todas as vantagens e aplicações, o processo de geocodificação pode levar a informações incorretas. Essas informações conflitantes são chamadas de "incertezas"(??). Para compreender o que é a incerteza, é necessário considerar outros aspectos das falhas de informação. Nesse contexto, são introduzidos os seguintes conceitos:

- Erro: a diferença entre o observado e o obtido.
- Falta de acurácia: a diferença entre a realidade e nossa representação dela.
- Ambiguidade: quando um único valor está presente em mais de um objeto.
- Indefinição: a falta de informações necessárias.

Após definir esses termos, a incerteza é definida como: "a medida da compreensão do usuário sobre a diferença entre o conteúdo de um conjunto de dados e os fenômenos reais que os dados devem representar"(??). Em outras palavras, a incerteza é uma medida que descreve o nível de compreensão do usuário em relação ao conjunto de dados obtidos e à realidade que esses dados têm a intenção de representar. A figura ?? apresenta uma visão conceitual da incerteza, onde cada processo muda um pouco a realidade, sendo assim a representação final tem sempre um nível de incerteza que está relacionado com o filtro aplicado em cada etapa. Por exemplo, a incerteza entre o mundo real e a concepção da realidade está relacionada ao filtro I1 que distorce a realidade para que seja possível a concepção. A partir dessa perspectiva, a incerteza foi aceita como uma métrica apropriada para avaliar a qualidade dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (??).

Apesar da incerteza ser uma métrica de importância significativa, sua mensuração é complexa. A incerteza envolve medidas que são subjetivas e podem variar de acordo com cada indivíduo avaliado. Por essa razão, optamos por utilizar a medida de erro para representar a qualidade da geocodificação. Embora essa medida não seja equivalente à incerteza, ela é uma parte integrante da mesma. Dentro das componentes que compõem a incerteza, a medida de erro é a mais objetiva e fácil de mensurar.

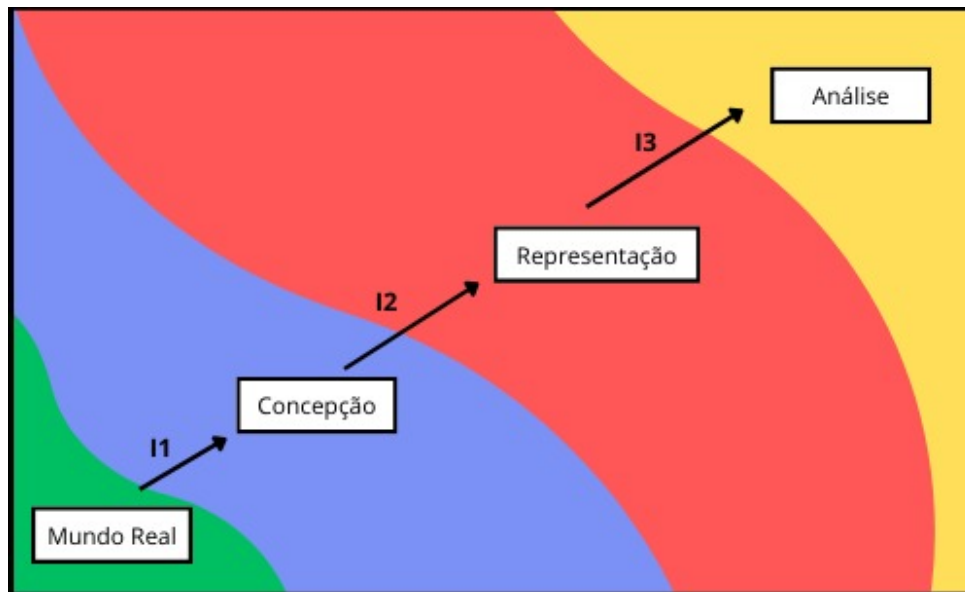


Figura 1.1 – Adaptada do livro (??). Visão conceitual da incerteza

Atualmente, no TerraLAB - Laboratório de Pesquisa e Capacitação em Software (??), utilizamos informações geográficas para o desenvolvimento de nossas aplicações. Esses aplicativos utilizam endereços geocodificados para criar mapas, rotas, áreas de abrangência, relatar locais, divulgar eventos, entre outras funcionalidades. Isso ressalta a grande importância da geocodificação e como a qualidade desse processo impacta significativamente o que é produzido em nosso laboratório.

Para adquirir informações relacionadas a endereços, fazemos uso da geocodificação obtida por meio de APIs online de geocodificação.

## 1.2 APIs de Geocodificação e Análise de qualidade

Por muitos anos, a principal maneira de obter informações geográficas era através de software SIG. Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) é um conjunto de ferramentas capazes de analisar e integrar dados geográficos, permitindo acesso fácil a dados para os usuários, sem depender de ferramentas como o GPS (??).

Embora os SIG tenham sido a ferramenta convencional por muitos anos, utilizar esse método para geocodificação requer um profissional capacitado. A ferramenta demanda o pré-processamento dos dados, criação de um localizador de endereços, customização de parâmetros, controle de qualidade e correção manual de falhas. Todo esse processo é custoso para o usuário comum. Por essa razão, a geocodificação utilizando ferramentas online retira do usuário grande parte da responsabilidade, como a manutenção da base, tornando assim o processo de obtenção de informações menos oneroso (??).

Apesar de a geocodificação online ser mais simples de utilizar, para que o SIG seja substituído por ela, deve-se considerar sua qualidade em relação à qualidade do SIG. No artigo

(??), são avaliadas oito ferramentas de geocodificação, sendo duas delas SIGs e as demais ferramentas da internet. As ferramentas utilizadas foram: SRI ArcGIS Address Locator, CoreLogic PxPoint, Google Maps API, Yahoo! PlaceFinder, Microsoft Bing, Geocoder.us, Texas A and M University Geocoder e OpenStreetMap (OSM). Para calcular o erro, uma base de referência foi utilizada, contendo informações descritivas do endereço (rua, número, cidade etc.) e informações geográficas (latitude e longitude). Essa base é considerada a referência, pois os dados de latitude e longitude foram obtidos manualmente (por GPS ou pesquisa manual). Chamaremos essa e outras bases de referência de "base padrão ouro". A base em questão contém 940 endereços do estado do Texas, Estados Unidos da América (EUA), sendo que 78 destes são da região Central Texas, região considerada importante para o autor. O erro de cada endereço geocodificado foi calculado como a distância euclidiana de dois pontos, sendo eles, o ponto referência e o ponto obtido a partir da geocodificação.

O estudo evidenciou que não há diferença significativa entre as ferramentas online e os SIGs. Tanto os SIGs quanto as ferramentas online apresentaram média e desvio padrão de erro semelhantes. Além disso, a taxa de resposta (ou seja, quantos endereços receberam uma resposta da ferramenta utilizada) variou entre 97,8% e 100%, o que é considerado satisfatório. Dessa forma, o estudo obteve êxito ao demonstrar que as ferramentas online podem ser utilizadas como substitutas dos SIGs.

Apesar de (??) ter apresentado resultados significativos, o estudo apresenta algumas limitações. A principal delas é a quantidade de dados utilizada para a avaliação, além do foco restrito a uma única região (Texas, EUA). O presente trabalho busca abordar essas limitações ao conduzir a análise em uma região diferente do mundo, com ênfase no Brasil, e ampliar a quantidade de dados avaliados. Entretanto, nosso enfoque será exclusivamente em ferramentas de geocodificação online (GeoAPIs), considerando que elas já estão consolidadas no mercado e na academia.

Outro estudo importante é (??), que faz uma avaliação da qualidade da geocodificação do Google Maps API fornecida pela Google Cloud Platform (??). Nesse estudo, os autores utilizam uma base padrão ouro com os dados de Belo Horizonte, cidade de Minas Gerais, estado do Brasil para essa avaliação. A base conta com mais de 540 mil endereços da cidade e é mantida pela empresa de informática e informação do município de Belo Horizonte - Prodabel (??). A empresa atualiza os dados mensalmente e tem parceria com outras 26 empresas para manter a base o mais correta possível. Ela conta com informações descritivas, sociais e espaciais do endereço. Para medir o erro, foi calculada a distância euclidiana dos pontos geocodificados para os pontos originais. A partir do erro, o estudo faz análises espaciais do erro e também relaciona a acurácia descrita pela API com o erro gerado. O estudo mostrou que o Google Maps API tem taxa de acerto de 74,7%, considerando que acertou se o erro for menor de 150 metros. Outra descoberta foi que o erro é menor nas áreas centrais da cidade, e maior na periferias. Os autores também tentaram fazer uma relação entre erro e renda, porém não foi possível visualizar nenhuma relação

direta.

Apesar das descobertas importantes, o estudo apresenta limitações notáveis. Primeiramente, ele se restringe à análise de apenas uma API de geocodificação. Além disso, o estudo se concentra exclusivamente em uma cidade brasileira, o que restringe a generalização dos resultados. Para abordar essas limitações, nosso trabalho atual visa expandir a análise. Planejamos examinar uma amostra da mesma base de dados, utilizando diferentes APIs de geocodificação. Além disso, nossa pesquisa incluirá uma análise de uma base de dados da região metropolitana de São Paulo, proporcionando uma maior diversidade ao nosso estudo.

A avaliação da qualidade das APIs de geocodificação representa uma frente crucial em nosso estudo. Contudo, buscamos ir além por meio de duas abordagens distintas.

A primeira consiste em investigar se existe alguma métrica que poderia substituir o erro. Em outras palavras, buscamos identificar se há alguma medida que esteja correlacionada com o erro, de modo que possamos utilizá-la como alternativa à mensuração do erro em si.

Conscientes de que a obtenção do erro requer um valor de referência, considerado suficientemente preciso para calcular o erro, reconhecemos que a aquisição de informações geográficas de alta qualidade é uma tarefa desafiadora. A forma mais confiável de reduzir a incerteza é a coleta de dados *in loco*, com a utilização de dispositivos GPS. Por outro lado, medidas de discrepância dependem apenas dos valores que estão sendo avaliados. Para entender melhor essa afirmação, precisamos entender o que é discrepância no conceito geral e como ela é aplicada na nossa pesquisa. Discrepância é o mesmo que discordância ou desigualdade (??). Sendo assim, a discrepância reflete o desacordo entre duas ou mais coisas. No contexto da pesquisa, tratamos como discrepância as diferenças de informações entre as APIs. Então, as medidas de discrepância são aquelas que medem de alguma forma essa diferença. Dessa forma, temos medidas que necessitam apenas das informações geradas pelas APIs, facilitando a obtenção das métricas em relação ao erro.

Com acesso às medidas de discrepância e o erro, um dos nossos objetivos é verificar se existe alguma relação entre eles. Correlação é definida como: "grau de relação entre as variáveis, que procura determinar quão bem uma equação linear, ou de outra espécie, descreve ou explica a relação entre as variáveis" (??).

A segunda abordagem visa compreender as causas do erro e identificar a melhor forma de configurar as entradas nas APIs a fim de minimizar o erro. Para isso é importante entender como as APIs de geocodificação e a ferramenta de coleta de geocodificação do TerralAB (??) lidam com as entradas.

### 1.3 APIs de Geocodificação e formatação das entradas

As APIs possuem recomendações de formato de entrada que podem ser encontradas na documentação das mesmas.

Apesar das recomendações nas documentações das APIs, existem observações relacionadas à possibilidade de utilizar formatos de entrada diferentes dos apresentados, bem como a falta de informações abrangentes. Os geocodificadores das APIs são preparados para lidar com essas modificações, no entanto, a qualidade pode ser comprometida.

Com isso em mente, a equipe de análise de dados do TerraLAB (??) conduziu uma série de experimentos para avaliar os impactos da modificação na ordem dos endereços de entrada nas APIs. Foram realizados 10 experimentos, nos quais o formato de entrada variou. Para avaliar a qualidade dos dados produzidos, foi utilizada a métrica de 'dentro e fora da cidade'. Se o endereço resultante estivesse dentro dos limites da cidade em questão, considerava-se que a API acertou naquele endereço; caso contrário, considerava-se um erro. No total, foram utilizados 100 endereços. Esses experimentos resultaram em conclusões que orientaram as equipes do TerraLAB (??). Com base nesses e em outros experimentos, o TerraLAB adota abordagens diferentes de geocodificação para cada API.

Encontrar a melhor forma de organizar a entrada para os geocodificadores é uma meta de diversos estudos. Em (??), é proposto um método de padronização da entrada que melhora o resultado da geocodificação. Para validar o método, eles utilizaram 233 endereços de escolas em Eskişehir, uma cidade da Turquia, para a qual as coordenadas corretas são conhecidas. Foi criado um dicionário contendo as principais abreviações e falhas de escrita, que foram utilizadas em métodos de processamento de linguagem natural (PLN). Os métodos de PLN foram empregados para gerar o endereço padronizado a partir do endereço inicial, de acordo com o dicionário. Além disso, foram utilizados dois geocodificadores, o ArcGIS e o Google Maps. A qualidade da geocodificação foi avaliada com base na distância euclidiana entre o ponto geocodificado e o ponto de referência, considerando acerto quando o erro foi menor que 100 metros.

O estudo demonstrou que o método de padronização reduziu significativamente o erro da geocodificação e aumentou as taxas de acerto, com uma diferença variando de 6% a 20%, dependendo do formato e da API utilizados.

No entanto, é importante ressaltar que o artigo apresenta algumas divergências em relação ao escopo deste trabalho. O referido artigo utiliza técnicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN) para a padronização, enquanto nossa pesquisa não prevê a utilização de qualquer técnica de aprendizado de máquina. Além disso, os formatos e padronizações empregados pelos autores são específicos para a região da Turquia e, portanto, não podem ser diretamente aplicados ao contexto brasileiro. Por fim, uma limitação importante do artigo que pretendemos desenvolver diz respeito à quantidade de dados avaliados e às APIs utilizadas. Nossa intenção é expandir a análise nesse sentido.

A padronização do formato de endereços é um tópico de interesse para organizações em todo o mundo. Algumas organizações têm se esforçado para estabelecer um padrão no formato de endereços. A Organization for the Advancement of Structured Information Standards (OASIS) é mencionada como uma organização bem-sucedida no desenvolvimento de especificações que incluem a padronização de endereços. Essa padronização é utilizada no geocodificador do Google Maps (??). No entanto, vale ressaltar que nem todas as organizações adotam o mesmo padrão e muitas delas mantêm suas próprias convenções de formatação (??).

Todas essas considerações evidenciam que, apesar dos esforços em busca de um padrão na formatação de endereços com o objetivo de melhorar sua qualidade, ainda há muito a ser feito. Além disso, a padronização é influenciada por diversos fatores, incluindo o geocodificador utilizado e a região geocodificada. Nesse contexto, o presente trabalho tem como propósito propor e avaliar formatos de padronização que sejam aplicáveis à região do Brasil e aos geocodificadores utilizados no Laboratório TerraLAB.

## 1.4 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o erro, a discrepância e a acurácia de quatro APIs utilizadas no laboratório de pesquisa e capacitação em desenvolvimento de software - TerraLAB. As APIs em análise são: Google Maps, TomTom, Open Route Service (ORS) e Mapbox. O erro será analisado em relação às respostas fornecidas pelas APIs, verificando o quanto diferem das esperadas. A discrepância medirá o nível de discordância entre as APIs. Por fim, a acurácia será utilizada para verificar a precisão das respostas fornecidas por essas APIs.

Uma parte essencial deste trabalho é compreender os pontos em que essas APIs apresentam falhas. Portanto, a análise espacial dessas medidas terá grande destaque na pesquisa.

Com isso, gostaríamos de responder as seguintes perguntas:

- Qual API das utilizadas apresenta mais erros?
- Existe algum padrão espacial nos erros?
- Alguma medida de discrepância entre as APIs está relacionada aos erros?
- Alguma formatação da entrada contribui para a diminuição do erro?

Para alcançar essas respostas, temos objetivos específicos a serem cumpridos:

- Coletar bases de dados padrão-ouro;
- Calcular o erro;
- Analisar a distribuição espacial e de valores do erro;

- Calcular as medidas de discrepância nas bases escolhidas;
- Avaliar a distribuição dos valores das medidas de discrepância;
- Verificar se existem correlações entre as medidas de discrepância e o erro;
- Avaliar a distribuição espacial das medidas de discrepância.
- Avaliar para cada API qual formatação atinge os melhores resultados



## 2 Bases de Dados e Métodos de Geocodificação e Avaliação

Para avaliar a qualidade das APIs de geocodificação utilizadas no TerraLAB, recorremos a duas bases de dados padrão-ouro como referência. Utilizando essas bases, calculamos a medida de erro e conduzimos diversas métricas com base nessa medida.

### 2.1 Bases de Dados

Foram coletadas duas bases de dados distintas para este trabalho.

A primeira base coletada é proveniente do Centro de Estudos da Metrópole (CEM) (??). Essa base consiste em 12.502 endereços de escolas públicas e particulares do ensino básico da região metropolitana de São Paulo. A coleta desses dados foi realizada manualmente pelo CEM, utilizando GPS para registrar as coordenadas. Além das informações sobre os endereços, a base também contém uma variedade de informações sobre as escolas, possibilitando diversas análises relacionadas a esses dados. O CEM também disponibilizou um [mapa de cluster](#) que exibe todas as escolas, facilitando a visualização da localização de cada uma delas e da densidade das escolas em São Paulo e região. A Figura ?? mostra o mapa de cluster. Nele, é possível visualizar a localização das escolas individualmente (ao dar zoom) e, ao dar zoom-out, a concentração de escolas em determinadas áreas, utilizando um sistema de cores no qual laranja representa muitas escolas, amarelo representa uma quantidade média e verde representa poucas escolas.

Apesar de o mapa de cluster ser uma representação útil, resolvemos criar um gráfico de pontos para melhor visualizar a distribuição dos dados de São Paulo e também para comparar de forma equivalente com a segunda base utilizada. A Figura ?? mostra o gráfico citado.

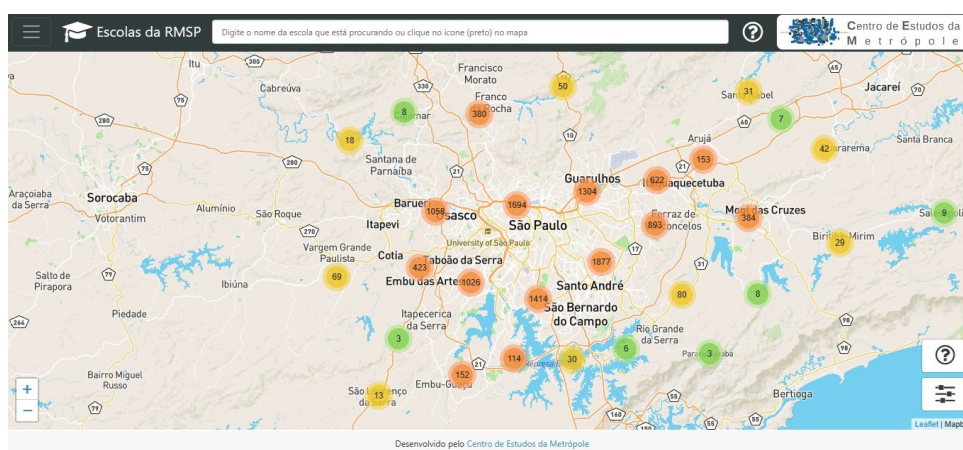


Figura 2.1 – Mapa de clusters do Centro de Estudos da Metrópole



vizualização, é possível ver a concentração e cobertura dos pontos. É possível observar que a amostra cobre toda a área abrangida apesar de não ter tanta concentração de pontos quanto a base original. Além disso, verifica-se uma ligeira concentração nas regiões periféricas do desenho, permitindo uma melhor delimitação da cidade.

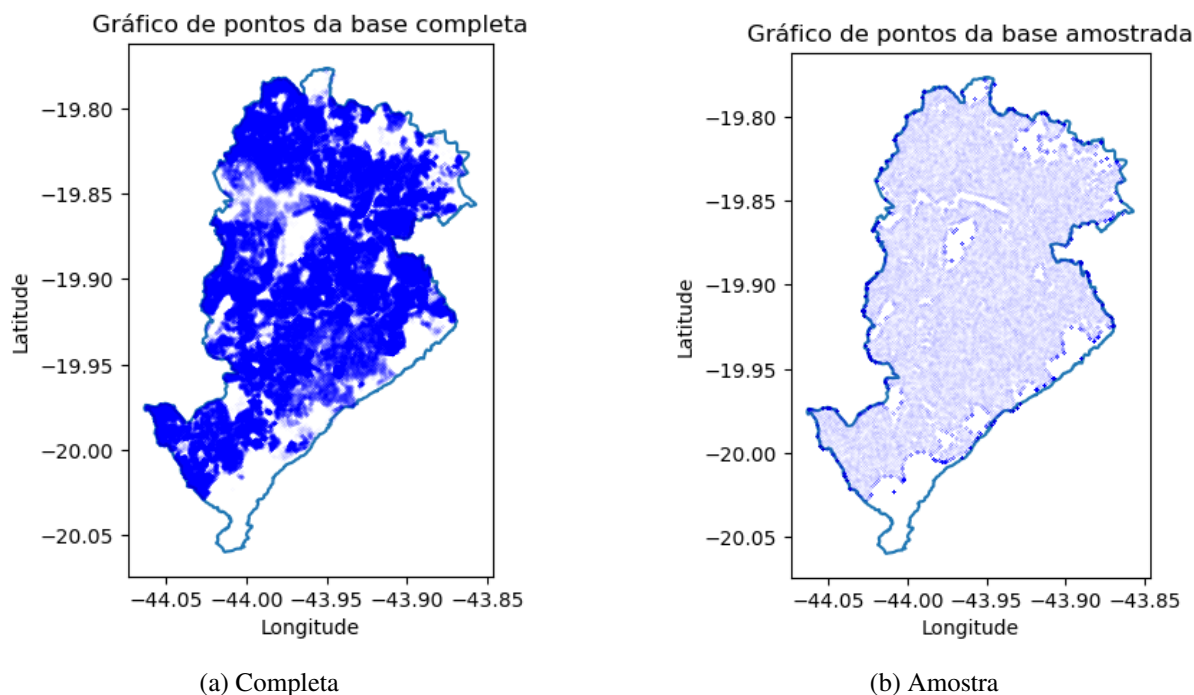


Figura 2.3 – Gráficos dos endereços da Base de Belo Horizonte e amostragem obtida

## 2.2 Processo de Geocodificação

Após a coleta das bases, é necessário prepará-las para a geocodificação. A etapa de preparação de dados envolve a seleção dos campos relevantes da base de dados, como nome da rua, número, bairro, CEP e cidade. Em outras palavras, serão selecionados apenas os campos descritivos do endereço e os campos de localização geográfica do endereço. Após a seleção, os dados são homogeneizados, substituindo abreviações comuns por suas formas completas correspondentes, e todas as letras são transformadas em letras maiúsculas. Esta etapa é conduzida pela equipe do TerraLAB e demonstrou-se que as APIs respondem de forma mais eficaz quando não há abreviações e as palavras estão escritas em maiúsculo.

Para realizar a geocodificação, os endereços previamente preparados são inseridos no banco de dados do Crawler, a aplicação responsável por solicitar e coletar informações de geocodificação. Os endereços são então retirados do Crawler para serem geocodificados. É importante destacar que o processo de geocodificação é executado pela equipe de Back-end do TerraLAB, e, portanto, é considerado um processo de "caixa preta".

Após a conclusão da geocodificação, os endereços geocodificados, juntamente com suas coordenadas geográficas, são armazenados no mesmo banco de dados, mas em tabelas distintas.

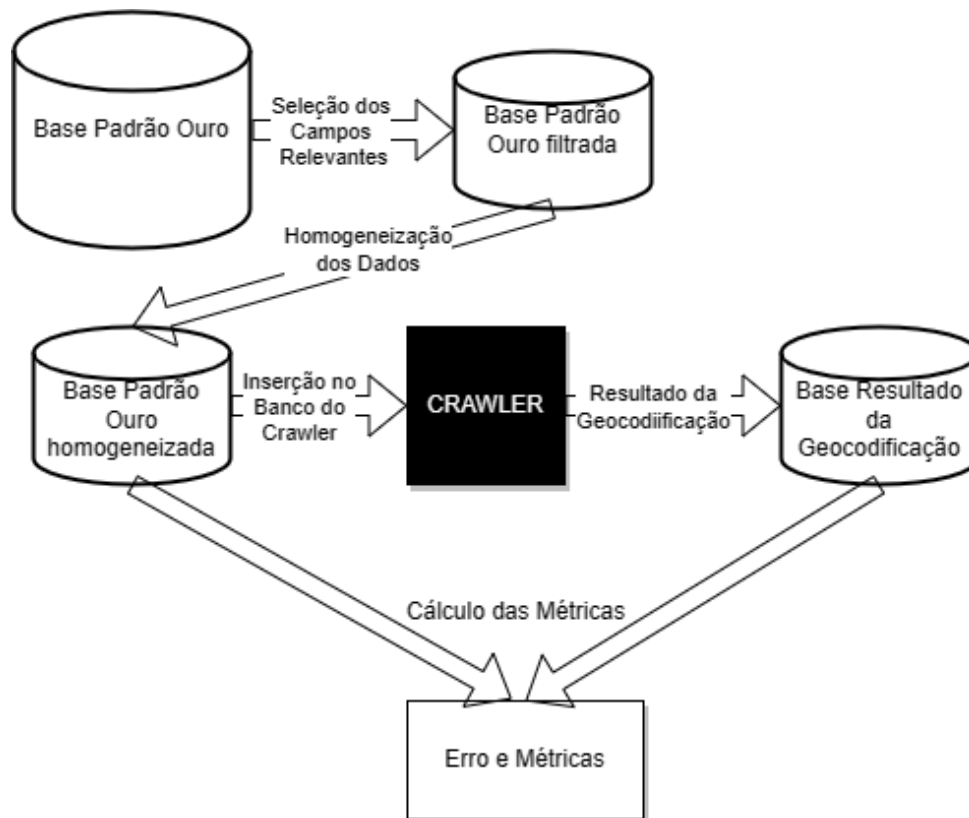


Figura 2.4 – Esquematização do processo de preparação e geocodificação dos dados

A Figura ?? esquematiza todo esse processo essencial para o nosso trabalho.

## 2.3 Método de Avaliação

### 2.3.1 Erro, Taxa de Resposta e Discrepância

A principal métrica utilizada para avaliar a qualidade da geocodificação é o erro do endereço. Com base nesse erro, calcularemos medidas estatísticas, como a média, a mediana, o desvio padrão e a média aparada em 5%, para analisar a precisão das GeoAPIs. Esse erro é calculado como a distância entre o ponto de referência e o ponto geocodificado pela GeoAPI, conforme a equação abaixo:

$$e = D(p_{\text{Ouro}}, p_{\text{Geo}}) \quad (2.1)$$

Onde:

- $e$  é o erro da geocodificação,
- $D$  é uma função que calcula a distância em quilômetros,
- $p_{\text{Ouro}}$  é o ponto da base padrão ouro, e

- $p_{\text{Geo}}$  é o ponto resultante da geocodificação.

$$D(p_1(\text{lat}_1, \text{lon}_1), p_2(\text{lat}_2, \text{lon}_2)) = \sqrt{(\text{lat}_2 - \text{lat}_1)^2 + (\text{lon}_2 - \text{lon}_1)^2} \quad (2.2)$$

Onde:

- $D$  é a distância euclidiana entre dois pontos,
- $p_1$  é o primeiro ponto,
- $p_2$  é o segundo ponto,
- $\text{lat}_1$  e  $\text{lat}_2$  são as latitudes de  $p_1$  e  $p_2$ , respectivamente,
- $\text{lon}_1$  e  $\text{lon}_2$  são as longitudes de  $p_1$  e  $p_2$ , respectivamente.

Além disso, outra métrica utilizada é a taxa de resposta por API. Para alguns endereços da base de dados, as GeoAPIs podem retornar um erro, não fornecendo uma geocodificação válida. Nesse caso, nada é inserido no banco de dados. A taxa de resposta é calculada como a quantidade de endereços geocodificados dividida pela quantidade de endereços originais na base de dados. Esse valor é convertido em uma porcentagem para facilitar a compreensão dos resultados, de acordo com a seguinte fórmula:

$$tx_{\text{resposta}}(\%) = \left( \frac{qtd_{\text{Geo}}}{qtd_{\text{Ouro}}} \right) \times 100\% \quad (2.3)$$

Onde:

- $tx_{\text{resposta}}$  é a taxa de resposta da API avaliada;
- $qtd_{\text{Ouro}}$  é a quantidade de endereços da base referência;
- $qtd_{\text{Geo}}$  é a quantidade de endereços resultantes da geocodificação.

Outra métrica obtida por meio do erro é a taxa de precisão. É definida como a porcentagem de endereços com um erro inferior a 150 metros em relação ao número total de endereços. Esse valor foi escolhido com base na afirmação do artigo (??), onde os autores colocaram que 150 metros é aproximadamente o tamanho de um quarteirão em Belo Horizonte. É representada pela seguinte fórmula:

$$tx_{\text{precisão}}(\%) = \left( \frac{qtd_{\text{certo}}}{qtd_{\text{Ouro}}} \right) \times 100\% \quad (2.4)$$

Onde:

- $tx_{\text{precisão}}$  é a taxa de precisão da API avaliada;
- $qtd_{\text{certo}}$  é a quantide de endereços em que o erro foi menor que 150 metros;
- $qtd_{\text{Ouro}}$  é a quantidade de endereços da base referência;

Para avaliar a discrepância entre geocodificações, dois métricas serão utilizadas: covariância e distância até o ponto médio. A covariância é o desvio padrão dividido pela média. Em nosso estudo, calculamos a covariância para latitude e longitude, considerando apenas os pontos que possuíam informações de todos os serviços de geocodificação. Em seguida, fazemos a média desses dois valores para representar a covariância do endereço. Na distância até o ponto médio, computamos um ponto médio a partir de todas as geocodificações fornecidas para um endereço e então calculamos a distância euclidiana de uma geocodificação até esse ponto médio.

A covariância é definida como:

$$\text{Covariância} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\text{lat}_i - \bar{\text{lat}})(\text{lon}_i - \bar{\text{lon}}) \quad (2.5)$$

Onde:

- $n$  é o número de APIs.
- $\text{lat}_i$  e  $\text{lon}_i$  são as latitudes e longitudes de cada API no mesmo endereço, respectivamente.
- $\bar{\text{lat}}$  e  $\bar{\text{lon}}$  são as médias das latitudes e longitudes.

A distância até o ponto médio é calculada como a distância euclidiana de uma geocodificação até o ponto médio e é definida como:

$$\text{Distância até o Ponto Médio para cada ponto} = \sqrt{(\text{lat}_i - \text{mid\_lat})^2 + (\text{lon}_i - \text{mid\_lon})^2} \quad (2.6)$$

Onde:

- $\text{lat}_i$  e  $\text{lon}_i$  são as latitudes e longitudes das geocodificações individuais,
- $\text{mid\_lat}$  e  $\text{mid\_lon}$  são a latitude e longitude do ponto médio calculado.

Para calcular o ponto médio entre os pontos do mesmo endereço de várias APIs, usamos a seguinte fórmula:

$$\text{Ponto Médio} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n \text{lat}_i}{n}, \frac{\sum_{i=1}^n \text{lon}_i}{n} \right) \quad (2.7)$$

Onde:

- $\bar{\text{lat}}_i$  e  $\bar{\text{lon}}_i$  representam a média de latitude e longitude para os mesmos endereços,
- $n$  representa o número de APIs.

Para calcular a relação entre a discrepância e erro utilizaremos uma media de correlação e a medida escolhida foi a correlação de Pearson. A correlação de Pearson é uma medida de correlação descrita pela fórmula (??):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

onde:

- $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson;
- $x_i$  e  $y_i$  são as variáveis avaliadas;
- $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias dos valores  $x$  e  $y$ , respectivamente.

Essa medida, independente dos valores das variáveis sempre retorna um valor entre -1 e 1, sendo 1 uma correlação forte positiva e -1 uma correlação forte negativa. Quanto mais próximo de 0, menos correlação as variáveis tem. A tabela ?? retirada do livro mostra para cada faixa de valor resultante da correlação de Pearson respectivos significados (??). É interessante portanto encontrar relações com coeficiente superior a 0.6.

Tabela 2.1 – Tabela de Correlação de Pearson

| $ r $     | A correlação é dita |
|-----------|---------------------|
| 0         | Nula                |
| 0 – 0.3   | Fraca               |
| 0.3 – 0.6 | Regular             |
| 0.6 – 0.9 | Forte               |
| 0.9 – 1   | Muito Forte         |
| 1         | Plena ou Perfeita   |

## 2.4 Experimentos para avaliação da formatação da entrada

Como mencionado anteriormente, algumas APIs disponibilizam recomendações de formatações de entrada em suas documentações. A Tabela ?? apresenta o formato recomendado para cada uma das APIs utilizadas, enquanto a Tabela ?? especifica os formatos citados.

Apesar disso, a equipe do TerraLAB tem seu próprio padrão de formatação utilizado. A Tabela ?? apresenta os formatos de entrada utilizados por cada uma das APIs no laboratório.

Para avaliar qual seria a melhor formatação dos dados de entrada, contruímos para cada API 5 experimentos onde são modificadas as ordens da palavra de entrada da API. A tabela ??

Tabela 2.2 – Formato Recomendado de Entrada para APIs de Geocodificação

| API                | Formato Recomendado   | Documentação |
|--------------------|---|--------------|
| Google Maps        | Recomenda utilizar o formato do serviço postal do país buscado                              | (??)         |
| Open Route Service | Sem recomendações específicas   | (??)         |
| Mapbox             | Recomenda utilizar o formato oficial dos EUA ou o formato do serviço postal do país buscado | (??)         |
| TomTom             | Sem recomendações específicas   | (??)         |

Tabela 2.3 – Descrição dos formatos

| Origem                   | Formato   |
|--------------------------|---|
| Serviço postal do Brasil | Tipo de Logradouro, Nome do Logradouro, Número do Lote, Complemento (se houver), Nome do Bairro, Nome da Localidade, Sigla da Unidade da Federação, CEP |
| EUA                      | Número do lote, Nome do Logradouro<br>Nome da Cidade, Nome do Estado, CEP   |

Tabela 2.4 – Formato de Entrada das APIs Utilizadas pelo TerraLAB

| API    | Formato  |
|--------|--|
| Mapbox | Estado, Cidade, Número Lote, Tipo Logradouro, Nome Logradouro    |
| TomTom | Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número do Lote, Cidade, Estado |
| Google | Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número do Lote, Cidade, Estado |
| ORS    | Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número do Lote, Cidade, Estado |

mostra qual é o formato para cada um dos experimentos. Os experimentos foram numerados, durante o trabalho iremos nos referir a eles de acordo com esse número.

Tabela 2.5 – Formato de cada experimento

| Experimento | Formato   |
|-------------|---|
| 1           | Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício, Cidade, Estado |
| 2           | Cidade, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício, Estado |
| 3           | Estado, Cidade, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício |
| 4           | Estado, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício, Cidade |
| 5           | Cidade, Estado, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício |

Devido a quantidade de experimentos, resolvemos fazer uma amostragem das duas bases de dados. Selecionamos 5 mil endereços de cada base, utilizando o método de hipercubo latino. E utilizando o mesmo processo de padronização e geocodificação explicado na seção ??, obtivemos a geocodificação de cada uma das APIs para cada endereço.

A base de Belo Horizonte continha as informações de bairro de cada endereço, diferente da base de São Paulo. Com isso, decidimos realizar uma análise adicional, que consistia em verificar se há algum ganho em adicionar o bairro na entrada. Portanto, para a base de Belo



Horizonte forma adicionados 5 experimentos adicionais. A tabela ?? mostra os formatos citados.

Tabela 2.6 – Formato dos experimentos adicionais

| Experimento | Formato   |
|-------------|---|
| 1b          | Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício, Bairro, Cidade, Estado |
| 2b          | Cidade, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício, Bairro, Estado |
| 3b          | Estado, Cidade, Bairro, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício |
| 4b          | Estado, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício, Bairro, Cidade |
| 5b          | Cidade, Estado, Bairro, Tipo Logradouro, Nome Logradouro, Número Edifício |

Com as Geocoficações prontas, faremos o cálculo das metricas de erro para cada uma das APIs, como explicado na seção ??.

## 3 Resultados

Nós inicialmente analisamos erro e discrepância nos 12.502 endereços de São Paulo. Abaixo estão os totais de geocodificações bem-sucedidas para cada API:

- TomTom: 11.370 endereços.
- Google Maps: 9.389 endereços.
- Mapbox: 12.260 endereços.
- Open Route Service: 12.295 endereços.

Então, conduzimos experimentos com o conjunto de dados de Belo Horizonte. Em relação ao número de endereços retornados, Mapbox retornou 84.966, Google retornou 84.941, TomTom retornou 84.981 e ORS retornou 84.864. Vale ressaltar que a amostra original continha 85.000 endereços.

Falhas podem ocorrer em qualquer estágio de geocodificação, derivadas de informações incompletas ou ambíguas fornecidas para geocodificação ou dos algoritmos empregados (algoritmos de seleção e classificação de candidatos). Quando falhas ocorrem, a API retorna apenas uma mensagem de erro. Nas próximas seções, os resultados de erro e discrepância são cuidadosamente analisados.

### 3.1 Erro, Taxa de Resposta e Taxa de Precisão

A próxima etapa foi o cálculo do erro para cada um dos pontos, sendo este expresso em quilômetros (Km).

Com o erro de cada um dos pontos, foram calculadas as métricas mencionadas anteriormente. Os resultados bem como suas interpretações são apresentados abaixo.

A Tabela ?? apresenta os resultados calculados para as respostas recebidas da geocodificação da base de São Paulo. Em relação à taxa de resposta, ou seja, o número de endereços que foram geocodificados com sucesso, a Mapbox obteve o melhor resultado, seguida pela ORS, ambas com taxas de resposta superiores a 98%. Google e TomTom tiveram taxas de resposta de 75% e 90%, respectivamente. Esses resultados são considerados satisfatórios e garantem uma boa quantidade de dados para as avaliações subsequentes.

Outra métrica importante é a taxa de precisão. Endereços com erros menores que 150 metros (0,15 km) foram considerados precisos. A taxa de precisão foi baixa para a maioria das APIs. A API TomTom teve a maior taxa de precisão, com 60% de acurácia.

Tabela 3.1 – Métricas de Erro para São Paulo

| API         | Média (km)          | Mediana (km)         | Desvio Padrão        |
|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Mapbox      | 15,3504             | 0,1675               | 83,9394              |
| Google Maps | 2,0965              | 0,0555               | 22,0156              |
| TomTom      | 10,2074             | 0,0638               | 88,0844              |
| ORS         | 33,9474             | 1,2984               | 103,0119             |
| API         | Média Ajustada (km) | Taxa de Resposta (%) | Taxa de Precisão (%) |
| Mapbox      | 3,5009              | 98,0565              | 46,5968              |
| Google Maps | 0,2327              | 75,0940              | 52,2675              |
| TomTom      | 0,4768              | 90,9382              | 60,3055              |
| ORS         | 16,4096             | 98,3364              | 28,6091              |

O erro médio foi bastante elevado, variando de 2 km a 33 km. O desvio padrão também foi alto, indicando uma variação considerável no erro. No entanto, a mediana foi bastante baixa, alcançando resultados desejáveis em nossa pesquisa. A média aparada produziu resultados muito bons, indicando a presença de um número significativo de valores atípicos.

Da mesma forma, calculamos o erro para cada ponto geocodificado no banco de dados de Belo Horizonte e computamos as métricas mencionadas anteriormente. A Tabela ?? exibe esses resultados.

Tabela 3.2 – Métricas de Erro para Belo Horizonte

| API         | Média (km)          | Mediana (km)         | Desvio Padrão        |
|-------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Mapbox      | 3,2857              | 0,0001               | 24,7587              |
| Google Maps | 2,4924              | 0,0098               | 5,8465               |
| TomTom      | 11,2913             | 0,1147               | 56,6424              |
| ORS         | 6,4828              | 7,5702               | 5,5364               |
| API         | Média Ajustada (km) | Taxa de Resposta (%) | Taxa de Precisão (%) |
| Mapbox      | 1,0701              | 99,9600              | 76,8235              |
| Google Maps | 1,6146              | 99,9306              | 73,6118              |
| TomTom      | 0,4768              | 99,9776              | 51,7988              |
| ORS         | 6,2940              | 99,8400              | 25,1835              |

Em relação à taxa de resposta, todas as APIs tiveram excelentes resultados, com mais de 99% de resposta para o banco de dados fornecido. Este é um resultado significativo para a pesquisa, pois as conclusões são mais robustas devido à quantidade de dados analisados.

A taxa de precisão também mostrou resultados satisfatórios, com os melhores resultados vindos da Mapbox e Google Maps, com taxas superiores a 73%. Este resultado é bastante satisfatório e está alinhado com os resultados obtidos em (?). No entanto, TomTom e ORS apresentaram baixas taxas de precisão, sendo que ORS teve uma taxa extremamente baixa de 25%. É importante observar que um resultado foi considerado preciso se o erro fosse menor ou igual a 150 metros.

O erro médio apresentou valores muito mais suaves do que os obtidos com o conjunto de dados de São Paulo, embora ainda estivessem elevados, variando de aproximadamente 2 a 11 quilômetros. Os valores medianos foram bastante baixos para a maioria das APIs, e o desvio padrão foi bastante alto. Esse resultado indica que também existem valores de erro muito altos nessa geocodificação. A API ORS apresentou resultados diferentes das outras APIs, com valores

altos de média, mediana e desvio padrão, o que provavelmente explica a baixa taxa de precisão.

## 3.2 Distribuição de Erro

Com base nos resultados acima, realizamos uma análise da distribuição de erro para cada uma das GeoAPIs e bases. Para isso, utilizamos histogramas de erro individuais para cada API e os combinamos. As Figuras ?? e ?? mostram os histogramas para cada API e cada base utilizada. No entanto, devido à presença de alguns erros extremos, os histogramas gerais (que continham todo o conjunto de dados) foram são muito representativos, pois a maior parte do erro estava concentrada entre 0 km e 50 km, enquanto existiam erros bem maiores. Esse intervalo é considerado um erro muito grande, tornando desafiador tirar conclusões sólidas. Outra limitação dessa análise, é o fato de que cada API teve um máximo de erro diferente, prejudicando então a comparação entre APIs.

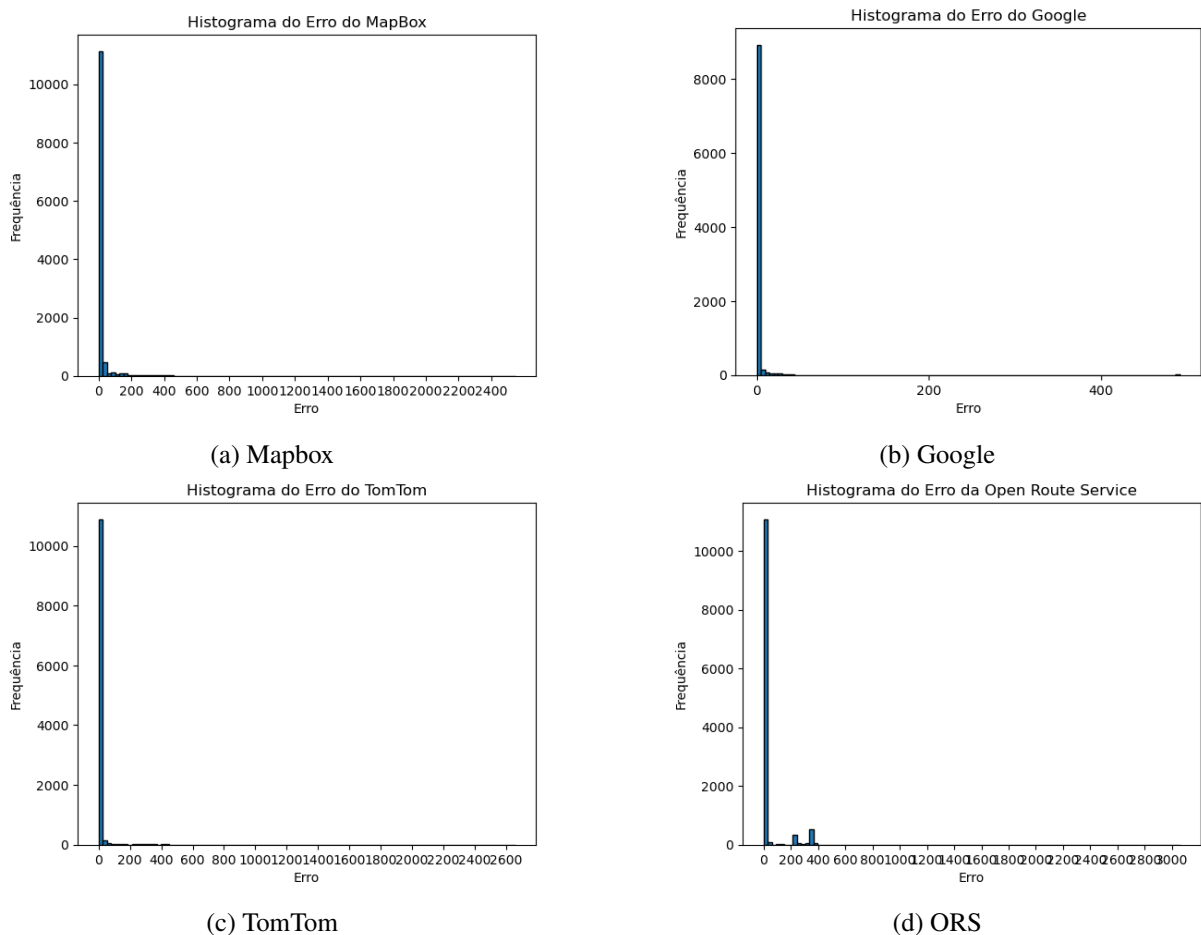


Figura 3.1 – Histogramas do erro das 4 APIs para o todos os dados de São Paulo

Portanto, decidimos cortar os dados, limitando o erro a 300 metros. Repetimos o processo, gerando um único histograma que representa a distribuição de erro para todas as APIs juntas, para cada uma das bases.

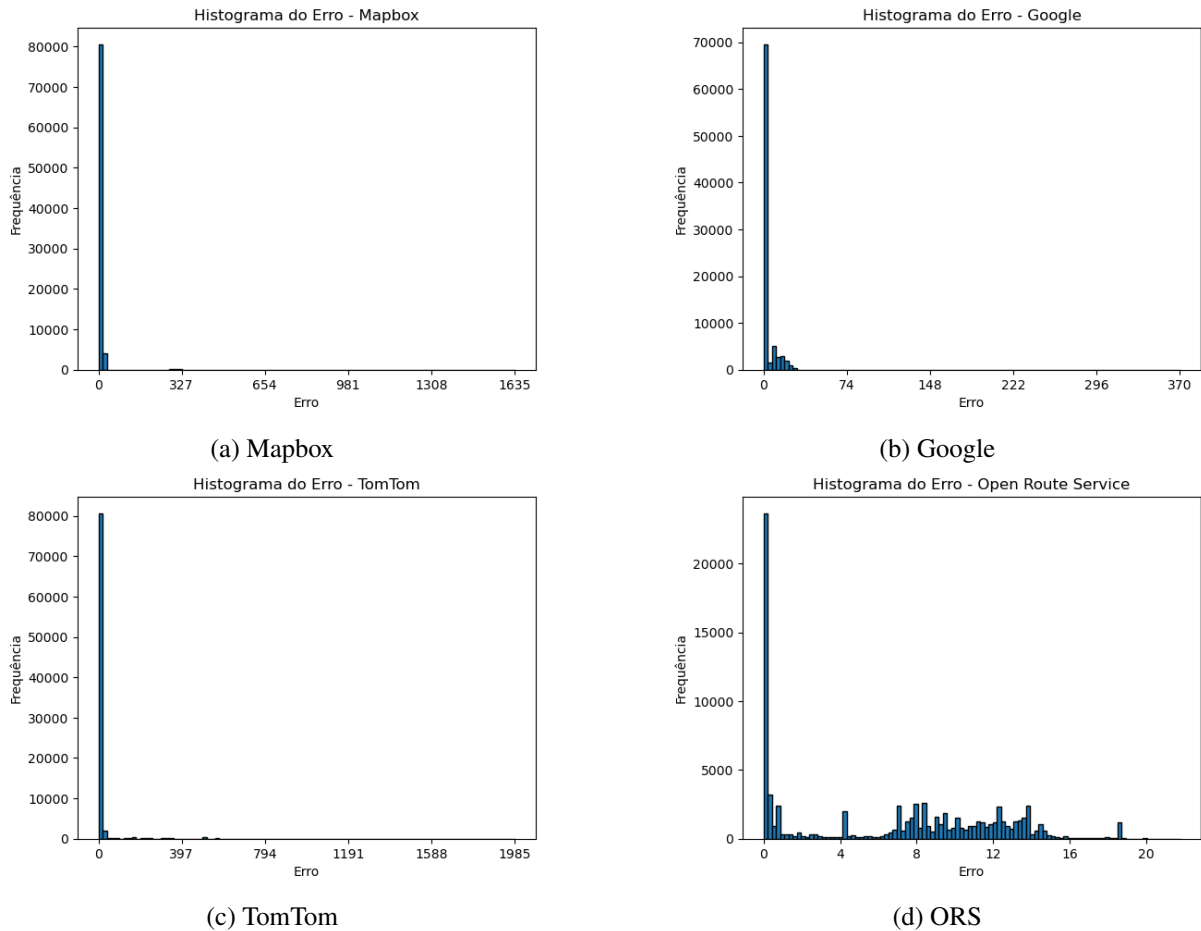


Figura 3.2 – Histogramas do erro das 4 APIs para o todos os dados de Belo Horizonte

A figura ?? mostra o histograma resultante para os dados de São Paulo e a figura ?? mostra o histograma para os dados de Belo Horizonte.

Em relação aos dados de São Paulo as APIs tiveram resultados similares nessa faixa de valores do erro. Porém as APIs Google Maps e TomTom se destacaram ao conter uma curva mais estreita, ou seja, os valores para essa API estão mais concentrados em erro menor que 50 metros.

Para os dados de Belo Horizonte, a API Mapbox teve melhores resultado com uma curva bem estreita. Seguida pela Google Maps, que apesar de ter uma curva bem estreita também, apresenta uma diferença significativa para a Mapbox. As outras APIs apresentam curvas mais largas e algo notável é a curva da mapbox que está muito distribuída, tendo um aspecto parecido com uma reta em valores de erro superiores a 50 metros. Isso mostra que a ORS apresenta erro similar na maior parte da faixa, o que indica que ela não apresenta bons resultados nem quando há um corte nos dados.

Em geral, embora os histogramas sejam uma ferramenta poderosa para analisar a distribuição de erros, neste caso, eles não se mostraram tão eficazes devido às limitações decorrentes da presença de valores excessivamente altos.

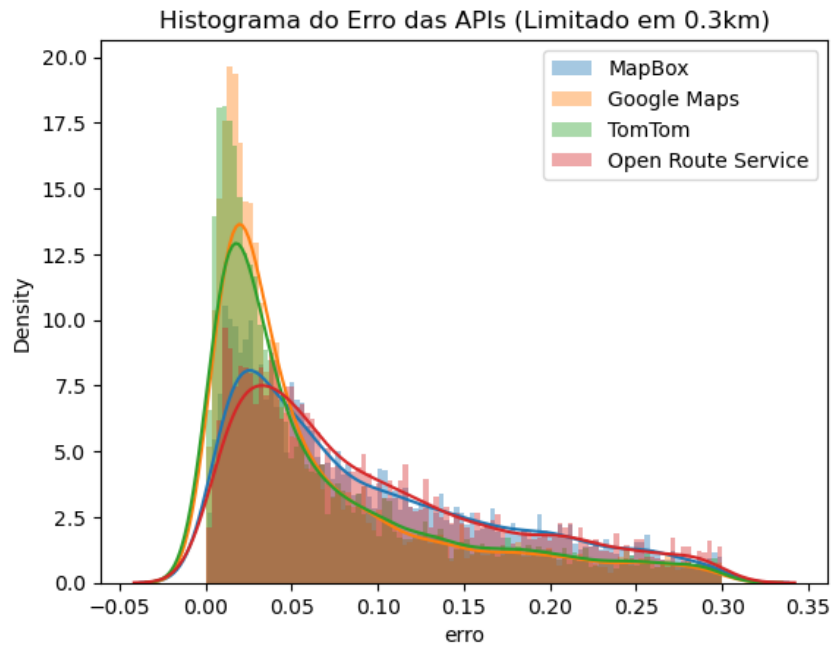


Figura 3.3 – Histograma comparativo de erro das APIs limitado em 300 metros para os dados de São Paulo

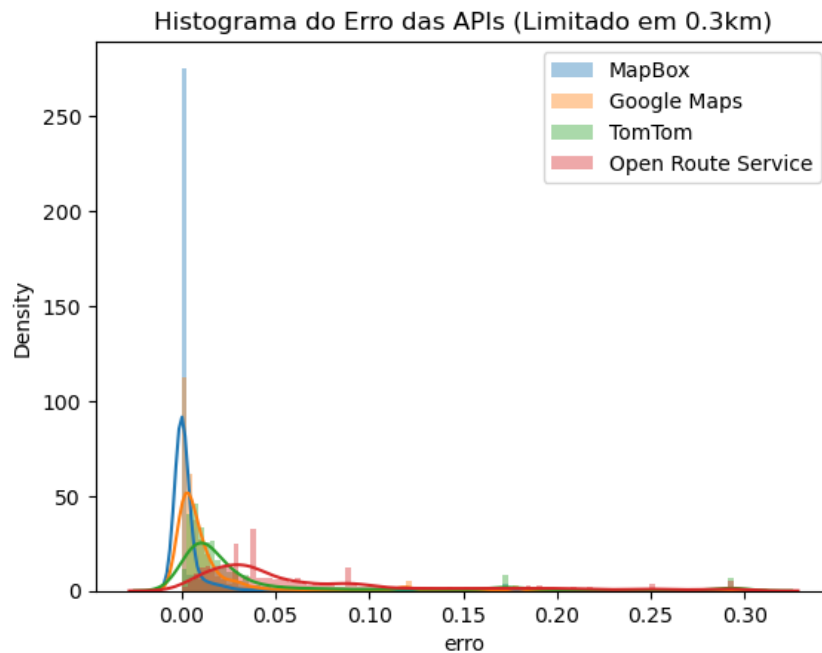


Figura 3.4 – Histograma comparativo de erro das APIs limitado em 300 metros para os dados de Belo Horizonte

### 3.3 Distribuição Espacial do Erro

Além disso, realizamos uma análise adicional com o objetivo de verificar o comportamento do erro no espaço. Utilizamos gráficos de classificação hexagonal, empregando a função `hexbin` da biblioteca `matplotlib`, que desempenha um papel integral na construção do gráfico. Essa função automatiza o processo, dividindo o espaço em hexágonos de tamanhos uniformes e

distribuídos de maneira equitativa. Em seguida, a função hexbin seleciona os pontos de dados contidos em cada hexágono e aplica uma função específica, que é definida como parâmetro da função hexbin. Essa função determina os cálculos realizados com base nos pontos, gerando um valor único. Esse valor é então atribuído ao hexágono correspondente no gráfico, e as cores são mapeadas de acordo com uma escala predefinida.

Para gerar a representação do gráfico introduzimos o conceito de "falha". Quando o erro em um ponto específico é igual ou inferior a 150 metros, atribuímos o valor 0 à falha; caso contrário, designamos o valor 1. A função escolhida para calcular o valor de cada hexágono é a média da falha dos pontos, resultando em uma representação em porcentagem decimal da falha naquela região. Assim, quanto mais escura a cor do gráfico, maior é a falha observada. Para melhor visualização, também adicionamos o limite da cidade como contorno do gráfico. As figuras ?? e ?? apresentam os gráficos de falhas de cada uma das APIs para os dados de Belo Horizonte e São Paulo respectivamente.

Para os dados de Belo Horizonte é possível notar que a API com gráfico mais claro, ou seja, menos falhas, é a Mapbox, seguido pela Google. Resultado que vai de encontro com os obtidos nas tabela de métricas ?. Outra informação relevante que é possível observar é que em todas as APIs existe uma concentração maior de falhas próximo aos limites da cidade, como esperado. Outro ponto importante é o gráfico da ORS. A maior parte do gráfico para essa API apresenta cores bem escuras, indicando muitas falhas em toda região da cidade para essa API. Mais especificamente nas regiões superior e inferior do gráfico o valor chega próximo do limite máximo, o que indica que naquela região houve aproximadamente 100% de falha. Esse resultado, apesar de ruim, está de acordo com os análises sobre a ORS feitas anteriormente.

Nos gráficos de São Paulo também foi adicionado o contorno da cidade. No entanto, os dados são referentes a região metropolitana, incluindo outras cidades da região. Para essa base é possível notar que as APIs Google Maps e TomTom tem melhores resultados, o que confirma os resultados obtidos na tabela ?. Outro resultado notável é que nos outros municípios o resultado piora em todas as APIs, atingindo valores de falha muito próximo de 1. Por fim, as APIs que foram piores foram Mapbox e ORS. A ORS foi claramente pior, repetindo os resultado de Belo Horizontes observados nos gráficos da figura ?? e nas tabelas ? e ?.

### 3.4 Relações entre erro e discrepância

Por fim, foi realizada a análise comparativa entre erro e discrepância. As medidas escolhidas para essa análise foram a covariância e a distância para o ponto médio como descrito no capítulo ?. Foram considerados apenas os endereços em que se tinha informação de todas as APIs. Depois de calcular as métricas para cada um dos pontos foi calculada a correlação de Pearson para cada API e cada base de dados.

Realizamos então uma análise com um subconjunto de 8574 endereços do banco de

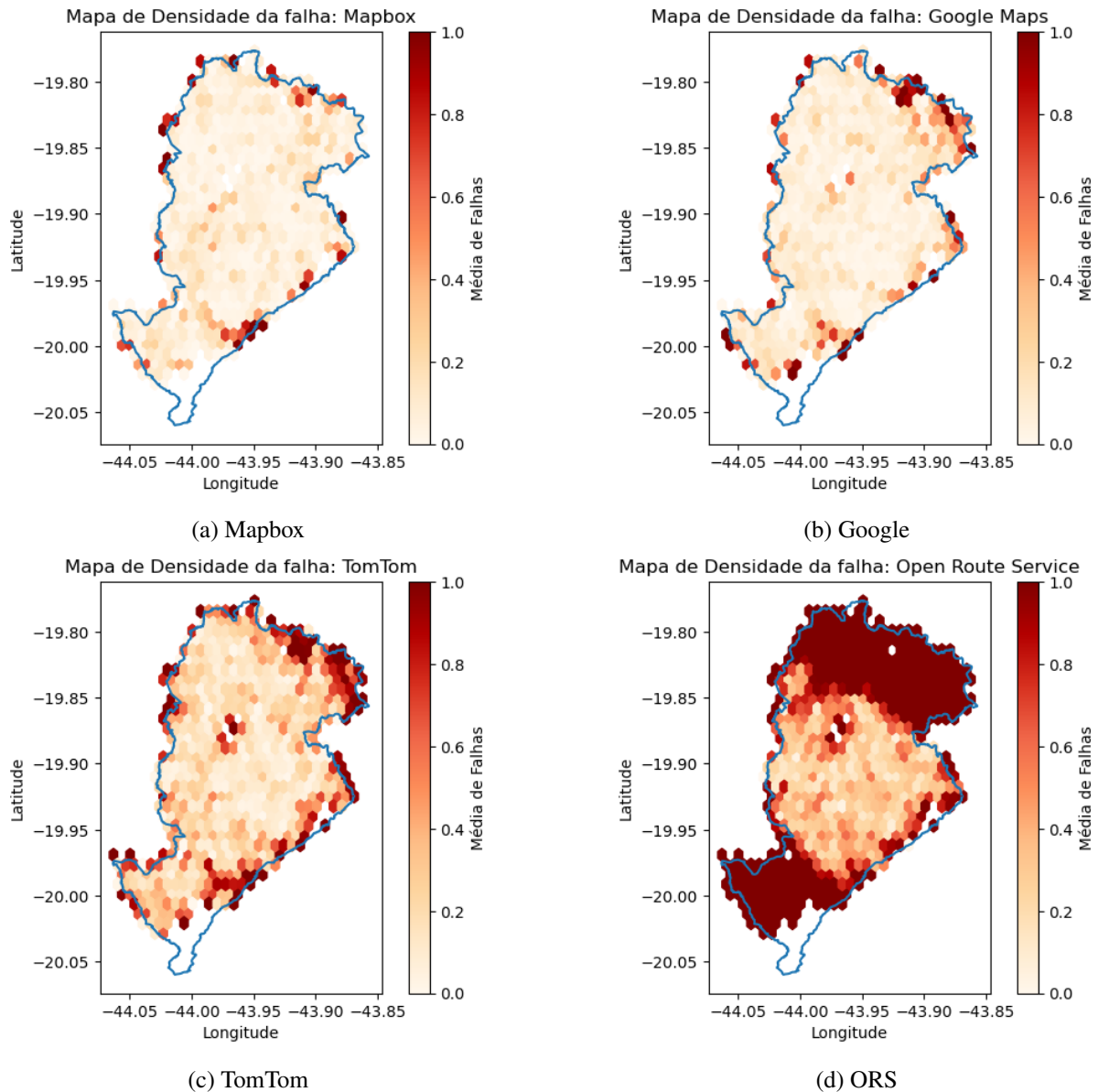


Figura 3.5 – Gráficos de falhas de cada API para os dados de Belo Horizonte

dados de São Paulo. A Tabela ?? exibe esses resultados. A partir da tabela, pode-se observar que para todas as APIs, as correlações com o erro são positivas. Isso indica que à medida que o erro aumenta, as medidas de discrepância também tendem a aumentar. de acordo com a tabela ?? a medida de covariância para esses dados apresentou uma correlação regular a forte para a maioria das APIs, variando de 0,53 a 0,67, exceto para o Google Maps, que teve uma correlação fraca. Por outro lado, a medida de distância até o ponto médio obteve uma correlação forte a muito forte para a maioria das APIs, com resultados na faixa de 0,88 a 0,94. Em contrapartida, a API do Google mostrou uma correlação regular muito próxima a fraca, mas houve uma melhoria em comparação com a correlação de covariância.

Para o conjunto de dados de Belo Horizonte, conduzimos essa análise com 84.752 endereços, o que representa aproximadamente 99,71% da amostra utilizada. A Tabela ?? mostra esses resultados. Em geral, a tabela apresenta valores de correlação mais próximos de 0 do que os



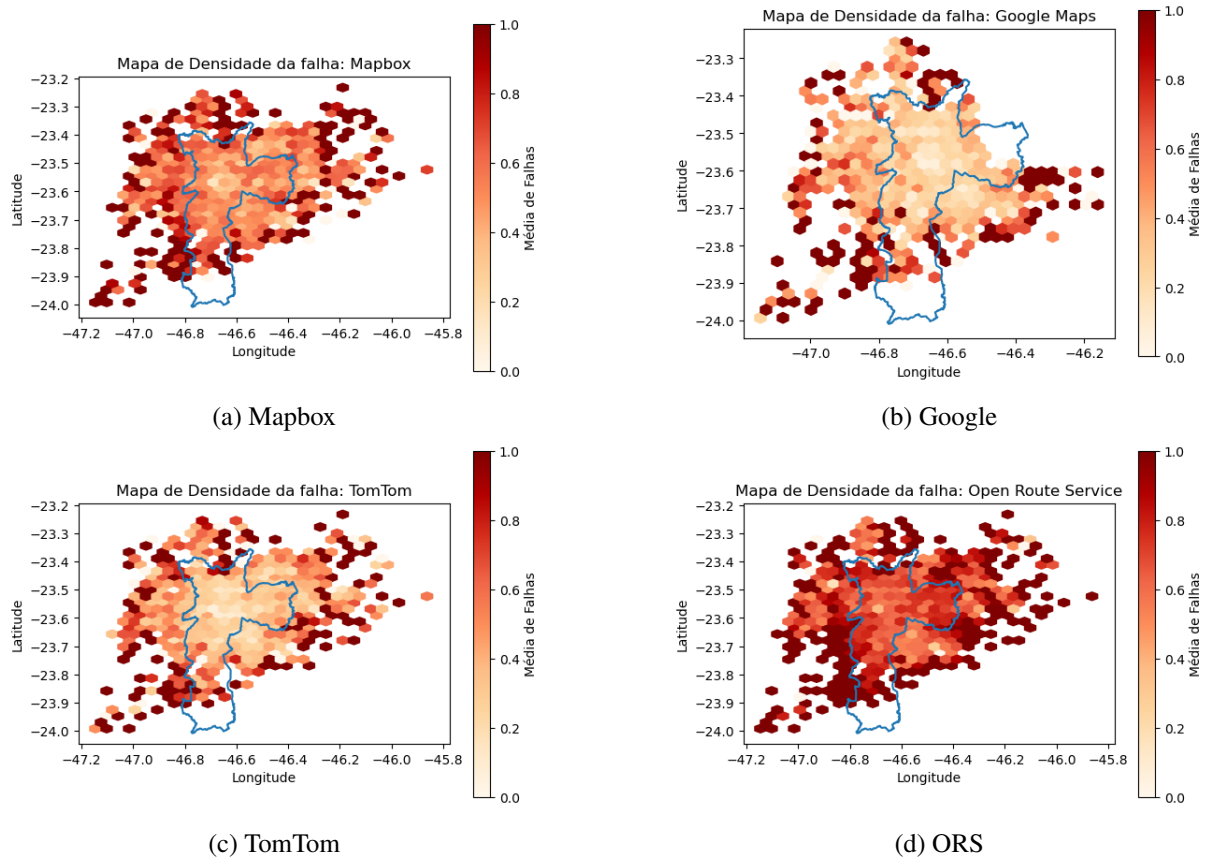


Figura 3.6 – Gráficos de falhas de cada API para os dados de Belo São Paulo

Tabela 3.3 – Correlação de Pearson entre Erro e Medidas de Discrepância para São Paulo

| API    | Covariância | Distância até o Ponto Médio |
|--------|-------------|-----------------------------|
| Mapbox | 0,5387      | 0,8972                      |
| TomTom | 0,5398      | 0,8858                      |
| Google | 0,2177      | 0,3615                      |
| ORS    | 0,6649      | 0,9378                      |

encontrados na análise dos dados de São Paulo, indicando que a correlação é mais fraca para este conjunto de dados como um todo. Para o Google e o ORS, a covariância mostrou uma correlação fraca, possivelmente indicando nenhuma relação entre erro e covariância para essas APIs. O Mapbox teve uma correlação regular com a covariância, enquanto o TomTom teve uma correlação forte.

Para a distância até o ponto médio, tivemos correlações fortes a muito fortes para o Mapbox e o TomTom. O Google e o ORS também apresentaram correlações fracas para a distância do ponto médio. Apesar dos resultados de correlação inferiores em comparação com a análise do conjunto de dados de São Paulo, os resultados de Belo Horizonte parecem confirmar que distância até o ponto médio é uma medida melhor em comparação com a covariância para substituir o erro em situações onde o mesmo não pode ser obtido.

Tabela 3.4 – Correlação de Pearson entre Erro e Medidas de Discrepância para Belo Horizonte

| API    | Covariância | Distância até o Ponto Médio |
|--------|-------------|-----------------------------|
| Mapbox | 0,4669      | 0,7764                      |
| TomTom | 0,7269      | 0,9873                      |
| Google | 0,0463      | 0,0754                      |
| ORS    | 0,1552      | 0,2775                      |

### 3.5 Experimentos de Formatação

Após realizar análises de erro e discrepância nas bases de São Paulo e Belo Horizonte, procedemos com uma amostragem de 5.000 endereços para ambas as bases. O propósito dessa amostragem foi conduzir uma série de experimentos para determinar a melhor formatação de entrada para cada API.

Após a geocodificação dos experimentos, calculamos o erro para cada endereço. Para cada API, computamos a média, mediana, desvio padrão, média aparada em 5%, taxa de resposta e taxa de acerto, como realizado anteriormente. Os resultados completos podem ser encontrados nas tabelas ??, ??, ??, ??, ??, ??, e ?? no anexo ?? do texto.

Para uma compreensão mais aprofundada dos resultados e uma análise comparativa, elaboramos duas tabelas para cada base. As tabelas representam a taxa de resposta e a taxa de acerto de cada experimento por API.

As tabelas ?? e ?? mostram as taxas de resposta para as bases de Belo Horizonte e São Paulo, respectivamente. Observamos que todos os experimentos apresentaram excelentes resultados em termos de taxa de resposta, a maioria acima de 95% com exceção ao Mapbox com taxas acima de 84%. Não foi identificada uma diferença significativa entre as taxas de resposta nos experimentos. No entanto, em relação às APIs, a ORS apresentou uma taxa de resposta ligeiramente inferior em comparação com as outras APIs para os dados de Belo Horizonte. Em relação aos dados de São Paulo, a mesma situação ocorre com a API TomTom. No entanto, os autores não consideram essa diferença significativa devido à sua pequena magnitude.

A tabela ?? apresenta a taxa de acerto dos dados de Belo Horizonte. Observa-se que as APIs que alcançaram os melhores resultados foram a Google e MapBox, com destaque para a MapBox, que obteve a melhor taxa de acerto em todos os experimentos. Por outro lado, a ORS teve um impacto negativo, sendo a API com a menor taxa de acerto em relação às outras APIs, com valores baixíssimos variando de 1,40% a 41%, resultados que replicam os obtidos nos experimentos anteriores. A API TomTom apresentou um resultado mediano, mantendo taxas acima de 50% em todos os experimentos.

Ao comparar os experimentos entre si, nota-se que a melhor taxa de acerto de cada API não foi totalmente consistente, variando para algumas APIs. Os experimentos com as maiores taxas de acerto para cada API foram:

Tabela 3.5 – Taxa de resposta de cada API por experimento de Belo Horizonte

| Experimento | MapBox | Google | TomTom | ORS    |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 1           | 100,00 | 99,92  | 100,00 | 99,92  |
| 1b          | 99,94  | 99,96  | 99,98  | 95,26  |
| 2           | 100,00 | 99,98  | 99,94  | 99,06  |
| 2b          | 99,94  | 99,84  | 99,98  | 95,30  |
| 3           | 100,00 | 99,92  | 100,00 | 99,04  |
| 3b          | 99,68  | 100,00 | 99,88  | 99,06  |
| 4           | 100,00 | 99,90  | 99,98  | 100,00 |
| 4b          | 99,92  | 99,92  | 99,98  | 95,12  |
| 5           | 99,92  | 99,92  | 99,94  | 99,58  |
| 5b          | 99,76  | 99,88  | 99,92  | 99,98  |

Tabela 3.6 – Taxa de resposta de cada API por experimento de São Paulo

| Experimento | MapBox | Google | ORS   | TomTom |
|-------------|--------|--------|-------|--------|
| 1           | 97,50  | 99,98  | 99,86 | 85,48  |
| 2           | 97,78  | 99,86  | 99,50 | 85,52  |
| 3           | 99,20  | 99,88  | 99,88 | 85,52  |
| 4           | 97,84  | 99,88  | 99,00 | 85,48  |
| 5           | 98,00  | 99,90  | 99,96 | 84,14  |

- MapBox: Experimento 1;
- Google: Experimento 1b;
- TomTom: Experimento 1b;
- ORS: Experimento 3.

Apesar disso, percebe-se que, para a maioria das APIs, os melhores resultados estão associados a formatos que seguem o padrão do código postal brasileiro **??**, diferenciando-se apenas pela inclusão ou não do bairro no formato de entrada. Em relação à inclusão do bairro nos experimentos, ocorreu um fenômeno peculiar. Para as APIs MapBox e ORS, a adição do bairro diminuiu a taxa de acerto, ou seja, piorou os resultados. O mesmo não ocorreu com a API Google, que, na maioria dos experimentos, apresentou uma melhoria considerável ao adicionar o bairro. Quanto à API TomTom, houve uma melhoria ao adicionar o bairro a partir do experimento 1, resultando na melhor taxa de acerto; entretanto, para todos os outros experimentos, ocorreu o oposto.

A tabela **??** apresenta a taxa de acerto para os experimentos em São Paulo. Como mencionado anteriormente, a base de São Paulo não continha informações sobre bairros, resultando na análise apenas dos experimentos de formatação sem bairro.

Tabela 3.7 – Taxa de acerto de cada API por experimento de Belo Horizonte

| Experimento | MapBox | Google | TomTom | ORS   |
|-------------|--------|--------|--------|-------|
| 1           | 85,06  | 72,72  | 52,80  | 26,46 |
| 1b          | 80,88  | 80,64  | 56,34  | 15,62 |
| 2           | 82,46  | 73,30  | 55,66  | 22,28 |
| 2b          | 79,82  | 78,02  | 53,76  | 5,46  |
| 3           | 84,00  | 73,38  | 55,82  | 40,06 |
| 3b          | 80,56  | 78,30  | 53,92  | 39,08 |
| 4           | 84,66  | 73,26  | 55,32  | 1,46  |
| 4b          | 79,86  | 77,78  | 53,76  | 6,72  |
| 5           | 83,80  | 73,32  | 55,78  | 1,48  |
| 5b          | 81,00  | 72,92  | 53,92  | 24,78 |

Com esses resultados, observamos novamente que as APIs com as maiores taxas de acerto foram MapBox e Google, como visto nos experimentos em Belo Horizonte. No entanto, nos experimentos em São Paulo, a Google teve um desempenho superior, sendo o destaque para essa base. A ORS, por outro lado, teve novamente um desempenho negativo, com taxas de acerto muito baixas, variando de 1% a 29%.

Em relação aos experimentos, o Experimento 1 obteve a melhor taxa de acerto para todas as APIs, reforçando a hipótese de que a melhor formatação de entrada para as requisições de API no território nacional segue o código postal brasileiro. Em geral, para a base de São Paulo, as APIs apresentaram resultados inferiores, porém medianos, o que também foi observado na análise das APIs com a base completa.

Tabela 3.8 – Taxa de acerto de cada API por experimento de São Paulo

| Experimento | MapBox | Google | ORS   | TomTom |
|-------------|--------|--------|-------|--------|
| 1           | 41,78  | 50,80  | 28,94 | 44,94  |
| 2           | 37,04  | 48,54  | 5,30  | 44,96  |
| 3           | 41,26  | 48,42  | 0,14  | 45,02  |
| 4           | 40,90  | 48,42  | 14,94 | 44,90  |
| 5           | 40,10  | 48,00  | 1,04  | 44,40  |

Após a construção das tabelas, decidimos criar BoxPlots para comparar os resultados dos experimentos e das APIs.

Para os dados de Belo Horizonte, começamos construindo inicialmente boxplots de experimento por erro, com cada API representada por um boxplot. A Figura ?? mostra esse boxplot. Embora seja possível observar a presença de valores de erro extremos em todas as APIs, chegando a 3000 km, a presença de outliers dificulta uma análise mais detalhada.

Consequentemente, geramos o boxplot sem outliers, representado na Figura ?. Nela,

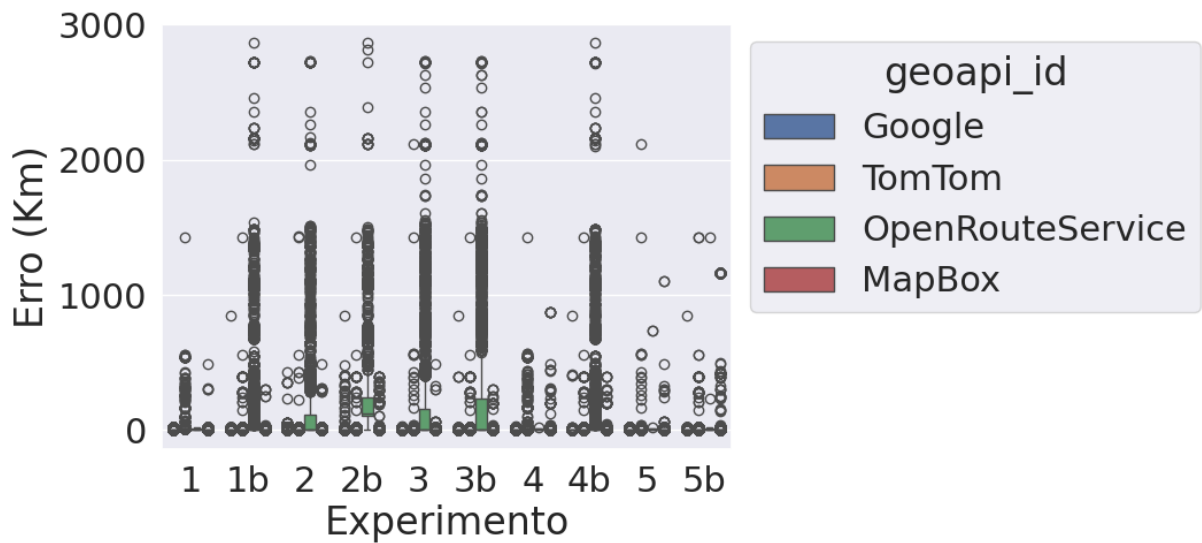


Figura 3.7 – Boxplot de Experimentos por Erro, com todas as APIs avaliadas

conseguimos observar claramente o desempenho da ORS, que obteve os piores resultados. Os erros da ORS, sem outliers, ultrapassam 400 km, apesar do boxplot estar contido na faixa de 200 km. De qualquer forma, a presença da ORS prejudica a comparação com as outras APIs, que era o objetivo inicial na criação desses boxplots.

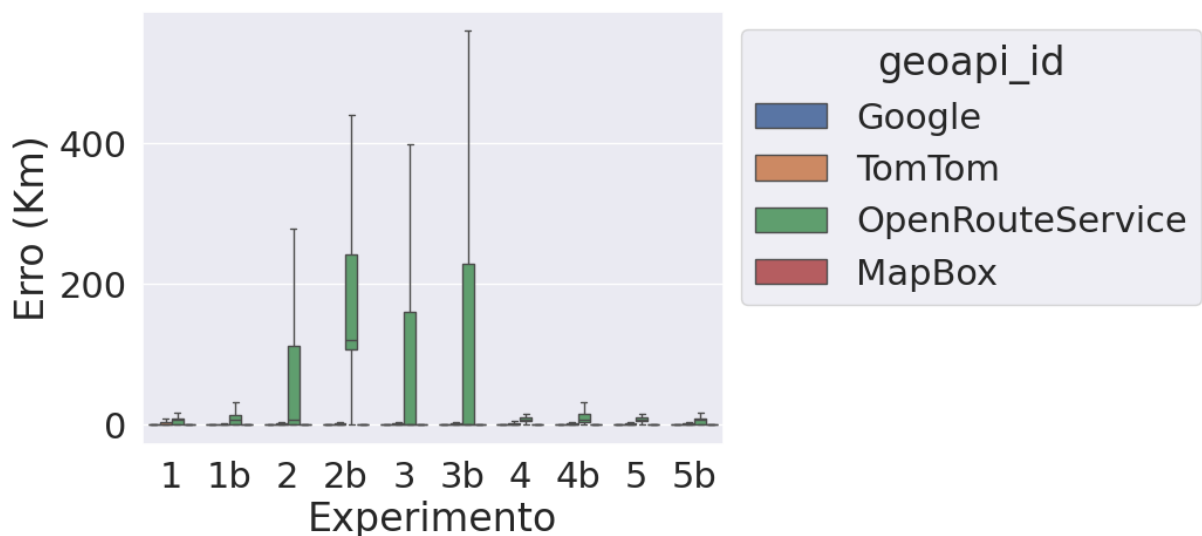


Figura 3.8 – Boxplot de Experimentos por Erro, com todas as APIs avaliadas e sem Outliers

Decidimos então criar um boxplot que não contivesse dados da ORS, como mostrado na Figura ???. Nesse gráfico, podemos observar que o erro é limitado a 8 km, um resultado consideravelmente melhor do que os obtidos anteriormente. Além disso, notamos que a API TomTom tem uma barra maior, indicando uma faixa de erro maior, conforme esperado de acordo com a tabela ??. Observamos também que as APIs Google e MapBox têm barras de tamanho similar, sendo a MapBox ligeiramente menor. Um ponto interessante é que, ao comparar os experimentos, o destaque é o Experimento 1b, com uma barra menor em todas as APIs. Este

experimento segue o código postal brasileiro, mas com a adição de bairro, indicando novamente que essa formatação pode gerar bons resultados para geocodificação.

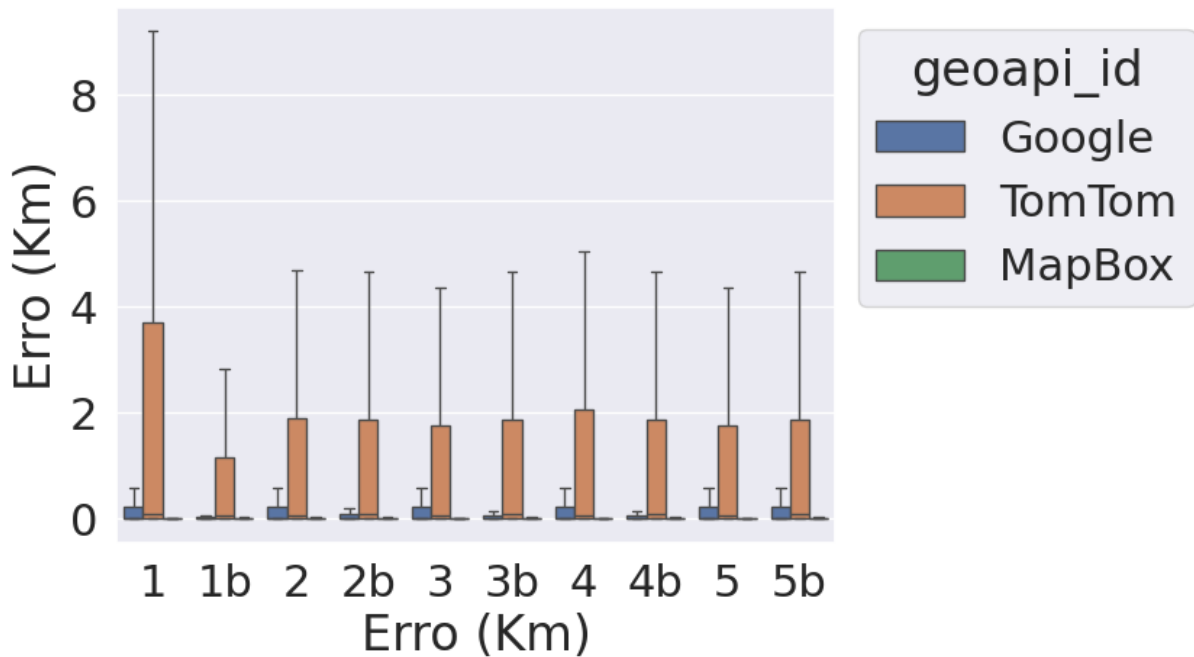


Figura 3.9 – Boxplot de Experimentos por Erro, com todas as APIs avaliadas exceto ORS e sem Outliers

Para a base de São Paulo, foram construídos boxplots de forma semelhante. A Figura ?? mostra o boxplot de experimento por erro com todas as APIs, sem remover os outliers. Assim como nos dados de Belo Horizonte, esse boxplot fornece pouca informação útil. É possível observar que, mais uma vez, o erro atinge a faixa de 3.000 km e que a ORS tem uma faixa de erro maior. No entanto, não é possível tirar muitas conclusões devido à presença de outliers.

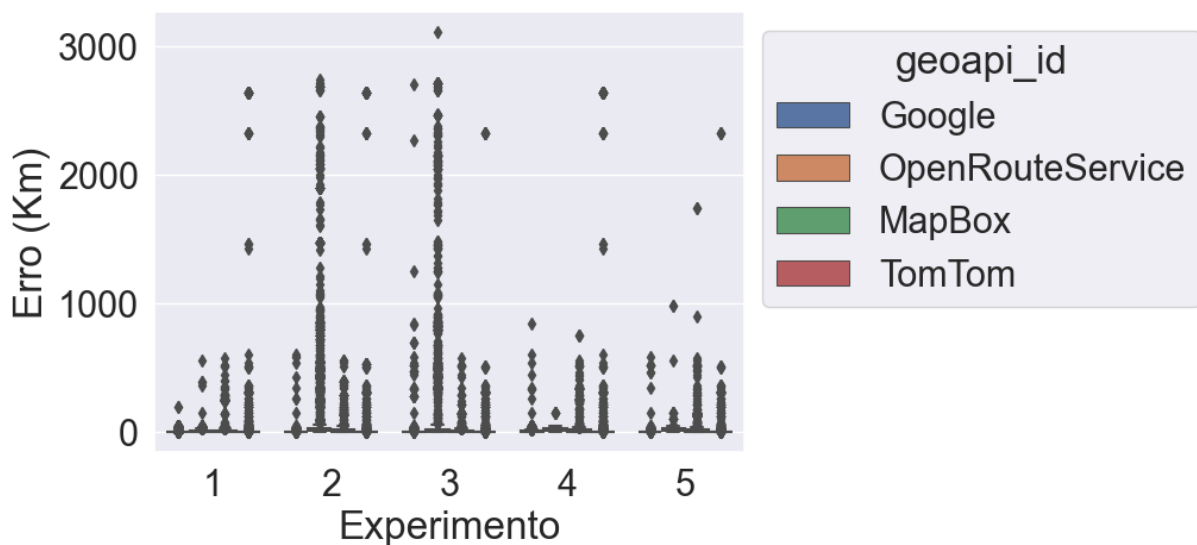


Figura 3.10 – Boxplot de Experimentos por Erro, com todas as APIs avaliadas para a amostra de São Paulo

Posteriormente, geramos boxplots sem outliers. A Figura ?? mostra esse boxplot. Observamos que a ORS teve o pior resultado, mas, ao contrário do boxplot ??, ainda é possível distinguir os boxplots das outras APIs. Ou seja, o desempenho da ORS não foi tão discrepante como o de Belo Horizonte. Outro ponto importante é que neste boxplot é possível perceber uma grande diferença entre a Google e a Mapbox, com a Google obtendo resultados consideravelmente melhores. Em relação aos experimentos, o Experimento 1 foi o que obteve os melhores resultados. Novamente, o Experimento 1 segue o padrão do código postal do Brasil, o que parece confirmar a hipótese de que essa é a melhor formatação de entrada.

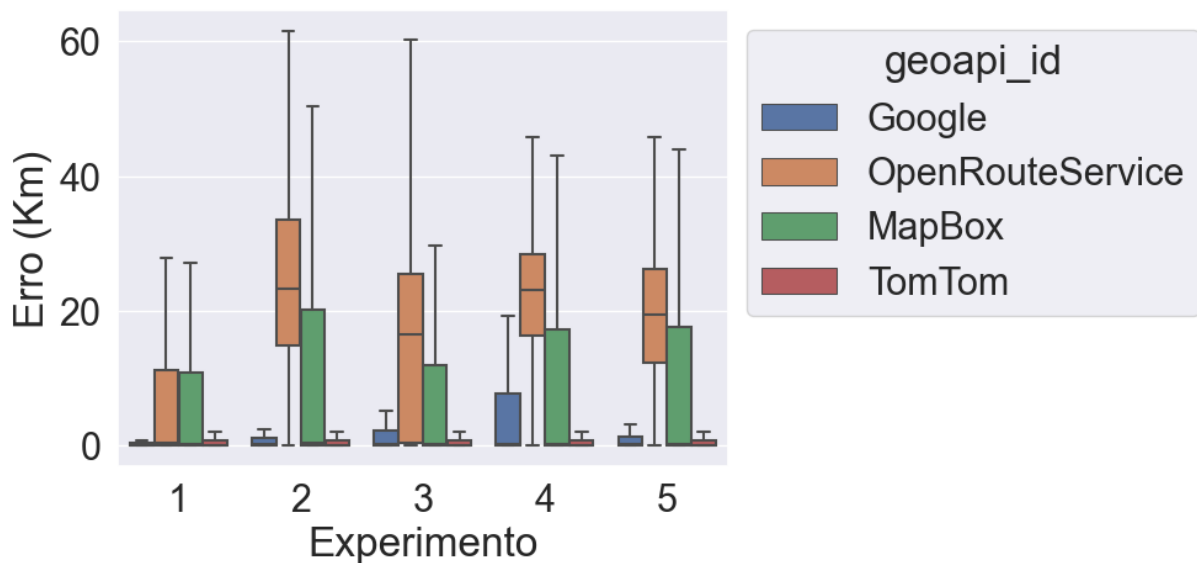


Figura 3.11 – Boxplot de Experimentos por Erro, com todas as APIs avaliadas e sem Outliers para a amostra de São Paulo

Os boxplots apresentados anteriormente foram cruciais para avaliar as APIs comparativamente. No entanto, faltava avaliar o comportamento dos experimentos dentro de cada API. Para isso, foram criados boxplots para cada API, onde o boxplot representa o experimento. As Figuras ?? e ?? mostram os boxplots de Belo Horizonte e São Paulo, respectivamente. Assim como nos boxplots anteriores, a presença de outliers prejudica a visualização, mas ainda é possível observar a faixa de erro em cada API. Abaixo, são apresentados os valores máximos de erro:

- MapBox - Belo Horizonte: Acima de 1000 km;
- Google - Belo Horizonte: Acima de 800 km;
- TomTom - Belo Horizonte: Acima de 2000 km;
- ORS - Belo Horizonte: Acima de 1000 km;
- MapBox - São Paulo: Acima de 1500 km;
- Google - São Paulo: Acima de 2500 km;

- ORS - São Paulo: Acima de 3000 km;

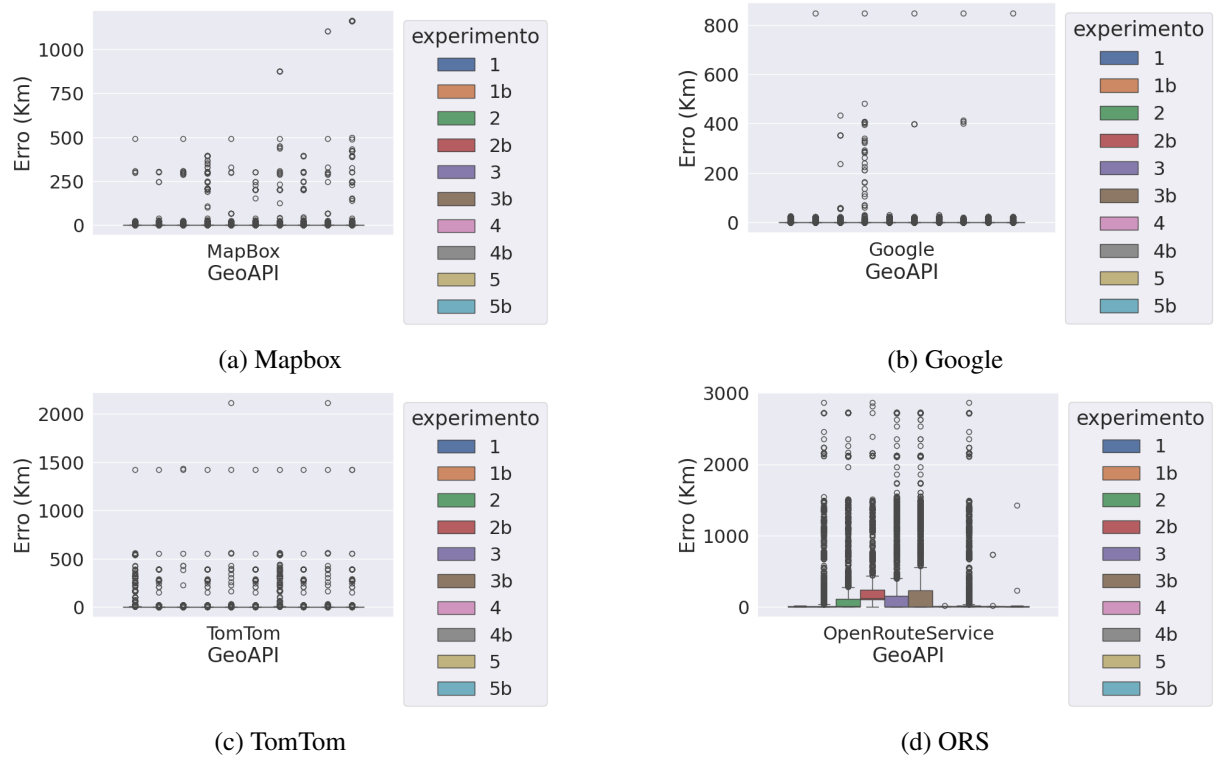


Figura 3.12 – Boxplots de Erro por API para cada uma das APIs avalidas

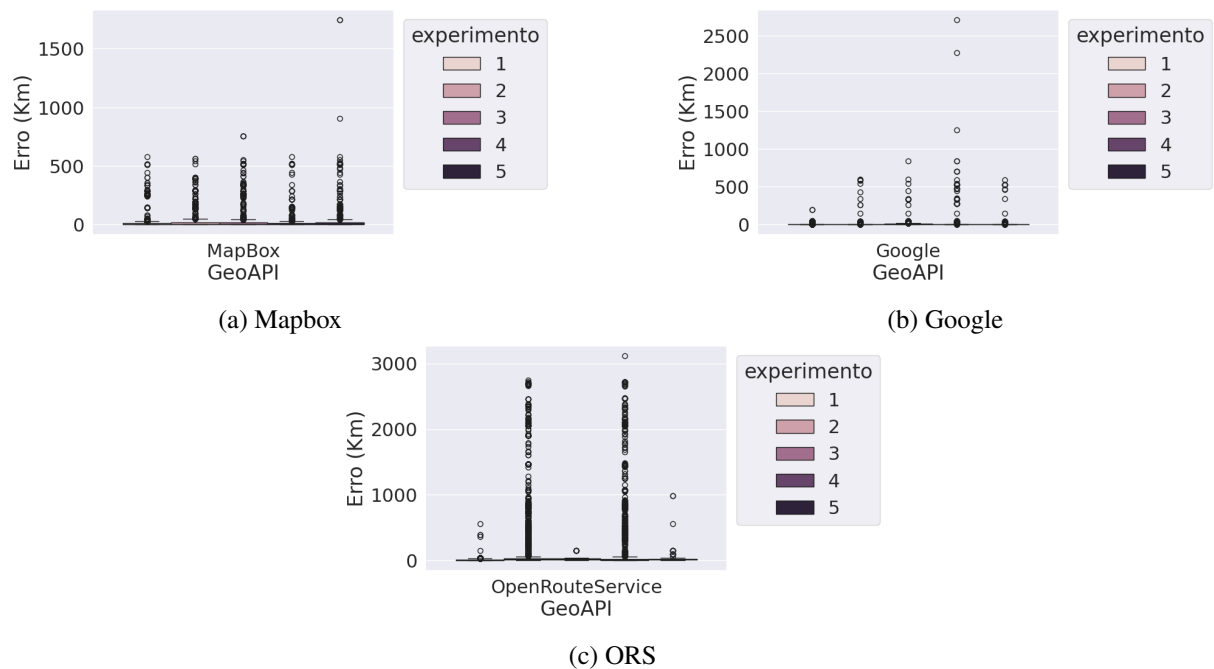


Figura 3.13 – Boxplots de Erro por API para cada uma das APIs avalidas para a amostra de São Paulo

Para aprimorar a visualização, decidimos remover os outliers de todos os boxplots.

As Figuras ?? e ?? apresentam os boxplots do erro da Mapbox para os dados de Belo Horizonte e São Paulo, respectivamente. Em ambos os boxplots, o Experimento 1 obteve os



melhores resultados para a API MapBox. No entanto, é interessante observar que o Experimento 4 teve um desempenho muito semelhante ao Experimento 1 para ambas as bases. Analisando o boxplot de Belo Horizonte, é possível notar que a adição do bairro resultou em piora nos resultados para todos os experimentos, evidenciando os piores resultados em geral, conforme observado na tabela ???. Quanto aos dados de São Paulo, os experimentos que se destacaram negativamente foram o 2, 3 e 5.

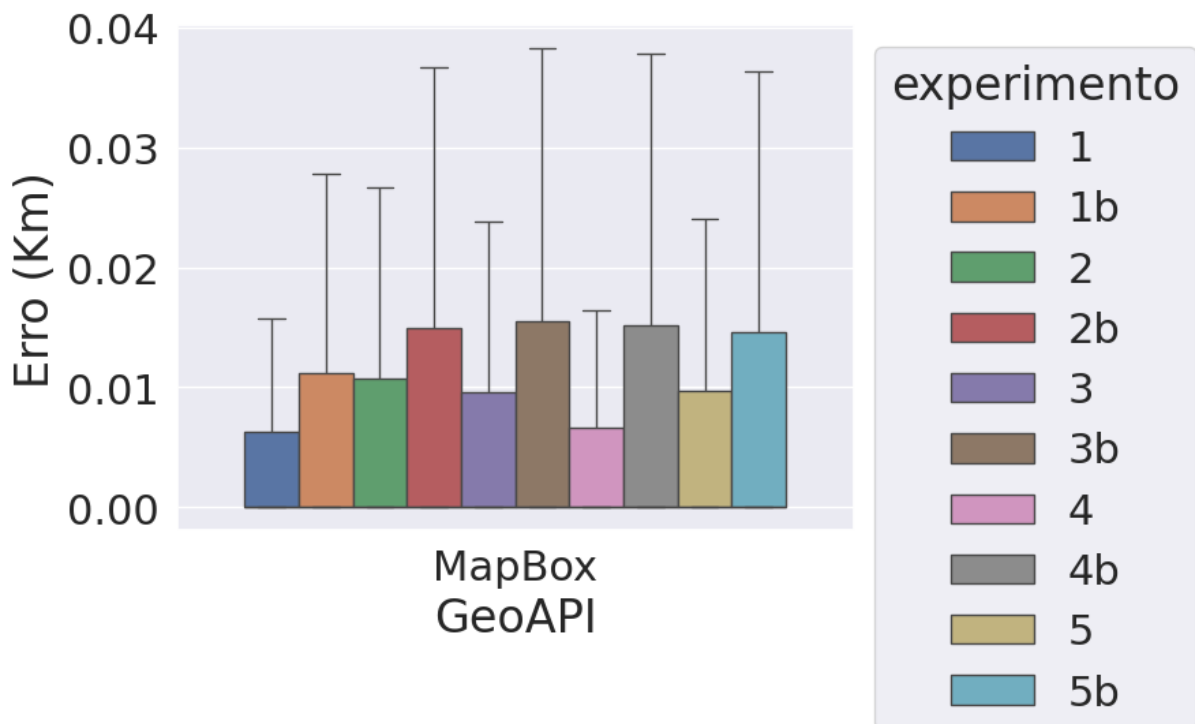


Figura 3.14 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers: Mapbox

As Figuras ?? e ?? apresentam os boxplots referentes aos dados de Belo Horizonte e São Paulo, respectivamente. Ao analisar os dados de Belo Horizonte, observa-se uma melhora considerável em quase todos os experimentos nos casos em que o bairro foi adicionado. A exceção são os experimentos 5 e 5b, nos quais a diferença não é significativa. O experimento com melhor desempenho para os dados de Belo Horizonte foi o experimento 1b, enquanto para os dados de São Paulo, o destaque foi para o experimento 1. Esses resultados confirmam as conclusões extraídas das tabelas ?? e ??, indicando que essa formatação é a mais eficaz.

Quanto aos piores resultados, para os dados de Belo Horizonte, as performances mais baixas foram observadas nos casos em que não havia informação de bairro, sem diferenças significativas entre eles. Já para os dados de São Paulo, a pior performance foi no experimento 3.

A Figura ?? apresenta o boxplot da API TomTom para os dados de Belo Horizonte. Observa-se que o experimento com melhor desempenho foi o 1b, enquanto o pior desempenho ocorreu no experimento 1, contrariando os resultados previamente obtidos. Os demais experimentos apresentaram resultados semelhantes, e não é possível afirmar que há uma melhora ao

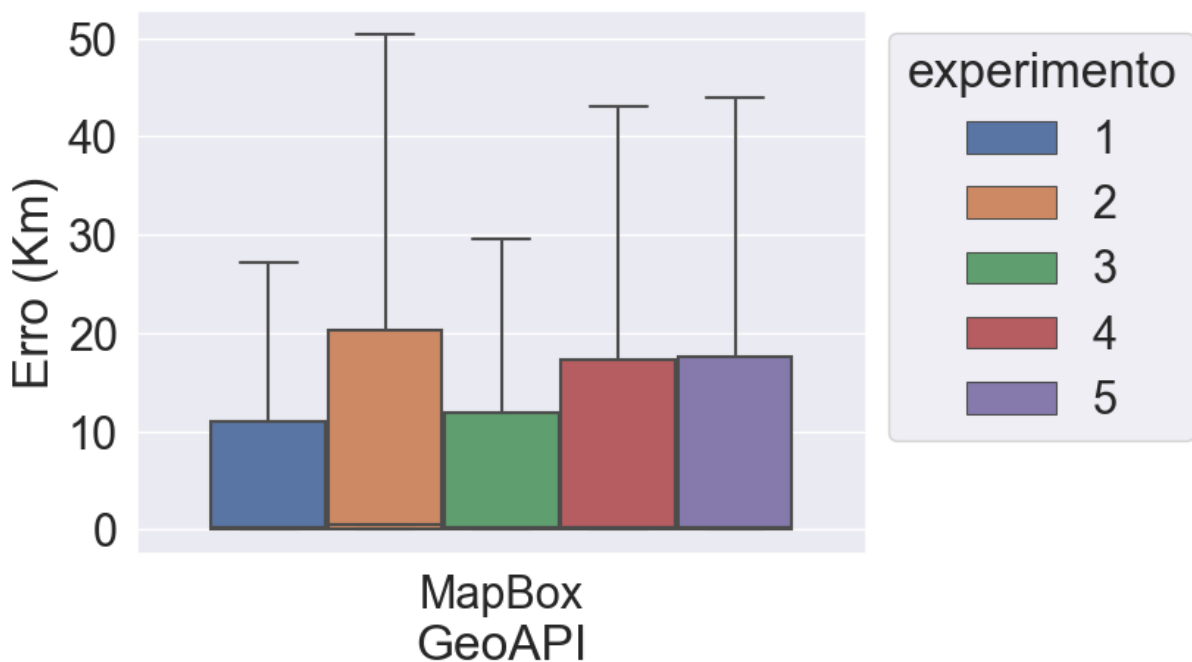


Figura 3.15 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers para a amostra de São Paulo: Mapbox

adicionar o bairro nesses experimentos, exceto nos casos do experimento 1 e 1b, nos quais houve uma melhora significativa ao adicionar o bairro.

Para concluir a análise dos boxplots, foram gerados dois gráficos para os dados de Belo Horizonte, conforme apresentado na Figura ??, e para os dados de São Paulo, na Figura ?. Ao examinar os dados de Belo Horizonte, observa-se que os experimentos que se destacaram positivamente foram os 1, 1b, 4, 4b, 5 e 5b, com pouca diferença entre eles. Por outro lado, os experimentos 2b e 3b obtiveram os piores resultados para os dados de Belo Horizonte. No contexto dos dados de São Paulo, o experimento 1 se destacou positivamente, enquanto o experimento 2 teve o pior desempenho. Os demais experimentos apresentaram resultados semelhantes.

### 3.5.1 Distribuição Espacial das Falhas dos Experimentos de Formatação

Por fim, realizamos uma análise espacial de falhas para entender de que forma a formatação da entrada pode contribuir para a falha de forma espacial. Para isso, criamos mapas hexagonais de falhas, como feito anteriormente, para cada API. Escolhemos os experimentos com menor e maior taxa de acerto de cada API a fim de visualizar com mais clareza a melhora a partir de formatações diferentes.

A figura ?? mostra os mapas de falhas dos experimentos com menor e maior taxa de acerto para os dados de Belo Horizonte e para a API Mapbox. Nessa figura é possível observar que no mapa de maior taxa de acerto há uma maior uniformidade e a maior parte do gráfico tem taxa de falha inferior a 20%. Já no gráfico de menor taxa de acerto há menor uniformidade e as regiões variam de taxas mais baixas (menor que 20%) até taxas mais altas (maior que 80%). É

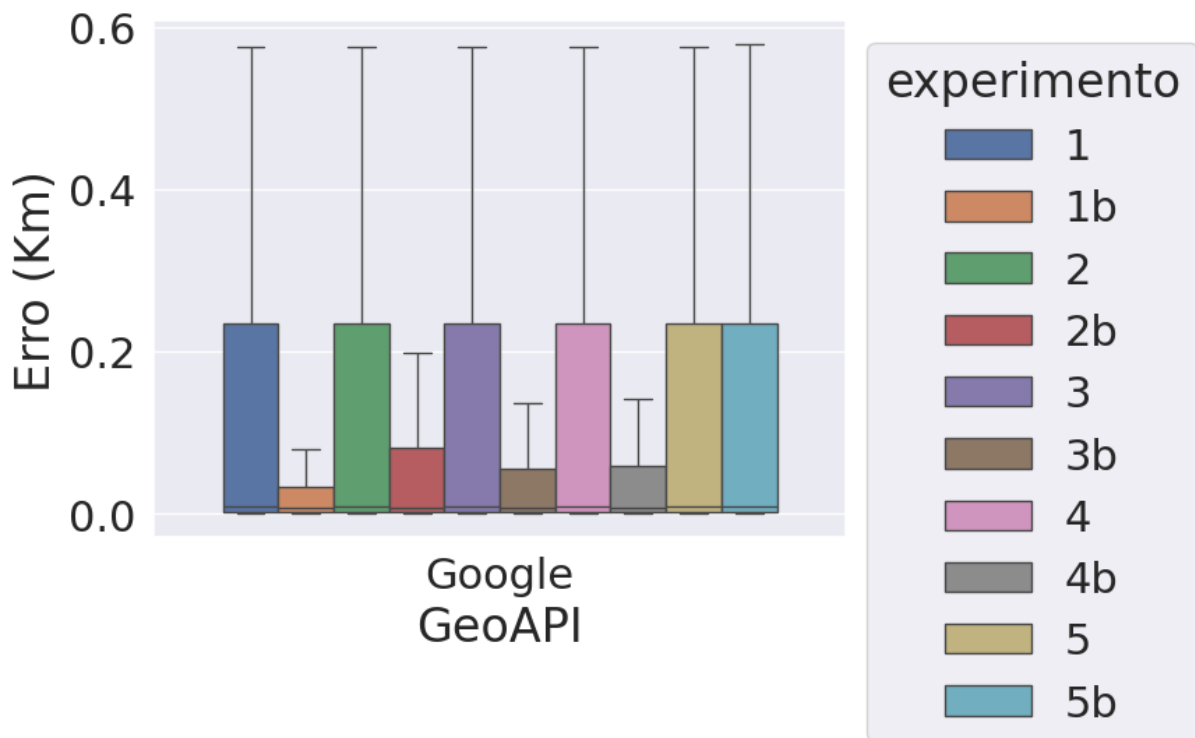


Figura 3.16 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers: Google

relevante observar também que as taxas de falha maiores aparentam estar em regiões similares como bordas, o que nos faz pensar que a alta taxa de erro é ligada a região e não somente a formatação de entrada. Apesar disso, até nessas regiões com mais erro, é possível observar uma melhora significativa a partir da formatação com melhor resultado.

#### COLOCAR FALHAS MAPBOX SP

A figura ?? mostra os gráficos de falhas para os experimentos de maior e menor taxa de acerto da API Google Maps para os dados de Belo Horizonte. Da mesma forma que acontece nos gráficos da Mapbox, os gráficos para o experimento de maior taxa de acerto apresentam uma uniformidade maior em comparação com o de menor taxa de acerto. Além disso, é interessante observar que existem algumas zonas de onde a taxa de falha é grande em ambos os gráficos. Essas zonas são nas fronteiras da cidade e na parte superior do gráfico. Porém, no gráfico de menor taxa de acerto há uma acentuação dessas regiões com altas taxas de acerto, corroborando com a hipótese de que a formatação realmente contribui para a melhora da taxa de falha.

#### COLOCAR FALHAS GOOGLE SP

A figura ?? mostra os gráficos de falha dos experimentos de maior e menor taxa de acerto da API TomTom para os dados de Belo Horizonte. Nessa figura, ao contrário das outras APIs, não é possível notar diferença significativa entre os experimentos com maior e menor taxa de acerto. Isso condiz com as taxas de acerto da TomTom para os experimentos que estavam todas próximas. Em comparação com as outras APIs, os dois gráficos apresentam uma certa uniformidade, com valores abaixo de 40% de falha. Algumas regiões aparentam taxas maiores, que são as regiões

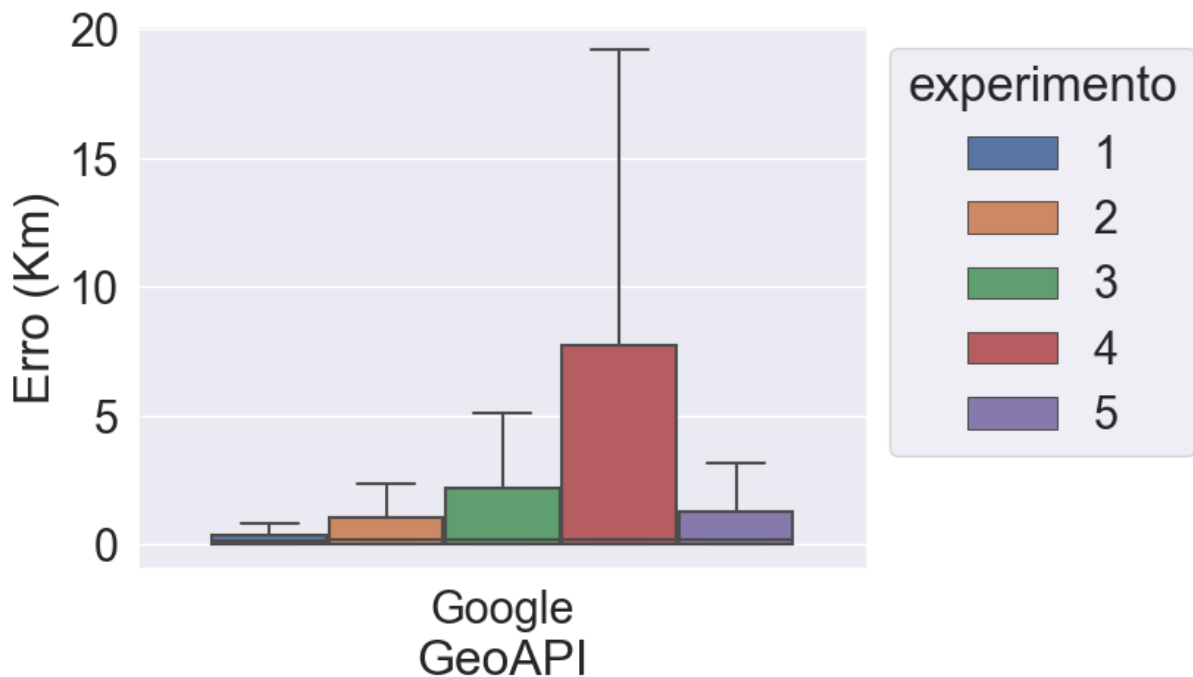


Figura 3.17 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers para a amostra de São Paulo: Google

inferior, superior e de fronteira. Em geral, TomTom apresentou resultados medianos em maior parte dos gráficos.

#### COLOCAR FALHAS TOMTOM SP

A figura ?? mostra os gráficos de falha dos experimentos de maior e menor taxa de acerto da API Open Route Service para os dados de Belo Horizonte. Nessa figura, apesar das outras APIs, há pouca uniformidade no gráfico de maior taxa, inclusive apresentando muitos valores de taxas altas em praticamente todas as regiões do gráfico. Já o gráfico de menor taxa de acerto, apresenta em quase sua totalidade valores de taxa de acerto próximos do máximo. Ou seja, para a API TomTom, para esses dados, a formatação de entrada é crucial, pois a depender da escolhida, a API pode errar a maioria das solicitações. Apesar disso, mesmo no experimento de maior taxa, há valores altos de erro, resultado que concorda com os obtidos anteriormente.

#### COLOCAR FALHAS ORS SP

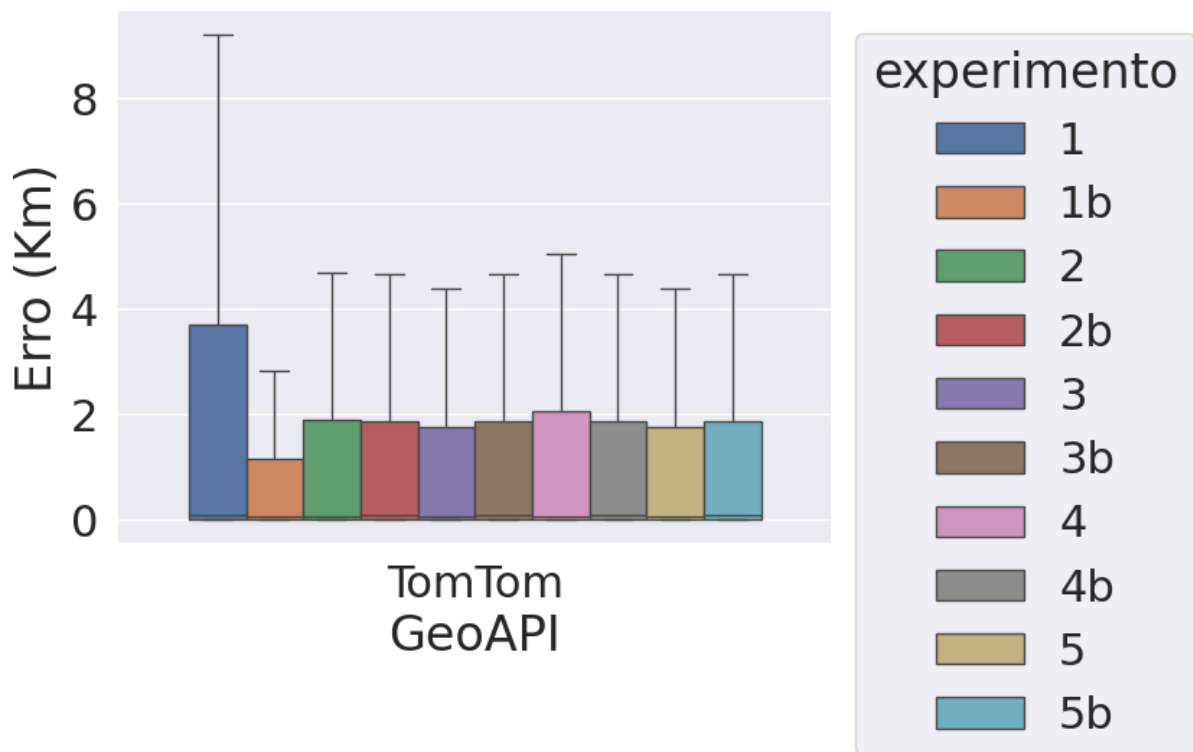


Figura 3.18 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers: TomTom

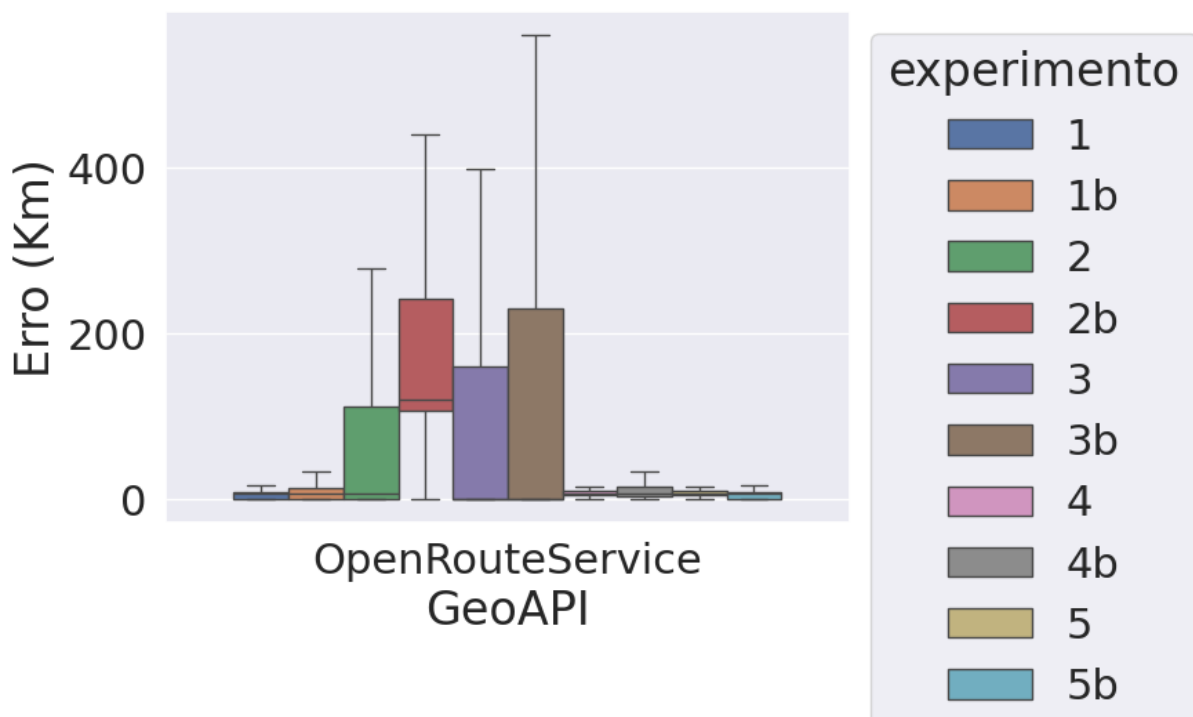


Figura 3.19 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers: ORS

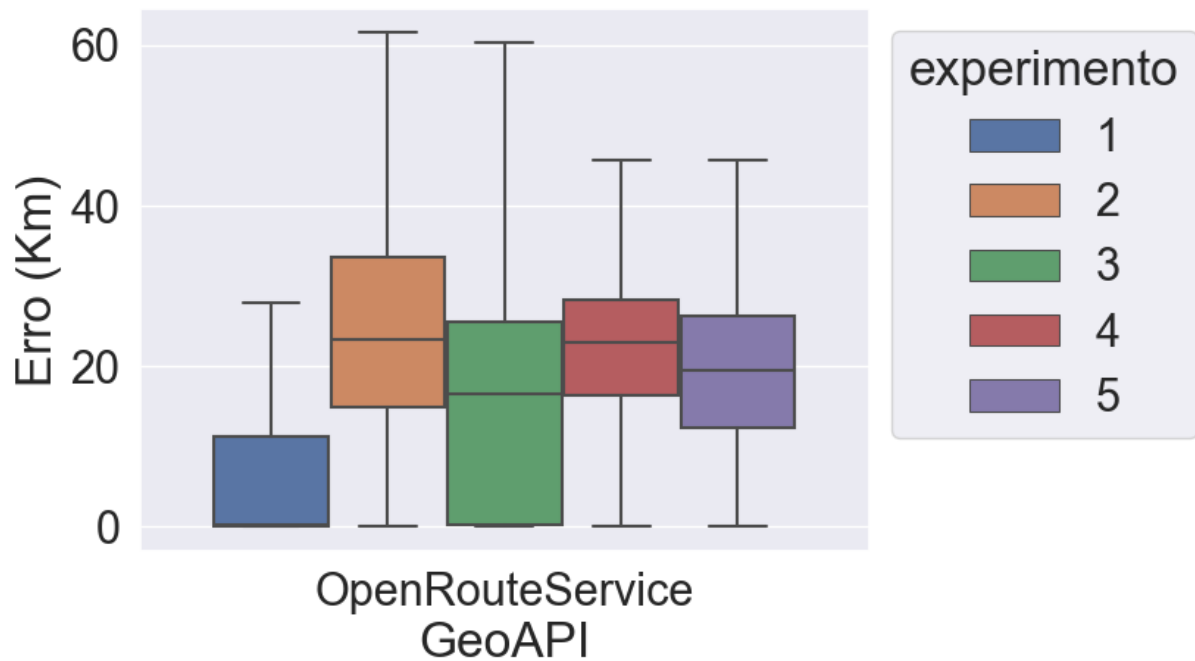


Figura 3.20 – Boxplot de Erro por API com todos os experimentos avaliados sem Outliers para a amostra de São Paulo: ORS

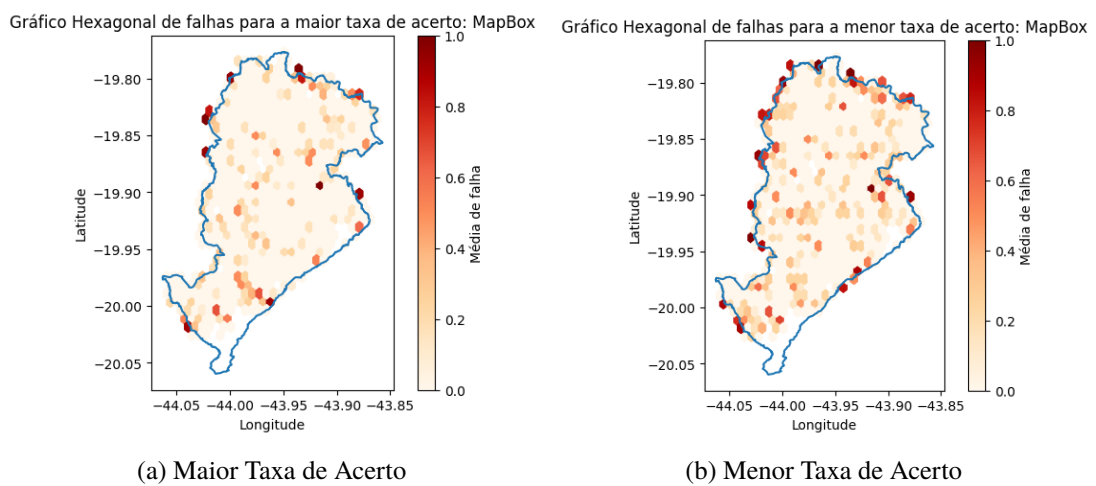
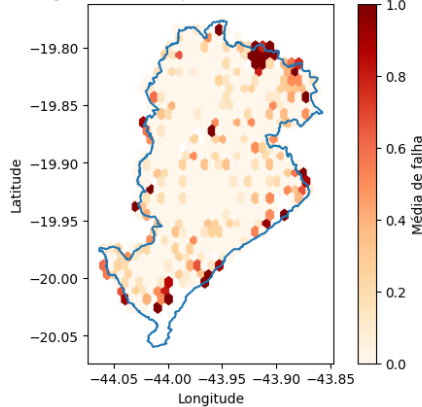


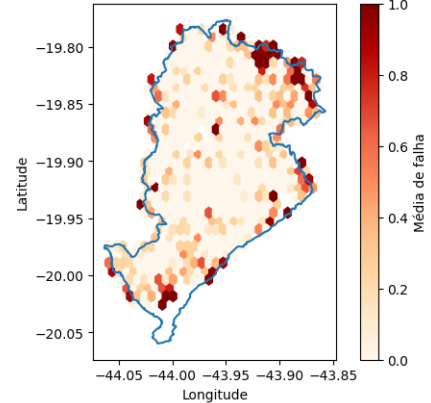
Figura 3.21 – Gráficos de falhas para a maior e menor taxas de acertados experimentos para os dados de Belo Horizonte: MapBox

Gráfico Hexagonal de falhas para a maior taxa de acerto: Google



(a) Maior Taxa de Acerto

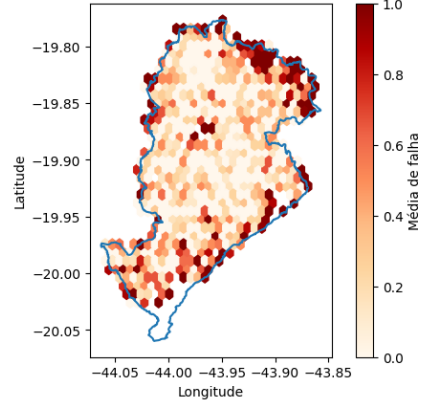
Gráfico Hexagonal de falhas para a menor taxa de acerto: Google



(b) Menor Taxa de Acerto

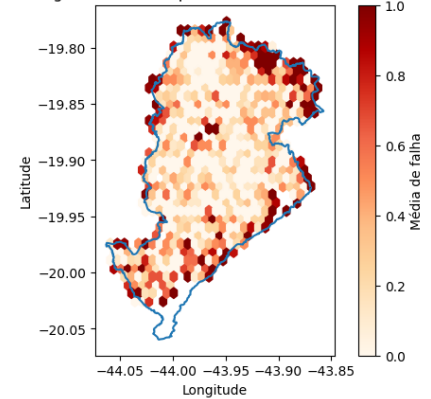
Figura 3.22 – Gráficos de falhas para a maior e menor taxas de acertados experimentos para os dados de Belo Horizonte: Google Maps

Gráfico Hexagonal de falhas para a maior taxa de acerto: TomTom



(a) Maior Taxa de Acerto

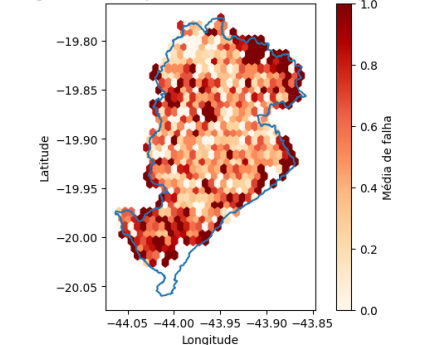
Gráfico Hexagonal de falhas para a menor taxa de acerto: TomTom



(b) Menor Taxa de Acerto

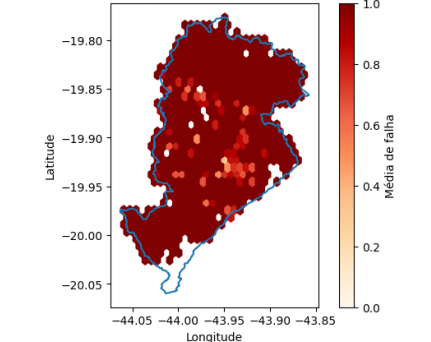
Figura 3.23 – Gráficos de falhas para a maior e menor taxas de acertados experimentos para os dados de Belo Horizonte: TomTom

Gráfico Hexagonal de falhas para a maior taxa de acerto: OpenRouteService



(a) Maior Taxa de Acerto

Gráfico Hexagonal de falhas para a menor taxa de acerto: OpenRouteService



(b) Menor Taxa de Acerto

Figura 3.24 – Gráficos de falhas para a maior e menor taxas de acerto dos experimentos para os dados de Belo Horizonte: Open Route Service

## 4 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou uma análise da qualidade das APIs Mapbox, TomTom e Here para os dados disponibilizados pelo CEM - Centro de estudos da Metrópole. Devido a problemas no Crawler, que é a aplicação que solicita e coleta a geocodificação, tivemos poucas respostas e estas foram insatisfatórias. A conclusão atual é de que as API cometem muitos erros graves e que não há relação clara entre a discrepância e o erro.

No entanto, quaisquer conclusões tiradas a partir desse estudo são enviesadas a partir do momento em que não temos dados o suficiente e estes são dados específicos. É importante ressaltar que a base de dados possui apenas endereços de escolas, não tendo uma diversidade de imóveis, localizados na região metropolitana de São de Paulo, o que limita a diversidade de localidades consideradas.

Sendo assim, é necessária a repetição do experimento com um maior montante de dados. Para a próxima etapa do trabalho, iremos repetir os experimentos apresentados com uma nova solicitação de geocodificação, além de incluir as APIs faltantes, Google Maps e Open Route Service. Acreditamos que, ao repetir o experimento, possamos compreender melhor o comportamento do erro e comparar os resultados com APIs já consolidadas na academia, como o Google Maps. Além disso, planejamos realizar toda a análise para uma amostra significativa da base de dados da (??), que conta com 85 mil endereços distribuídos no espaço. Esperamos que com a maior quantidade de endereços, possamos analisar o comportamento de forma mais clara. Em relação à análise de discrepância, planejamos acrescentar outra medida à análise, a distância para o ponto médio, que acreditamos ser promissora para o trabalho.

Por fim, esclarecemos que o [ChatGPT](#) foi utilizado durante o trabalho para revisar o texto. O comando "Revise" foi utilizado em textos previamente escritos e depois revisado pelos autores, para garantir a concisão dos dados apresentados.



# Referências

BEHR, F.-J. *Geocoding: Fundamentals, Techniques, Commercial and Open Services*. Schellingstraße 24, D-70174 Stuttgart, Germany: [s.n.], 2010.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. *Bioestatística: Princípios e Aplicações*. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Artmed, 2007. Editado também como livro impresso em 2003. ISBN 978-85-363-1144-9.

CHOW, T. E.; DEDE-BAMFO, N.; DAHAL, K. R. Geographic disparity of positional errors and matching rate of residential addresses among geocoding solutions. *Annals of GIS*, Taylor and Francis, v. 22, n. 1, p. 29–42, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/19475683.2015.1085437>>.

CHOW, T. E.; LIN, Y.; CHAN, W.-y. D. The development of a web-based demographic data extraction tool for population monitoring. *Transactions in GIS*, v. 15, n. 4, p. 479–494, 2011. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-9671.2011.01274.x>>.

DOCUMENTAÇÃO da Google Maps Geocodin API. Url<https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding?hl=pt-br>. Acesso em: [04 nov. 2023].

DOCUMENTAÇÃO da Mapbox Geocodin API. Url<https://docs.mapbox.com/api/search/geocoding/>. Acesso em: [04 nov. 2023].

DOCUMENTAÇÃO da Open Route Service Geocodin API. Url<https://openrouteservice.org/dev//api-docs/geocode/search/get>. Acesso em: [04 nov. 2023].

DOCUMENTAÇÃO da TomTom Geocodin API. Url<https://developer.tomtom.com/geocoding-api/documentation/product-information/introduction>. Acesso em: [04 nov. 2023].

GILBOA, S. M.; MENDOLA, P.; OLSHAN, A. F.; HARNESS, C.; LOOMIS, D.; LANGLOIS, P. H.; SAVITZ, D. A.; HERRING, A. H. Comparison of residential geocoding methods population-based study of air quality and birth defects. *Environmental Research*, v. 101, n. 2, p. 256–262, 2006. ISSN 0013-9351. Womens Occupational and Environmental Health. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001393510600020X>>.

GOOGLE Cloud Platform. Url<https://cloud.google.com/?hl=pt-br>. Acesso em: [13 ago. 2023].

HAY, G.; KYPRI, K.; WHIGHAM, P.; LANGLEY, J. Potential biases due to geocoding error in spatial analyses of official data. *Health and Place*, v. 15, n. 2, p. 562–567, 2009. ISSN 1353-8292. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353829208001081>>.

JR., C. A. D.; ALENCAR, R. O. de. Evaluation of the quality of an online geocoding resource in the context of a large brazilian city. *Transactions in GIS*, v. 15, n. 6, p. 851–868, 2011. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1467-9671.2011.01288.x>>.

KLEIN, C. *Dicionário da língua portuguesa*. 1. ed. São Paulo: Rideel, 2015. E-book. Disponível em: <<https://plataforma.bvirtual.com.br>>.

KRIEGER, N.; WATERMAN, P.; LEMIEUX, K.; ZIERLER, S.; HOGAN, J. W. On the wrong side of the tracts? evaluating the accuracy of geocoding in public health research. *American Journal of Public Health*, v. 91, n. 7, p. 1114–1116, 2001. PMID: 11441740. Disponível em: <<https://doi.org/10.2105/AJPH.91.7.1114>>.

Küçük Matci, D.; AVDAN, U. Address standardization using the natural language process for improving geocoding results. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 70, p. 1–8, 2018. ISSN 0198-9715. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0198971517300455>>.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. *Sistemas e Ciencia da Informacao Geografica*. Grupo A, 2013. ISBN 9788565837651. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788565837651/>>.

MAZUMDAR, S.; RUSHTON, G.; SMITH, B. J. et al. Geocoding accuracy and the recovery of relationships between environmental exposures and health. *International Journal of Health Geographics*, v. 7, n. 1, p. 13, 2008. Disponível em: <<https://ij-healthgeographics.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-072X-7-13>>.

OLLIGSCHLAEGGER, A. M. Artificial neural networks and crime mapping. In: WEISBURD, D.; MCEWEN, T. (Ed.). *Crime Mapping and Crime Prevention*. Monsey, NY: Criminal Justice Press, 1998, (Crime Prevention Studies, v. 8). p. 313–347.

PRODABEL. Url<<https://prefeitura.pbh.gov.br/prodabel>. Acesso em: [13 ago. 2023].

SPIEGEL, M. R.; STEPHENS, L. J. *Estatística*. Grupo A, 2009. E-book. ISBN 9788577805204. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788577805204/>>.

STEIN, R. T.; SANTOS, F. M. d.; REX, F. E. et al. *Geoprocessamento*. Grupo A, 2021. E-book. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556902852/>>.

TERRALAB - Laboratório de Capacitação e Desenvolvimento de Software. Url<<http://www2.decom.ufop.br/terralab/>. Acesso em: [11 ago. 2023].

WHITSEL, E. A.; QUIBRERA, P. M.; SMITH, R. L. et al. Accuracy of commercial geocoding: Assessment and implications. *Epidemiologic Perspectives and Innovations*, v. 3, n. 1, p. 8, 2006. Disponível em: <<https://epi-perspectives.biomedcentral.com/articles/10.1186/1742-5573-3-8>>.

ZANDBERGEN, P. A. Geocoding quality and implications for spatial analysis. *Geography Compass*, v. 3, n. 2, p. 647–680, 2009. Disponível em: <<https://compass.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1749-8198.2008.00205.x>>.

# **Anexos**

# ANEXO A – Tabelas dos experimentos de formatação completas

## A.1 Resultados Mapbox

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 1.539552      | 0.000046        | 10.912322        | 0.511817                 | 1.0000                     | 0.8506                   |
| 1b          | 1.855776      | 0.000048        | 9.876150         | 0.826308                 | 0.9994                     | 0.8088                   |
| 2           | 1.985113      | 0.000046        | 12.479481        | 0.880777                 | 1.0000                     | 0.8246                   |
| 2b          | 3.747499      | 0.000049        | 26.633204        | 0.712573                 | 0.9994                     | 0.7982                   |
| 3           | 1.660480      | 0.000046        | 11.255071        | 0.578759                 | 1.0000                     | 0.8400                   |
| 3b          | 2.268966      | 0.000049        | 13.585637        | 0.831613                 | 0.9968                     | 0.8056                   |
| 4           | 3.239740      | 0.000046        | 33.421642        | 0.579544                 | 1.0000                     | 0.8466                   |
| 4b          | 2.395281      | 0.000049        | 18.048547        | 0.618146                 | 0.9992                     | 0.7986                   |
| 5           | 2.270220      | 0.000046        | 25.666232        | 0.597641                 | 0.9992                     | 0.8380                   |
| 5b          | 22.718122     | 0.000049        | 151.027338       | 0.722369                 | 0.9976                     | 0.8100                   |

Tabela A.1 – Tabela de Resultados para Mapbox para a amostra de Belo Horizonte

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 9.885009      | 0.264745        | 33.929581        | 5.545753                 | 0.9750                     | 0.4178                   |
| 2           | 13.914447     | 0.481439        | 36.798156        | 8.848430                 | 0.9778                     | 0.3704                   |
| 3           | 12.998989     | 0.287323        | 46.743396        | 6.338832                 | 0.9920                     | 0.4126                   |
| 4           | 9.059893      | 0.287323        | 28.821270        | 5.833966                 | 0.9784                     | 0.4090                   |
| 5           | 13.102779     | 0.287323        | 54.305399        | 6.421116                 | 0.9800                     | 0.4010                   |

Tabela A.2 – Tabela de Resultados para MapBox para a amostra de São Paulo

## A.2 Resultados Google

## A.3 Resultados TomTom

## A.4 Resultados Open Route Service

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 2.284151      | 0.008843        | 5.067888         | 1.541325                 | 0.9992                     | 0.7272                   |
| 1b          | 1.477092      | 0.007045        | 12.541127        | 0.641472                 | 0.9996                     | 0.8064                   |
| 2           | 2.703568      | 0.008981        | 13.275209        | 1.500182                 | 0.9998                     | 0.7330                   |
| 2b          | 2.488111      | 0.007888        | 24.657557        | 0.424849                 | 0.9984                     | 0.7802                   |
| 3           | 2.191061      | 0.008868        | 4.905103         | 1.453413                 | 0.9992                     | 0.7338                   |
| 3b          | 1.449151      | 0.007442        | 15.764553        | 0.408326                 | 1.0000                     | 0.7830                   |
| 4           | 2.225610      | 0.008894        | 4.911848         | 1.508163                 | 0.9990                     | 0.7326                   |
| 4b          | 1.317380      | 0.007442        | 15.783626        | 0.400024                 | 0.9992                     | 0.7778                   |
| 5           | 2.214506      | 0.008916        | 4.911495         | 1.483368                 | 0.9992                     | 0.7332                   |
| 5b          | 1.631620      | 0.008843        | 12.503913        | 0.840399                 | 0.9988                     | 0.7292                   |

Tabela A.3 – Tabela de Resultados para Google para a amostra de Belo Horizonte

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 4.084331      | 0.136854        | 10.741415        | 2.554311                 | 0.9988                     | 0.5080                   |
| 2           | 6.290936      | 0.174920        | 21.319549        | 4.575344                 | 0.9986                     | 0.4854                   |
| 3           | 7.252604      | 0.177119        | 23.235726        | 5.262855                 | 0.9988                     | 0.4842                   |
| 4           | 9.891182      | 0.177119        | 66.380809        | 4.808587                 | 0.9988                     | 0.4842                   |
| 5           | 6.657890      | 0.183598        | 24.621577        | 4.687355                 | 0.9990                     | 0.4800                   |

Tabela A.4 – Tabela de Resultados para Google para a amostra de São Paulo

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 9.638626      | 0.097375        | 54.293889        | 2.383578                 | 1.0000                     | 0.5280                   |
| 1b          | 4.772675      | 0.060837        | 36.194963        | 1.415974                 | 0.9998                     | 0.5634                   |
| 2           | 3.493690      | 0.055936        | 31.276516        | 1.894932                 | 0.9994                     | 0.5566                   |
| 2b          | 4.977097      | 0.087184        | 34.512517        | 1.956344                 | 0.9998                     | 0.5376                   |
| 3           | 4.209165      | 0.055609        | 41.653527        | 1.857687                 | 1.0000                     | 0.5582                   |
| 3b          | 4.963664      | 0.082551        | 34.529210        | 1.938064                 | 0.9988                     | 0.5392                   |
| 4           | 10.042613     | 0.060228        | 57.575517        | 2.080298                 | 0.9998                     | 0.5532                   |
| 4b          | 4.977097      | 0.087184        | 34.512517        | 1.956344                 | 0.9998                     | 0.5376                   |
| 5           | 4.211492      | 0.055581        | 41.665922        | 1.861228                 | 0.9994                     | 0.5578                   |
| 5b          | 4.965005      | 0.083011        | 34.522296        | 1.940898                 | 0.9992                     | 0.5392                   |

Tabela A.5 – Tabela de Resultados para TomTom para a amostra de Belo Horizonte

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 36.121177     | 0.108194        | 249.594126       | 3.940234                 | 0.8548                     | 0.4494                   |
| 2           | 36.597577     | 0.108194        | 250.180881       | 3.818216                 | 0.8552                     | 0.4496                   |
| 3           | 15.477097     | 0.108194        | 105.033151       | 3.638018                 | 0.8552                     | 0.4502                   |
| 4           | 36.121297     | 0.108278        | 249.594109       | 3.940367                 | 0.8548                     | 0.4490                   |
| 5           | 13.224068     | 0.107051        | 84.522569        | 3.595458                 | 0.8414                     | 0.4440                   |

Tabela A.6 – Tabela de Resultados para TomTom para a amostra de São Paulo

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 5.443245      | 6.606720        | 4.669510         | 5.259343                 | 0.9992                     | 0.2646                   |
| 1b          | 134.564517    | 6.726786        | 352.871052       | 70.399993                | 0.9526                     | 0.1562                   |
| 2           | 141.563530    | 7.689302        | 326.944740       | 85.764655                | 0.9906                     | 0.2228                   |
| 2b          | 235.720433    | 120.745927      | 321.074977       | 190.471249               | 0.9530                     | 0.0546                   |
| 3           | 215.411691    | 0.450277        | 446.187607       | 148.459274               | 0.9904                     | 0.4006                   |
| 3b          | 221.030496    | 0.545940        | 442.133290       | 155.460776               | 0.9906                     | 0.3908                   |
| 4           | 7.574040      | 7.585665        | 3.281047         | 7.597740                 | 1.0000                     | 0.0146                   |
| 4b          | 152.061311    | 7.894395        | 379.053022       | 86.883669                | 0.9512                     | 0.0672                   |
| 5           | 7.867047      | 7.587377        | 15.029207        | 7.599037                 | 0.9958                     | 0.0148                   |
| 5b          | 5.828340      | 6.606720        | 20.905763        | 5.322782                 | 0.9998                     | 0.2478                   |

Tabela A.7 – Tabela de Resultados para Open Route Service para amostra de Belo Horizonte

| Experimento | Média<br>(Km) | Mediana<br>(Km) | Desvio<br>Padrão | Média<br>Aparada<br>(Km) | Taxa de<br>Resposta<br>(%) | Taxa de<br>Acerto<br>(%) |
|-------------|---------------|-----------------|------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| 1           | 8.016763      | 0.346648        | 16.978958        | 6.323177                 | 0.9986                     | 0.2894                   |
| 2           | 149.089363    | 23.343768       | 368.646520       | 80.847362                | 0.9950                     | 0.0530                   |
| 3           | 22.615834     | 23.022681       | 9.940436         | 22.497670                | 0.9988                     | 0.0014                   |
| 4           | 111.728383    | 16.604444       | 356.468299       | 45.451290                | 0.9900                     | 0.1494                   |
| 5           | 19.782864     | 19.499381       | 23.891962        | 18.967053                | 0.9996                     | 0.0104                   |

Tabela A.8 – Tabela de Resultados para OpenRouteService para a amostra de São Paulo