

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Criação de Rotas adequadas ao Acesso de Crianças em
Bicicleta à Escola - Algoritmo ComSIG**

Francisco Malveiro Lino

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e
Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento

Dissertação de Mestrado Orientada pelo Doutor Nuno Manuel
Sessarego Marques da Costa e pela Doutora Rosa Melo Félix

2025

Universidade de Lisboa
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território



**Criação de Rotas adequadas ao Acesso de Crianças em
Bicicleta à Escola - Algoritmo ComSIG**

Francisco Malveiro Lino

Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e
Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento

Dissertação de Mestrado Orientada pelo Doutor Nuno Manuel Sessarego Marques da
Costa e pela Doutora Rosa Melo Félix

Júri:

Presidente: Doutora Patrícia Catarina dos Reis Macedo Abrantes, Professora Auxiliar do
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa

Vogais:

- Doutor Filipe Manuel Mercier Vilaça e Moura, Professor Associado do Instituto Superior
Técnico da Universidade de Lisboa
- Doutora Ana Isabel Matias Louro Martins, Professora Auxiliar do Instituto de Geografia
e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa
- Doutora Rosa Melo Félix, Investigadora de Pós-doutoramento do CERIS - Civil
Engineering Research and Innovation for Sustainability do Instituto Superior Técnico da
Universidade de Lisboa

Agradecimentos

O desenvolvimento deste trabalho não teria sido possível sem o encorajamento de todos os que me rodeiam, deste modo gostaria de expressar os meus agradecimentos às partes envolvidas.

Agradeço aos meus orientadores, o Professor Nuno Marques da Costa, por ter criado em mim o entusiasmo por esta área e acompanhado a minha formação académica, a Professora Rosa Melo Félix, por todo o encorajamento e apoio dado no decorrer deste trabalho. Agradeço a ambos pelo voto de confiança que me deram ao aceitar fazer parte desta odisseia.

Agradeço aos meus pais e irmãos pela paciência e pela confiança que depositam em mim. Aos meus amigos, especialmente o Miguel, por reconhecer o meu potencial, para além das nossas discussões altamente frutíferas, e que me apoiou ao longo de todo o meu percurso académico. À Joana, pelo carinho e compreensão nos momentos mais difíceis, e pelos contributos para esta dissertação.

Agradeço às entidades que acompanharam o desenvolvimento desta dissertação, nomeadamente a Câmara Municipal de Lisboa, pelo interesse demonstrado no algoritmo e pela cedência de dados reais das origens de alunos, assim como a cooperativa Bicicultura, pelas oportunidades de aprendizagem e formação que me foram dadas ao longo de dois anos de colaboração.

Declaração de Autoria

Eu, Francisco Malveiro Lino, declaro que a presente dissertação de mestrado intitulada “Criação de Rotas adequadas ao Acesso de Crianças em Bicicleta à Escola - Algoritmo ComSIG”, é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O conteúdo é original e todas as fontes consultadas estão devidamente mencionadas na bibliografia ou outras listagens de fontes documentais, tal como todas as citações diretas ou indiretas têm devida indicação ao longo do trabalho segundo as normas académicas.

Resumo

Em 2022, 51,9% das crianças matriculadas no 1º Ciclo do Ensino Básico em Lisboa iam para a escola de automóvel e apenas 1,3% de bicicleta, skate ou patins (CML, 2022). Apesar da residência dos alunos estar habitualmente a uma distância que estes possam cobrir em modos ativos, este valor está longe de acompanhar esse pressuposto, desafiando os esforços de promoção da mobilidade sustentável e da saúde infantil, inscritas nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, e as metas de utilização da bicicleta defendidas na Estratégia Nacional da Mobilidade Ativa Ciclável.

Para contrariar esta tendência, têm sido criados programas de mobilidade ativa escolar como os Comboios de Bicicleta (grupo de crianças que se desloca para a escola de bicicleta, acompanhadas de monitores). No entanto, o planeamento destes programas não tem sido executado de forma automática e generalizável a qualquer escola. Acrescente-se que os algoritmos de planeamento de percursos em bicicleta têm sido desenvolvidos para um público-alvo diferente de uma criança (normalmente adultos, para viagens de lazer ou utilitárias), que têm necessidades diferentes.

Pretende-se com esta dissertação aprofundar o estudo de um algoritmo de planeamento de rotas adaptadas para crianças em bicicleta, com base em fatores de ponderação como a segurança e o conforto.

Através do uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é possível sintetizar o processo de criação de rotas, considerando os locais de residência dos alunos, através da ponderação dos fatores que melhor se adequem à circulação de crianças em bicicleta.

O algoritmo criado, denominado ComSIG, automatiza o processo de criação de rotas para crianças em bicicleta e expande-se para a criação de rotas para todos os alunos de uma escola.

Os resultados desta dissertação servirão para informar o planeamento otimizado de rotas seguras para as escolas, apoiando a transição da mobilidade escolar para modos ativos.

Palavras-chave

Comboios de bicicleta, Sistemas de Informação Geográfica, Mobilidade, Bicicleta, Crianças

Abstract

In 2022, 51.9% of children enrolled in the 1st Cycle of Basic Education in Lisbon traveled to school by car, while only 1.3% used a bicycle, skateboard, or rollerblades (CML, 2022). Although students typically live within a distance that could be covered using active modes of transportation, this figure does not reflect that assumption, challenging efforts to promote sustainable mobility and child health, as outlined in the United Nations' Sustainable Development Goals, as well as the bicycle usage targets advocated in the National Active Cycling Mobility Strategy.

To counter this trend, active school mobility programs such as "Bike Buses" (groups of children cycling to school accompanied by monitors) have been created. However, the planning of these programs has not been executed in a way that is automatic or easily generalizable to any school. Additionally, route planning algorithms for cycling have been developed for a target audience different from children (typically adults, for leisure or utility trips), who have different needs.

This dissertation aims to deepen the study of a route planning algorithm adapted for children cycling, based on weighting factors such as safety and comfort. Through the use of Geographic Information Systems (GIS) tools, it is possible to streamline the route creation process, considering the students' residential locations and weighting the factors that best suit children's cycling needs.

The algorithm developed, called ComSIG, automates the process of creating routes for children on bicycles and extends to creating routes for all students at a school. The results of this dissertation will serve to inform the optimized planning of safe routes to schools, supporting the transition of school mobility to active modes.

Keywords

Bike Buses, Geographic Information Systems, Mobility, Bicycle, Children

Índice

Agradecimentos..... v

Resumo..... vii

Abstract viii

Índice ix

Índice de Figuras xi

Índice de Quadrosxii

Índice de Equaçõesxii

Siglas e Acrónimosxiii

Glossárioxiii

1. Introdução..... 1

1.1. Enquadramento..... 1

1.2. Objetivos..... 2

1.3. Metodologia..... 3

1.4. Estrutura da dissertação 4

2. Revisão da Literatura 5

2.1. Vantagens da bicicleta 5

2.1.1. Impacto ambiental 5

2.1.2. Promoção da saúde..... 6

2.1.3. Vantagens económicas 8

2.1.4. Aumento da eficiência do sistema de transportes 9

2.2. Desafios à adoção da bicicleta na cidade 10

2.2.1. Padrões de ocupação territorial..... 10

2.2.2. Segurança..... 13

2.2.3. Declives 16

2.2.4. Distância..... 17

2.3. Crescer a pedalar 18

2.3.1. Fases de desenvolvimento físico e cognitivo 18

2.3.2. Acessibilidade escolar 19

2.3.3.	Aprender a andar de bicicleta	22
2.3.4.	Programa “Comboios de bicicleta para a escola”	24
2.4.	Estratégia para a mobilidade ativa e sustentável	28
2.4.1.	Estratégia Nacional para a Mobilidade Ativa Ciclável 2030	28
2.4.2.	Estratégia do Município de Lisboa	30
2.5.	O uso dos SIG para modelação de rotas para crianças em bicicleta.....	32
3.	Métodos.....	39
3.1.	Caso de Estudo ComSIG	40
3.2.	Dados.....	41
3.2.1.	Localização de escolas e alunos	41
3.2.2.	Rede viária e ciclável	42
3.3.	Algoritmo identificador de percursos em bicicleta para as escolas.....	43
3.3.1.	Atributos dos arcos	43
3.3.2.	Fórmula de custo total	51
3.4.	Planeador de rotas adequadas a crianças	52
3.5.	Rede ciclável para a escola.....	52
3.6.	Validação	53
3.7.	Replicação para outras escolas.....	54
4.	Resultados e Discussão	55
4.1.	Análise comparativa com um algoritmo tradicional	63
4.2.	Resultados da validação.....	66
4.3.	Resultados da replicação para outras escolas	67
5.	Conclusões	71
5.1.	Considerações finais	71
5.2.	Limitações e Desenvolvimentos futuros	73
	Referências Bibliográficas	77
	Anexos.....	85

Índice de Figuras

Figura 1: Excesso de peso e obesidade em crianças dos sete aos onze anos. Fonte: IOTF, 2005	7
Figura 2: Comparação dos tempos de deslocação numa distância de 5 km Na cidade, a bicicleta constitui, na maior parte dos casos, um meio de deslocação tão rápido como o automóvel (tempo contado de porta a porta). Fonte: Adaptado de Comissão Europeia (2000).....	9
Figura 3. Declives transponíveis em função do desnível. Fonte: Copenhagenize France (2023)	17
Figura 4: Repartição modal das deslocações dos alunos para as escolas em Lisboa (todos os tipos de escolas e todos os graus de ensino). Retrato da cidade 2022. Fonte: CML, 2022	21
Figura 5: Programa Lisboa Sem Rodinhas. Fonte: Manuel Rodrigues Levita/CML	23
Figura 6: Comboio de bicicletas em Lisboa. Fonte: Visão - Todos a bordo no comboio de bicicletas!	26
Figura 7: <i>Bicibus</i> , o programa de CB de Barcelona. Fonte: dscarb.....	27
Figura 8: A evolução das iniciativas de Comboios de Bicicleta. Fonte: Simón-i-Mas et al., (2024) ..	28
Figura 9: Demonstração da criação de rotas com o openrouteservice	33
Figura 10: <i>Propensity to Cycle Tool</i> (PCT).....	35
Figura 11: <i>Cycle Route Uptake and Scenarios Estimation</i> (CRUSE)	36
Figura 12: NPT Scotland	37
Figura 13: BiclaR, as rotas com maior potencial de alteração modal para bicicleta em Lisboa	38
Figura 14: Fluxo metodológico	40
Figura 15: Rede viária e ciclável do município de Lisboa	42
Figura 16: Declives da rede viária de Lisboa	44
Figura 17: Declives da rede viária na envolvente da Escola Básica de Telheiras	44
Figura 18: Fator $Custo_T$, uma variável contínua	46
Figura 19: Índice de tranquilidade no concelho de Lisboa.....	47
Figura 20: Índice de tranquilidade na envolvente da Escola Básica de Telheiras	47
Figura 21: Velocidade do tráfego em Lisboa.....	48
Figura 22: Velocidade do tráfego na envolvente da Escola Básica de Telheiras.....	49
Figura 23: Vias pedonais em Lisboa	50
Figura 24: Vias pedonais na envolvente da Escola Básica de Telheiras	51
Figura 25: Sobreposição dos percursos para a EB1 Telheiras desde as residências dos alunos, gerando uma rede.....	53
Figura 26: Rotas de teste criadas para as Avenidas Novas	56
Figura 27: Índice de tranquilidade das rotas das Avenidas Novas.....	56
Figura 28: Velocidade do tráfego na envolvente das rotas das Avenidas Novas.....	57
Figura 29: Declive das Rotas das Avenidas Novas.....	57

Figura 30: Rotas de teste criadas para o parque da Bela Vista	58
Figura 31: Índice de tranquilidade das rotas do parque da Bela Vista.....	59
Figura 32: Velocidade do tráfego na envolvente do parque da Bela Vista	59
Figura 33: Declive das rotas do parque da Bela Vista	60
Figura 34: Rotas de teste criadas para os Olivais.....	61
Figura 35: Índice de tranquilidade das rotas dos Olivais.....	61
Figura 36: Velocidade do tráfego na envolvente dos percursos dos Olivais	62
Figura 37: Declive das rotas dos Olivais	62
Figura 38: Sobreposição da rede de rotas com a rede ciclável em Telheiras	66
Figura 39: Sobreposição da rede de rotas com a rede ciclável nas Avenidas Novas	69

Índice de Quadros

Quadro 1: Comparação das rotas criadas pelo algoritmo ComSIG e o algoritmo tradicional para a Escola Básica de Telheiras	65
Quadro 2: Comparação das rotas criadas pelo algoritmo ComSIG e o algoritmo tradicional para a Escola Básica do Bairro de São Miguel	67

Índice de Equações

Equação 1: Função g , dependente do declive (d), em percentagem e comprimento dos segmentos (c), em m	45
Equação 2: $CustoD$, dependente da função g e do declive (d)	45
Equação 3: $CustoT$, relativo ao Índice de Tranquilidade	46
Equação 4. Fator $CustoV$, uma variável discreta	48
Equação 5: Fator $CustoF$, uma variável discreta	50
Equação 6- Custo total, através da soma ponderada do custo dos atributos dos arcos.	51

Siglas e Acrónimos

AMC	Análise Multi-Critério
ANSR	Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária
BICI	<i>Bloomberg Initiative for Cycling Infrastructure</i>
CML	Câmara Municipal de Lisboa
CRUSE	<i>Cycle Route Uptake and Scenarios Estimation</i>
ENMAC	Estratégia Nacional da Mobilidade Ativa e Ciclável
ENMAP	Estratégia Nacional da Mobilidade Ativa e Pedonal
ETSC	<i>European Transport Safety Council</i>
GEE	Gases com Efeito de Estufa
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
PCT	<i>Propensity to Cycle Tool</i>
PCML	Potencial Ciclável do Município de Lisboa
WHO	<i>World Health Organization</i>

Glossário

Mobilidade sustentável – É definida por um sistema de transportes sustentável em vários eixos, englobando aspetos ambientais, sociais e económicos. A redução do impacto ambiental, como as emissões de poluentes, garantindo que todos têm acesso a opções de transporte seguras, acessíveis e fiáveis, são as prioridades para a consolidação deste sistema de transportes (Holden et al., 2019).

Mobilidade ativa - Abrange qualquer transporte não motorizado, ou seja, depende da propulsão humana como, por exemplo, circular a pé, de bicicleta, *skate* e patins (Anna & Rocca, 2009).

Last-mile – Corresponde à última etapa de uma deslocação, seja para fins pessoais ou no domínio da logística (Schnabel, 2024).

Bike-sharing – Define-se como um serviço que pressupõe a partilha de uma frota de bicicletas através de sistema de aluguer ou empréstimo por determinado período, de forma a aumentar a rotatividade da utilização (IMT, 2011).

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Em 2022, 51,9% das crianças matriculadas no 1º Ciclo do Ensino Básico iam para a escola de automóvel e apenas 1,3% de bicicleta, skate ou patins, segundo o relatório do inquérito “Mãos ao Ar”, produzido anualmente pela Câmara Municipal de Lisboa (CML, 2022). Apesar da residência dos alunos estar habitualmente a uma distância que estes possam cobrir em modos ativos, este valor está longe de acompanhar esse pressuposto, desafiando os esforços de promoção da mobilidade sustentável e da saúde infantil, inscritas nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, e as metas de utilização da bicicleta defendidas na Estratégia Nacional da Mobilidade Ativa Ciclável (ENMAC).

Para contrariar esta tendência, programas de mobilidade suave escolar como os Comboios de Bicicleta e os Pedibus (grupo de crianças que se desloca para a escola de bicicleta e a pé, acompanhadas de monitores) têm um conjunto de vantagens tanto para os participantes como para a envolvente da escola. Contribui ainda para uma maior independência das crianças (Huang et al., 2018) e para uma melhor performance cognitiva (Martínez-Gómez et al., 2011). Por outro lado, favorece a aprendizagem das regras do Código da Estrada, o conhecimento e a familiarização com o bairro em que residem. Do ponto de vista da envolvente, estes programas contribuem para a diminuição do congestionamento no perímetro da escola, reduzindo, conseqüentemente, as emissões de poluentes derivadas do uso de viaturas automóveis.

O planeamento destes programas é tendencialmente feito com base no conhecimento local dos monitores e coordenadores dos programas, o que não permite a análise sintética de rotas individuais ou de uma área geográfica mais abrangente. Para tal seria necessária a utilização de um algoritmo de criação de rotas para crianças em bicicleta. Os algoritmos existentes para a criação de rotas foram desenvolvidos para um público-alvo diferente de uma criança, normalmente adultos, para viagens utilitárias ou de lazer. Estes requerem considerações diferentes e assim, é evidente uma lacuna que será endereçada e investigada ao longo desta dissertação.

A criação de rotas para ciclistas através de processos de análise de redes é uma prática corrente, tendo já sido desenvolvidas diferentes metodologias adaptadas a diferentes perfis

de utilizadores e diferentes áreas geográficas. Existem soluções comerciais focadas no utilizador, como o *Komoot* e o *Bikemap*, que permitem a visualização de rotas adaptadas a diferentes perfis e modalidades de ciclismo. Estas apresentam ao utilizador informação detalhada sobre a rota seleccionada e permitem seguir direções. Para o apoio à decisão no planeamento da infraestrutura ciclável existem também modelos e algoritmos desenvolvidos para diferentes propósitos, sejam deslocações urbanas ou para cicloturismo, criados em diversos países. São exemplos destas a *Propensity to Cycle Tool* (PCT), a *Cycle Route Uptake and Scenarios Estimation* (CRUSE), e para a Área Metropolitana de Lisboa, o BicláR. No entanto, após a revisão de literatura foi possível verificar a ausência de uma ferramenta de apoio ao planeamento de infraestrutura ciclável na envolvente das escolas, especialmente uma que considerasse as características específicas a crianças em bicicleta.

1.2. Objetivos

Pretende-se com esta dissertação aprofundar o estudo de um algoritmo de planeamento de rotas adaptadas para crianças em bicicleta, com base em fatores de ponderação como o conforto e a segurança. Para tal, é necessário identificar os fatores preponderantes na escolha de percursos em bicicleta adaptados às crianças, classificar esses fatores em escalas contínuas ou discretas e combiná-los para criar um modelo de soma ponderada. Assim, será possível criar um algoritmo de criação de rotas seguras para crianças em bicicleta (ComSIG).

Este algoritmo poderá ser então utilizado para estimar os percursos das crianças para a escola e identificar os eixos mais utilizados, através da sobreposição dos percursos dos alunos dessa escola. O algoritmo ComSIG deverá ser facilmente adaptável para crianças em diferentes fases de desenvolvimento e para várias escolas da cidade. O nome ComSIG deriva da junção dos termos “Comboio de bicicletas (COM)” e “Sistemas de Informação Geográfica (SIG)”.

O ComSIG poderá ser utilizado para diferentes análises da rede viária e ciclável, nomeadamente para a criação em massa de rotas de alunos para a escola.

Os resultados desta dissertação servirão para contribuir na operacionalização de programas de CB e informar o planeamento otimizado de rotas seguras para as escolas, apoiando a transição da mobilidade escolar para modos mais sustentáveis.

1.3. Metodologia

Através do uso de ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o *Network Analyst*, é possível sintetizar o processo de criação de rotas, considerando os locais de residência hipotéticos dos alunos (aleatorizados por razões de privacidade) como origens e a escola como destino, através da ponderação dos fatores que melhor se adequem à circulação de crianças em bicicleta. Foram introduzidos no modelo fatores de custo como o Índice de Tranquilidade, o declive, a velocidade máxima permitida do tráfego e a presença de caminhos pedonais. O algoritmo ComSIG permite criar rotas entre dois pontos definidos e criar uma rede de rotas desde a morada (real ou fictícia) dos alunos para a escola.

A metodologia aplicada resume-se nos seguintes passos:

1. Seleção de caso de estudo;
2. Identificação e classificação de fatores de custo adequados a crianças para viagens em bicicleta;
3. Criação de um modelo de custos ponderados para o algoritmo de menor custo adequado a crianças;
4. Aleatorização das origens das viagens para a escola;
5. Estimativa das rotas em bicicleta para a escola (destino), através no *Network Analyst*;
6. Sobreposição das rotas para identificação dos percursos com maior potencial que possam servir para projetos de promoção do uso da bicicleta como meio de transporte para a escola;
7. Validação dos resultados através de entrevista a *stakeholders*;
8. Replicação do algoritmo para outras escolas do município.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está organizada em cinco capítulos, incluindo este primeiro introdutório ao tema.

No capítulo 2 propõe-se uma revisão da literatura sobre as vantagens e os desafios na adoção da bicicleta, os inerentes da sua integração na mobilidade escolar e são enunciadas as várias políticas públicas de ordem nacional e municipal para a transição para uma mobilidade ativa.

O capítulo 3 descreve a metodologia adotada, tanto na recolha e tratamento de dados, como na classificação de redes viárias, desenvolvimento de um algoritmo de escolha de percursos adequados a crianças e geração de redes de mobilidade escolar para bicicleta.

No capítulo 4 são indicados e discutidos os resultados obtidos nas duas aplicações do algoritmo e feita uma análise comparativa com um algoritmo tradicional baseado apenas no fator distância.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões, limitações e pistas de desenvolvimentos futuros desta dissertação.

2. Revisão da Literatura

Para a contextualização do tópico da utilização da bicicleta por crianças para realizar o percurso casa-escola, foi realizada uma pesquisa e revisão de literatura que abordassem a utilização urbana e utilitária da bicicleta na cidade, com relevância para a observância do caso particular das crianças. Sabendo que a utilização da bicicleta em meio urbano tem sido estudada ao longo das últimas duas décadas (Pucher & Buehler, 2012), sendo suas vantagens face a outros modos de transporte bem conhecidas (OMS, 2018), pretende-se neste capítulo abordar os aspetos que são considerados mais importantes, com um especial enfoque nas crianças.

As deslocações utilitárias em bicicleta apresentam um conjunto de mais-valias para os utilizadores e a sua envolvente, nomeadamente os benefícios para a saúde relativos à atividade física e a redução das emissões de poluentes. Do ponto de vista económico, esta opção nas deslocações urbanas é mais acessível daquela que o automóvel oferece. Por último, as deslocações em bicicleta constituem parte de uma solução intermodal para as deslocações urbanas, articulando com o transporte público, especialmente quando estão implementados sistemas de *bike-sharing*.

São também identificadas algumas barreiras à utilização da bicicleta, com destaque para algumas dificuldades específicas no que diz respeito à sua promoção junto da população infantil.

São abordadas estratégias em vigor que contribuem para a promoção da utilização do modo ciclável e finalmente, é feita uma análise da utilização dos SIG para a modelação de rotas para ciclistas.

2.1. Vantagens da bicicleta

2.1.1. Impacto ambiental

As emissões elevadas de gases com efeito de estufa levam a repensar as formas como nos deslocamos, especialmente dentro dos centros urbanos.

O setor dos transportes é responsável por um terço do consumo final de energia na União Europeia (Comissão Europeia, 2020). Segundo a Agência Europeia do Ambiente,

este representa cerca de um quarto das emissões de gases com efeitos de estufa (GEE) na União Europeia em 2021. Destas, mais de 75% são emissões provenientes do transporte terrestre (EEA, 2023).

Em 2015 foi decretado no Acordo de Paris, assinado por 195 países, que a meta para a contenção do aquecimento global fosse reforçada de modo a não exceder os 2°C, relativamente aos níveis pré-industriais. As emissões de gases com efeito de estufa devem ser neutras até 2050 e as emissões globais devem reduzir em 50% até 2030 (UN, 2015b). Enquadrado no Objetivo 11: Cidades e Comunidades Sustentáveis dos ODS das Nações Unidas, o objetivo 11.2 também evidencia a importância de um sistema de transportes seguro, acessível e sustentável para todos, enquanto que o 11.6 estabelece a redução do impacto ambiental das cidades, com particular atenção à qualidade do ar e à gestão de resíduos (UN, 2015a).

Em ambiente urbano outra das preocupações da utilização de meios de transporte motorizados é o ruído, que impacta na qualidade de vida e saúde das populações (IMT, 2012). Neste campo, a bicicleta constitui um modo de deslocação inerentemente nulo em emissões de GEE e ruído, sendo a sua utilização, por excelência, uma forma de diminuir o impacto ambiental das deslocações humana nas cidades.

2.1.2. Promoção da saúde

O sedentarismo foi identificado como o quarto maior fator de risco para a mortalidade, correspondendo a 6% das mortes a nível global, sendo que o excesso de peso e obesidade são responsáveis por 5% da mortalidade global. Segundo a *International Obesity Task Force* (IOTF), Portugal detém níveis de excesso de peso e obesidade infantil que excedem os 30% em crianças dos sete aos 11 anos. Portugal apresenta uma das taxas de obesidade infantil mais elevadas de toda a União Europeia (Figura 1) (International Obesity Task Force & European Association for the Study of Obesity, 2005).

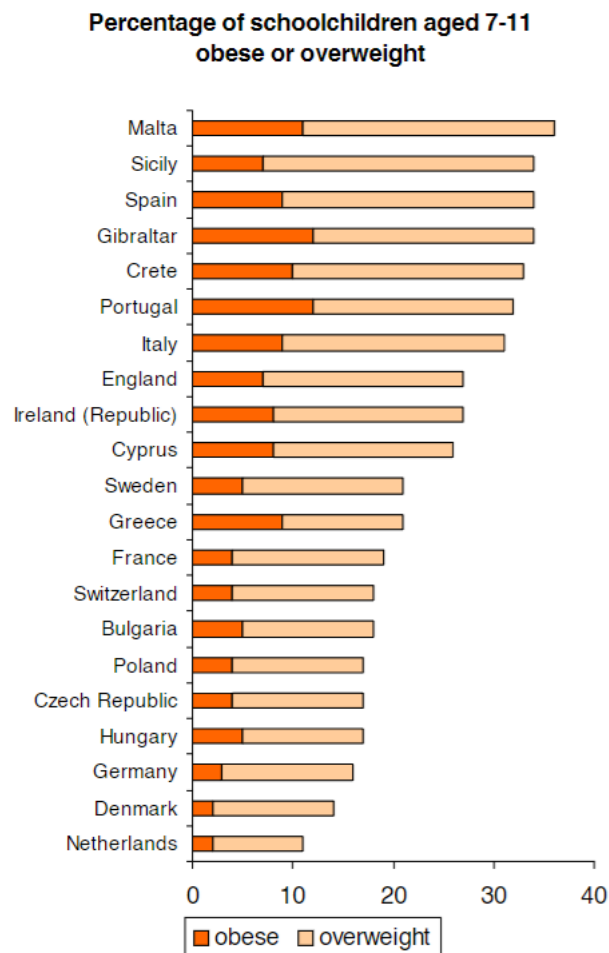


Figura 1: Excesso de peso e obesidade em crianças dos sete aos onze anos. Fonte: IOTF, 2005

A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda a crianças dos cinco aos 17 anos a realização de pelo menos 60 minutos diários de atividade física moderada ou de média intensidade, nos quais se incluem brincar, realizar desporto e deslocações, a pé ou de bicicleta (World Health Organization, 2010).

A utilização da bicicleta é uma forma de exercício aeróbico que oferece benefícios para a saúde, entre eles a saúde cardiovascular, a aptidão física, contribuindo para o bom desenvolvimento físico (muscular e ósseo) de crianças e adolescentes (Oja et al., 2011; Unwin, 1995).

Por outro lado, o uso regular da bicicleta tem repercussões positivas ao nível da saúde mental. Crianças que se exercitam têm menos probabilidade de desenvolver fatores de risco para doenças crónicas (Boreham & Riddoch, 2001). Andar de bicicleta contribui para o bem-estar psicológico, estando associado a maiores níveis de felicidade, satisfação e redução do stress (Stark et al., 2018).

A autonomia que a mobilidade em bicicleta concede às crianças é também condutora de bem-estar. Crianças que têm um maior nível de independência nas suas deslocações apresentam maiores níveis de felicidade e satisfação. Isto reflete-se na sua capacidade de orientação no seu ambiente e de tomada de decisões em relação a trajetos, aumentando a sua autoestima e confiança. Simultaneamente, o grau de independência atribuído às crianças reflete a confiança que os pais nela depositam e as perceções das capacidades da criança e da segurança no seu ambiente. Uma maior autonomia correlaciona-se assim à maior confiança por parte dos pais nas capacidades dos seus filhos, traduzida em comportamentos seguros e responsáveis em vários contextos (Leung & Loo, 2017).

2.1.3. Vantagens económicas

A crescente adoção da bicicleta como modo de transporte comporta um conjunto de benefícios para a economia nacional, local e dos próprios utilizadores. Muitas destas vantagens estão associadas ao benefício que a bicicleta traz para a saúde individual dos utilizadores e com o decréscimo da dependência do automóvel particular. Diminui assim a despesa pública no sistema de saúde, através da diminuição da exposição à poluição atmosférica e sonora e risco de acidentes rodoviários (Deenihan & Caulfield, 2014; Gössling, 2020; Nikitas et al., 2019).

No que diz respeito aos custos de implementação da infraestrutura para as cidades, por exemplo, em Copenhaga, o custo de um quilómetro percorrido por um automóvel é mais de seis vezes superior ao custo de um quilómetro percorrido em bicicleta (Flusche, 2009; Gössling, 2020).

Outra vantagem para os utilizadores é o tempo poupado nas deslocações comparativamente com outros modos, ainda que a sua eficiência e competitividade estejam diretamente relacionadas com a qualidade da infraestrutura (Börjesson & Eliasson, 2011). Em áreas urbanas densas, o tempo de deslocação porta a porta é comparativamente inferior para quem utiliza a bicicleta, apresentando maior flexibilidade que o automóvel, especialmente quando se considera o tempo que pode ser necessário despendido no processo de estacionamento, no fazer face ao congestionamento, aliado ao possível trajeto final a pé.

Se se considerar ainda o trajeto para o trabalho de bicicleta, regista-se maior pontualidade e menor cansaço à chegada, o que se traduz num aumento da produtividade

(Loong et al., 2017; Wild & Woodward, 2019).

A bicicleta é também um veículo mais acessível para os utilizadores, não só pelo custo de aquisição mais reduzido, mas também pelos custos de manutenção, reparação, seguro e carga fiscal (Gössling, 2020; Litman, 2016).

Finalmente, a indústria da bicicleta é geradora de empregos em vários setores, desde a indústria aos serviços, da construção ao turismo. A infraestrutura ciclável contribui ainda para a valorização do mercado imobiliário, uma vez que a sua presença tem um impacto positivo na acessibilidade e na saúde (Blondiau et al., 2016; Flusche, 2009).

2.1.4. Aumento da eficiência do sistema de transportes

Em meio urbano, a bicicleta é o modo de deslocação mais rápido em percursos inferiores a cinco quilómetros (Comissão Europeia, 2000) (Figura 2), sendo que metade dos percursos realizados neste meio é inferior a três quilómetros. Esta oferece também maior versatilidade, especialmente em ambientes congestionados. Além disso, tem a vantagem de ocupar menos espaço de estacionamento do que um automóvel (IMT, 2012).

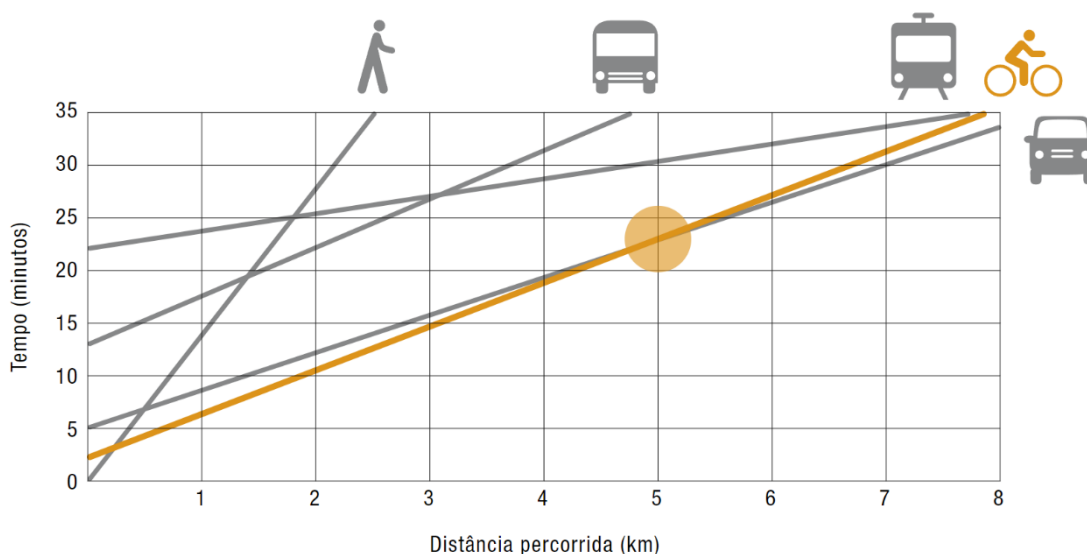


Figura 2: Comparação dos tempos de deslocação numa distância de 5 km Na cidade, a bicicleta constitui, na maior parte dos casos, um meio de deslocação tão rápido como o automóvel (tempo contado de porta a porta). Fonte: Adaptado de Comissão Europeia (2000)

Para além disso, a utilização da bicicleta aumenta a área de captação dos interfaces de transporte público. Consequentemente, a presença de mais ligações com o transporte

público aumenta a distância que é possível percorrer para os utilizadores de bicicleta (Lee et al., 2016; Pucher & Buehler, 2009).

Desde modo, desenvolvendo a integração da bicicleta com o transporte público encoraja tanto o uso da bicicleta como o uso do transporte público (Geurs et al., 2016). Da mesma forma, combinar a bicicleta com o transporte público contribui para solucionar o problema da *last mile*, melhorando a acessibilidade ao transporte público e reduzindo a dependência do automóvel, especialmente quando aliados a sistemas de *bike-sharing* (Oeschger et al., 2020).

2.2. Desafios à adoção da bicicleta na cidade

Há vários aspetos que contribuem para a atratividade do modo ciclável em meios urbanos. Segundo um inquérito realizado em Lisboa em 2018 (R. Félix et al., 2019), as principais barreiras apontadas estão ligadas à falta de segurança sentida, à ausência de infraestrutura ciclável, ao risco associado à condução junto do trânsito automóvel e aos declives acentuados. Aspetos motivadores para os utilizadores da bicicleta incluem as vantagens para a saúde e a expansão da rede ciclável, assim como a curta distância entre a sua habitação e o trabalho. Este estudo também recolheu a perspetiva de pessoas que não utilizavam a bicicleta na cidade e que mencionaram aspetos dissuasores como chegar transpirado ao destino ou a inconveniência da utilização de equipamento de segurança como capacete, luzes e cadeado. Foi também mencionada a noção de que vivem demasiado longe para fazer o percurso em bicicleta, o que realça o problema da expansão urbana. Paralelamente, os inquiridos referiram que a probabilidade de adotar a bicicleta como modo de transporte aumentaria se houvesse uma expansão da rede ciclável, se trabalhassem mais perto da área de residência ou se possuíssem uma bicicleta elétrica.

2.2.1. Padrões de ocupação territorial

O automóvel é dominante na maioria das cidades europeias nas deslocações diárias. Tendo inicialmente oferecido maior mobilidade, hoje sabemos que a utilização do automóvel particular para deslocações urbanas diminui a qualidade de vida das populações. Para além dos aspetos já referidos, o automóvel também afeta a paisagem

urbana de várias formas: este exige área urbana para estacionamento, limitando usos de ordem coletiva e mais saudáveis, como é o caso de espaços verdes e ciclovias. Um automóvel estacionado necessita do triplo do espaço comparativamente ao transporte público e 10 vezes mais do que a bicicleta. Quando um automóvel circula a 50 km/h, ocupa 70 vezes mais espaço do que um ciclista ou um peão ocupariam (Nello-Deakin, 2019).

Atualmente, o desenho das cidades tem vindo a ser repensado de forma a acomodar outros modos de transporte, sendo necessário reduzir o número de carros a circular através de estratégias que tornem a adoção do transporte público mais atrativa em detrimento do veículo automóvel. Atentemos à política de estacionamento adotada em cidades holandesas, que impõe um custo de estacionamento residencial de mil euros (Ostermeijer et al., 2019). Em Londres, Reino Unido, foi introduzida uma taxa de congestionamento (Prud'Homme & Bocarejo, 2005). Apesar dos exemplos promissores destas medidas de redução da presença do automóvel nas cidades e da dependência em relação ao seu uso, a implementação de iniciativas mais sistemáticas é atualmente escassa (Gössling, 2020).

Numa outra linha de abordagem, considere-se a importância das políticas de uso do solo, essenciais para melhorar a acessibilidade a pé e a mobilidade ciclável. Estas influenciam tanto a conceção como a implementação de infraestruturas que, por sua vez, aumentam a segurança e a competitividade dos modos ativos.

Quando o uso do solo é favorável à deslocação a pé ou de bicicleta, as taxas de adesão a esses modos aumentam (Chriqui et al., 2016). Por outro lado, quando as políticas de uso do solo não são congruentes, surgem os conflitos entre os diversos utilizadores da via pública, o desconhecimento das normas do código da estrada e um desenho inadequado de ciclovias. Ou seja, a mobilidade ativa fica comprometida (Quintero-Barbosa & Chávez-González, 2023).

A distância que as pessoas têm de percorrer no seu dia a dia influi também na escolha do modo de transporte. Deste modo, a expansão urbana descontrolada reduz o potencial da adoção da bicicleta como meio de transporte e está diretamente relacionada com as normas do uso dos solos. Para promover a acessibilidade a pé e o uso da bicicleta devem ser encorajadas as políticas de zonamento misto (DeLisle & Grissom, 2013) aliadas à implementação de medidas que desincentivem o uso do automóvel particular, como a fixação de impostos ou de estacionamento pago (Pucher & Buehler, 2008).

O conceito da Cidade dos 15 minutos

Um dos modelos de cidade que ajuda a promover a adoção da bicicleta é o da *Cidade dos 15 minutos*. A pandemia de COVID-19 realçou alguns aspetos do planeamento urbano que necessitavam de ser revistos, nomeadamente a acessibilidade a pé dentro dos meios urbanos. O conceito da *Cidade dos 15 minutos*, criado por Carlos Moreno (Moreno et al., 2021), baseia-se nos princípios do “crono-urbanismo” e tem como fundamento a redução do tempo das deslocações como principal parâmetro de melhoria da qualidade de vida em ambiente urbano.

O modelo tem sido implementado em Paris durante o mandato de Anne Hidalgo como presidente da Câmara (desde 2014 até à data da redação da dissertação) e consiste na reestruturação da paisagem urbana por forma a garantir a proximidade aos serviços considerados essenciais, como a habitação, emprego, comércio, saúde, educação e cultura.

O conceito tem quatro eixos:

- **Densidade:** considera a necessidade da criação de um número ótimo de habitantes por quilómetro quadrado para que a vivência em meio urbano seja sustentável. Ao contrário da habitação em altura e grande densidade, a *Cidade dos 15 minutos* foca-se numa densidade à escala humana, o que promove a acessibilidade pedestre/pedonal aos serviços. Entre outras vantagens, a otimização da densidade permite uma utilização mais eficiente dos recursos e reduz a dependência no automóvel;
- **Proximidade:** engloba a distância e também o tempo dispendido. O objetivo é garantir que as pessoas possam aceder a serviços essenciais em menos de 15 minutos a pé ou de bicicleta. Esta medida reduz os tempos de deslocação, o impacto ambiental e melhora a acessibilidade aos serviços (Marquet & Miralles-Guasch, 2015). Para além disso, a proximidade permite melhores interações sociais e o envolvimento da comunidade ao facilitar a transição entre a habitação, o trabalho e espaços recreativos;
- **Diversidade:** engloba dois aspetos, os bairros multifuncionais e a diversidade cultural. Os bairros multifuncionais combinam estruturas

residenciais, comerciais e recreativas, reduzindo a necessidade de longas deslocações e promovendo comunidades resilientes. A diversidade cultural garante que o planeamento urbano serve necessidades demográficas variadas, promovendo a inclusão e a coesão social;

- Digitalização: as tecnologias desempenham um papel importante no modelo da *Cidade dos 15 minutos*. Nesta estão incluídas tecnologias como a Internet das Coisas, Inteligência Artificial e análise de *Big Data*, que podem otimizar os serviços e infraestrutura urbanos. Ainda, as compras *online*, o trabalho remoto e as soluções de mobilidade inteligente, como os sistemas de bicicletas partilhadas, dependentes de plataformas digitais e que podem contribuir para a redução da dependência no automóvel (Moreno et al., 2021).

2.2.2. Segurança

O ODS 3: Saúde de qualidade indica a segurança rodoviária como uma das prioridades das Nações Unidas. O objetivo definido propõe que até 2020 seja reduzido para metade o número de mortos e feridos devido a acidentes rodoviários a nível global (UN, 2015a).

No caso do utilizador da bicicleta, este corre maior risco de vida comparativamente a utilizadores de outros modos de transporte, segundo estudos conduzidos nos Estados Unidos da América e no Reino Unido (Marshall & Ferenchak, 2019; Mindell et al., 2012). Segundo um outro estudo, elaborado na França, o risco de mortalidade de utilizadores de bicicleta é 1,5 vezes superior ao de um condutor de automóvel. A investigação contempla o número de deslocações e o tempo das mesmas (Bouaoun et al., 2015). No entanto, quando analisamos o caso de cidades com elevados níveis de utilização de bicicleta, registam-se menos acidentes relativos a todos os modos de transporte (Marshall & Garrick, 2011).

A segurança do modo ciclável também depende do número de pessoas que já utiliza a bicicleta. A noção de segurança nos números é muitas vezes apresentada como argumento para o incentivo ao investimento em medidas que aumentem a utilização da bicicleta (Jacobsen, 2015). Este conceito parte do princípio de que quanto mais pessoas utilizarem a bicicleta maior será a sua visibilidade e melhor será a consciência dos condutores da sua presença.

Embora a razão apontada seja geralmente a noção de que os condutores têm comportamentos mais seguros na presença de ciclistas e peões, Marshall & Garrick (2011) concluíram que o impacto da presença da infraestrutura ciclável segregada, com ciclovias protegidas ou separadas, está significativamente associada à redução de mortes e melhores condições de segurança para todos os utilizadores da via pública, havendo uma correlação bilateral entre a presença de ciclistas e o investimento em infraestrutura ciclável. Isto significa que quantas mais pessoas utilizarem a bicicleta, maior será o investimento em infraestrutura e vice-versa.

A velocidade da circulação é outro dos fatores de risco no que concerne à frequência e gravidade dos acidentes. Por exemplo, os peões correm um risco de cerca de 80% de morrer a uma velocidade de colisão de um automóvel a 50 km/h, em oposição a um risco de 10% a velocidades de 30 km/h. A velocidades superiores a 30 km/h, os condutores, peões e ciclistas cometem erros cujas consequências são, muitas vezes, fatais (ETSC, 1997). Aliado a isto, a ETSC encoraja os países-membros da União Europeia a adotar um limite de velocidade máxima de 30km/h em áreas residenciais e áreas onde existe uma grande presença de ciclistas e peões (ETSC, 2021).

A adoção desta medida tem gerado resultados positivos nos locais onde esta tem sido implementada. Em Bolonha, Itália, registou-se uma redução de 21% no número de acidentes em apenas 14 dias (ANSA English, 2024). Em Bruxelas, Bélgica, também foi registada uma redução de acidentes face a um período homólogo ao da implementação do novo limite de velocidade. (Belga, 2024).

Outra vantagem da redução do limite de velocidade é a redução do nível de ruído proveniente da rolagem dos veículos e a conseqüente melhoria da saúde física e mental da população. (Brink et al., 2022).

A este respeito, note-se que as crianças constituem os utilizadores mais vulneráveis - por serem mais pequenos do que os adultos, são menos visíveis. Por outro lado, ainda não desenvolveram a perceção total do que os rodeia, nem têm o domínio total sobre a bicicleta. Assim, medidas para atenuar as vulnerabilidades inerentes das crianças passam por uma aposta na educação e sensibilização tanto das crianças como dos pais; melhorias na infraestrutura, com a criação de mais e melhores passeios, ciclovias mais seguras e medidas de acalmia de tráfego; atualização da legislação para a redução dos limites de velocidade na envolvente das escolas; campanhas de sensibilização para o público em

geral (DaCoTA, 2012).

Aliada ao critério da velocidade do tráfego, outros parâmetros concorrem para a segurança das crianças na rede viária. Entre eles, a influência dos adultos que as acompanham, dos condutores de outros veículos e aspetos inerentes à rede viária, como os já mencionados locais seguros para atravessar a estrada.

Na Europa

A bicicleta foi o único modo de transporte que não viu um decréscimo de mortalidade na última década. O número de mortos por ano manteve-se estável entre as 1.900 e 2.100, enquanto que o número total de mortes na estrada reduziu em 23%. Simultaneamente, a proporção de ciclistas aumentou de 7% em 2010 para 9% em 2019. Atualmente, cerca de uma em 10 mortes na estrada na União Europeia correspondem a ciclistas (Comissão Europeia, 2021). Já o número de mortes de crianças tem reduzido desde 2010, no entanto em 2020 morreram 386 crianças até aos 14 anos e mais de 6000 foram mortas na última década em acidentes rodoviários (Comissão Europeia, 2023).

O caso dos Países Baixos

Atualmente, os Países Baixos são considerados uma referência para o planeamento e implementação de medidas no aumento da segurança e da atratividade do modo ciclável, o que resulta em 28% das deslocações a serem feitas em bicicleta (de Haas & Kolkowski, 2023). Em 1971, as mortes na estrada envolvendo um automóvel atingiram um recorde de 3 300 mortos, dos quais 500 eram crianças. Após a morte da sua filha num sinistro envolvendo um automóvel, um jornalista escreveu um artigo intitulado *Stop de Kindermoord (Parem o infanticídio)*, que espoletou num movimento no bairro de De Pijp, em Amsterdão. Pais e crianças saíram à rua para exigir melhores condições de segurança e espaço de lazer na rua para as crianças, ao invés de criar mais estacionamento para automóveis. Este movimento eventualmente culminou na criação do conceito de *woonerf*: o desenho de uma rua que dá prioridade aos peões e ciclistas em detrimento do trânsito automóvel. Desde então, este conceito tem vindo a ser utilizado em diversas cidades por todo o mundo e é a principal razão para a grande repartição modal da bicicleta nos Países Baixos (Katsavounidou, n.d.).

Em Portugal

Em Portugal, segundo o Relatório Anual de 2023 da Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR), ocorreram 3 239 acidentes envolvendo velocípedes, o que representa um aumento de 38,2% face a 2019. Dos sinistros resultaram 26 vítimas mortais e a tendência é também crescente face ao mesmo ano (ANSR, 2023).

2.2.3. Declives

Algumas das barreiras associadas à utilização da bicicleta são intrínsecas ao ambiente urbano. O declive é uma das mais apontadas no caso de Lisboa. Por um lado, existe a noção de que tem uma orografia desfavorável, sendo conhecida como a “cidade das sete colinas”. As subidas são um fator repulsivo à utilização da bicicleta devido ao maior esforço físico exigido e subsequente transpiração. No entanto, sabemos que mais de metade das ruas de Lisboa, 54%, são quase planas (declive inferior a 3%) e 75% apresentam um declive inferior a 5% (R. M. Félix, 2012), sendo que 5% é um valor de declive considerado confortável para utilizadores de bicicleta.

Esta barreira é também facilmente contrariada pela disseminação de bicicletas com assistência elétrica (Figura 3). Segundo o inquérito realizado aos utilizadores da rede ciclável, levado a efeito pela CML (Copenhagénize France, 2023), a maioria dos inquiridos está satisfeita com o declive ao longo da rede ciclável, sendo mais preocupantes os casos onde o declive seja mais acentuado. No caso de não haver um percurso alternativo e atrativo, a infraestrutura ciclável deve ser reforçada de forma a tornar a circulação mais segura e confortável (Copenhagénize France, 2023).

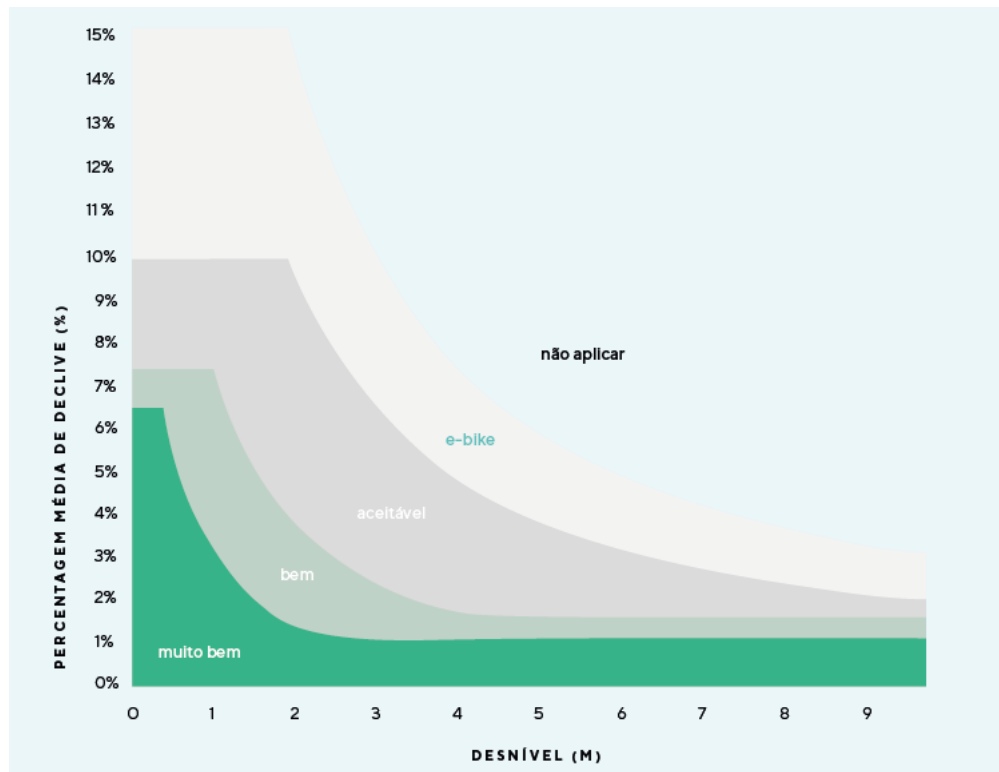


Figura 3. Declives transponíveis em função do desnível. Fonte: Copenhagenize France (2023)

Pelas razões expostas, o declive é uma das ponderações na escolha de percursos cicláveis. No entanto, este fator não é altamente dissuasor (Félix & Batista Silva, 2013) nem é o mais importante na seleção de rotas, quando comparado com a segurança e a velocidade do tráfego.

No caso específico das crianças, não foram encontradas recomendações específicas. Contudo, há que ter em consideração que as suas bicicletas apresentam características diferentes das dos adultos. Têm geralmente uma construção mais pesada e garantem apenas uma mudança. Existem modelos mais leves e com mais mudanças, mas de custo relativamente elevado. Assim, entenda-se que as bicicletas de criança requerem um esforço proporcionalmente superior, nomeadamente no arranque e nas subidas. Acresce o facto de que as crianças utilizam, frequentemente, bicicletas de tamanhos inadequados ou mal ajustadas à sua ergonomia.

2.2.4. Distância

Segundo as Normas para a Programação e Caracterização de Equipamentos Coletivos

(2002), que definem as áreas de influência de cada equipamento coletivo no modo pedonal, no que diz respeito aos alunos do 1.º Ciclo, a distância a pé entre a casa e a escola deve corresponder, preferencialmente, a menos de um quilómetro ou a um tempo máximo de 15 minutos. É também considerado um máximo aceitável de 1,5 quilómetros ou de 30 minutos de tempo de percurso. Em transporte público, o tempo máximo definido por estas normas corresponde a 40 minutos. Nos Países Baixos, a distância casa-escola considerada ciclável é inferior a dois quilómetros (Masoumi et al., 2020).

2.3. Crescer a pedalar

2.3.1. Fases de desenvolvimento físico e cognitivo

Os adultos têm uma perceção altamente sofisticada do que os rodeia, o que é especialmente importante para compreender os riscos da circulação no trânsito e o que fazer para garantir a sua segurança. O desenvolvimento das capacidades cognitivas de uma criança depende da sua idade e das oportunidades que tem de se expor livremente à circulação na via pública (DaCoTA, 2012).

Segundo a Comissão Europeia (2023), existem quatro fases distintas de desenvolvimento das crianças que determinam a forma como interagem com o ambiente e com o trânsito:

- **Até aos 2 anos:** o risco é elevado mesmo em locais relativamente seguros; o foco está no desenvolvimento da coordenação da consciência e do movimento; sentem-se atraídos por objetos em movimento (por exemplo, veículos); se um veículo não for visível a criança não se apercebe da sua existência;
- **Dos 2 aos 6 anos:** as crianças não desenvolveram ainda empatia por outros utilizadores da via (por exemplo, assumem que todos os que consegue ver o veem a si); não se conseguem concentrar em simultâneo em todos os aspetos da condução e facilmente se distraem;
- **Dos 6 aos 12 anos:** Já têm empatia por outros utilizadores da via; não têm dificuldade em compreender conceitos como o tamanho de um carro

ou a distância para a escola; conceitos abstratos como tempo e velocidade ainda estão por assimilar totalmente; é útil praticar a segurança rodoviária; ainda têm dificuldade em compreender situações complexas no trânsito;

- **A partir dos 12 anos:** a partir desta idade, as crianças conseguem cada vez mais pensar de forma abstrata; conseguem aperceber-se, avaliar e evitar riscos, compreender situações complexas no trânsito; nesta idade é admissível o ensino teórico das regras do Código da Estrada.

No que toca ao desenvolvimento físico, o crescimento das crianças também afeta a forma como interagem com a sua envolvente. Com o crescimento desenvolvem as suas capacidades psicomotoras, o que reduz também o risco associado à circulação a pé ou em bicicleta. Esse risco advém do facto de a sua estatura ser mais pequena o que condiciona a sua visibilidade para os outros e a capacidade de recolher informação sobre o que os rodeia (nomeadamente terem dificuldade em ver o que está por detrás de um obstáculo, comparativamente a um adulto) (ETSC, 2022).

2.3.2. Acessibilidade escolar

Tori et al. (2024), realizaram um estudo para o qual foram inquiridos 1251 alunos de quatro escolas em Bruxelas. Concluiu-se que embora a maioria fosse transportada num automóvel, existia um desejo da parte das crianças de ir para a escola a pé ou de bicicleta e que a falta de segurança da infraestrutura era a principal barreira para esta transição modal. No questionário, 83% dos alunos responderam que se sentiam seguros na envolvente escolar, tendo por outro lado numa pergunta de resposta aberta relatado que as suas principais preocupações se focavam nos diferentes tipos de veículos (camiões, carros e bicicletas). Segundo Tori et al. (2024), embora os alunos não reportem conscientemente problemas relacionados à segurança rodoviária, esta mantém-se uma preocupação para os mesmos.

De acordo com os Censos 2021, 0,7% das crianças dos cinco aos nove anos utiliza a bicicleta e 53% o automóvel. Segundo o relatório de 2022 do inquérito “Mãos ao Ar!” (CML, 2022) (Figura 4), elaborado pela CML, anualmente 45,4% dos alunos chegam à escola de carro, 26,8% de transporte coletivo (autocarro, metro, comboio, transporte escolar e elétrico), 24,5% a pé e apenas 1,7% de bicicleta, trotineta, patins e *skate*. Relativamente aos alunos que utilizam modos ativos, é de realçar o seguinte:

- As crianças inscritas em escolas públicas utilizam meios ativos mais regularmente do que as inscritas nas escolas privadas, onde há maior dependência do automóvel;
- À medida que crescem, as crianças deslocam-se menos a pé e de bicicleta, o que pode ser parcialmente atribuído à maior dispersão espacial das escolas de nível superior, obrigando os alunos a percorrer distâncias maiores. Por isso, do 1.º para o 2.º ciclo os níveis de utilização do automóvel aumentam ligeiramente, reduzindo a partir do 3.º ciclo, dando lugar aos transportes coletivos, que no ensino secundário suplantam a utilização do automóvel.

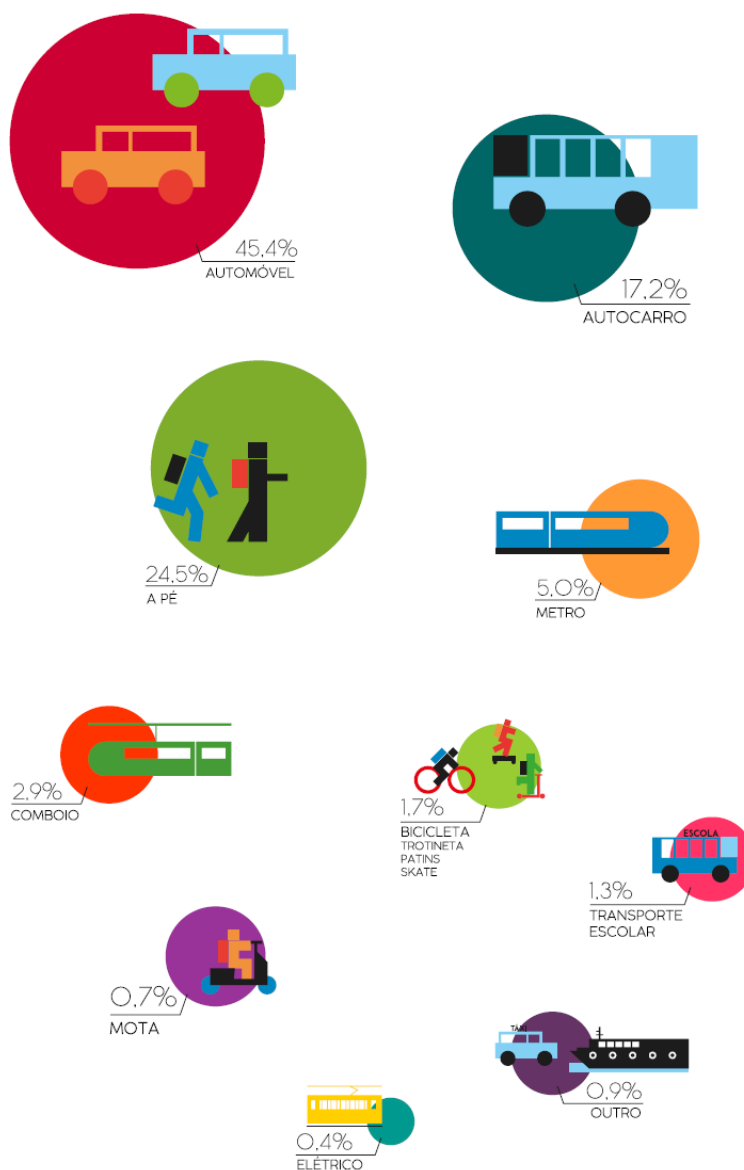


Figura 4: Repartição modal das deslocações dos alunos para as escolas em Lisboa (todos os tipos de escolas e todos os graus de ensino). Retrato da cidade 2022. Fonte: CML, 2022

Segundo um estudo que contemplou 552 escolas no Canadá, as que apresentam uma envolvente segura, detêm uma infraestrutura ciclável e garantem medidas de acalmia de tráfego registam maior adesão a modos ativos (Rothman et al., 2021).

Programas municipais como o *Mexe-te Pela Tua Cidade!*, da CML, que visa promover a mobilidade ativa, encerrando as ruas envolventes às escolas ao trânsito motorizado, contribuem para a segurança das crianças à chegada. Pelo menos uma vez por semana,

é apenas permitido chegar à escola a pé, de bicicleta, *skate*, patins ou trotineta (Câmara Municipal de Lisboa, Mobilidade, Programa de Mobilidade Escolar Mexe-Te Pela Tua Cidade - Município de Lisboa | Portal, n.d.). Programas homólogos têm apresentado resultados positivos em outras cidades, por exemplo, Londres, onde em 2021 o programa *School Streets* tinha sido implementado em 500 escolas, o que resultou na redução de 18% na utilização do carro para as escolas e um aumento da utilização dos modos ativos em várias escolas (Clarke, 2022).

2.3.3. Aprender a andar de bicicleta

Em Portugal, em 2019 surgiu o projeto *Desporto Escolar Sobre Rodas*. O objetivo é o de dar resposta às medidas propostas pela ENMAC 2030 no que toca à educação para a mobilidade sustentável, promovendo a aprendizagem da condução da bicicleta. O projeto é promovido pela Direção-Geral da Educação (DGE) e a Direção-Geral dos Estabelecimentos Escolares (DGEstE) em parceria com o Instituto Português do Desporto e da Juventude, I.P. (IPDJ). No contexto deste programa, foram entregues bicicletas e acessórios às unidades de ensino com o 2.º ciclo, para serem usados em contexto escolar (DGE, 2022). A previsão é de até ao final de 2024 estarem disponíveis cerca de 17 800 bicicletas em 863 estabelecimentos de ensino (IPDJ, 2022). Este projeto é acompanhado de um manual de apoio aos professores de educação física, com orientações e “ferramentas para a implementação e desenvolvimento de atividades velocipédicas nas escolas”, habilitando os alunos para a condução da bicicleta e aprendizagem das normas de circulação em estrada (Direção-Geral da Educação & Federação Portuguesa de Ciclismo, 2022).

No ano letivo de 2018/19, foi implementado em 12 escolas de Lisboa o programa *Lisboa Sem Rodinhas* (Figura 5), abrangendo nesse ano 853 alunos. O mesmo foi alargado nos anos letivos seguintes com o múltiplo objetivo de ensinar as crianças do 1º ciclo a pedalar, a desenvolver o gosto por este modo de transporte, promovendo a sua autonomia. Atualmente, o projeto está implementado em 55 escolas da cidade, abrangendo perto de uma centena de turmas, ou seja, cerca de 2 100 alunos (CML, 2021).



Figura 5: Programa Lisboa Sem Rodinhas. Fonte: Manuel Rodrigues Levita/CML

No caso de Lisboa, são de referir outros projetos como a *Tia Bina*, desenvolvido pela associação CICLODA em parceria com a Junta de Freguesia de Arroios e o IPDJ. Tendo iniciado a sua atividade em 2019 assume como missão “facilitar o uso da bicicleta para deslocações quotidianas e de lazer através da capacitação para a sua utilização na cidade, tornando este meio de transporte uma opção atrativa para a generalidade da população” (SOBRE – TiaBina, n.d.). Este projeto engloba não só a componente prática de andar de bicicleta, mas também uma componente de formação de condução em ambiente urbano, dirigida a toda a população, tanto para crianças como para adultos.

O projeto *Combina* é uma iniciativa piloto da CML com início no ano letivo de 2023-2024. Promove a autonomia dos alunos na utilização da bicicleta como meio de transporte no percurso entre a casa e a escola. Através de acompanhamento e mentoria personalizados, o projeto ajuda os participantes a encontrar rotas seguras e práticas, além de ensinar regras de trânsito e boas práticas na condução da bicicleta. Os participantes são acompanhados ao longo do programa e avaliados no final, com base em objetivos estabelecidos, promovendo assim a segurança e autonomia dos jovens ciclistas e incentivando a utilização da bicicleta como modo de transporte (CML, n.d.-a).

2.3.4. Programa “Comboios de bicicleta para a escola”

Ainda dentro dos programas de acessibilidade escolar, o “Comboio de Bicicletas” merece especial destaque.

Um Comboio de Bicicletas (CB) ou Cicloexpresso (em inglês “*Bike Bus*”) é um grupo de alunos que se desloca para a escola em bicicleta, acompanhado de um ou mais monitores adultos. Tal como um comboio ou um autocarro, um CB envolve algumas regras operacionais que garantem a qualidade e funcionalidade do serviço: uma rota, paragens e horários (Schimenovitz et al., 2003).

Os comboios de bicicleta têm modos de implementação distintos. Os primeiros foram organizados pelas escolas e pelos pais dos alunos, sendo que atualmente são também implementados por associações, municípios ou ciclo-ativistas.

O sucesso de um programa de CB depende do grau de envolvimento dos seguintes atores:

- Os pais, que podem assumir um papel formal ou informal, como associações de pais. São quem decide o modo de transporte das crianças, estando sempre presentes e, em certos casos, assumindo a coordenação dos CB. Nestes casos, a continuidade dos CB perigam sempre que se registam mudanças de ciclo e/ou escola por parte das crianças, levando alguns pais a abandonar este tipo de iniciativa. (Simón-i-Mas et al., 2024);
- As organizações de advocacia para a bicicleta, que se especializam no ensino da condução da bicicleta e têm a experiência e recursos humanos para organizar e/ou dar apoio a um CB. São muitas vezes constituídas por voluntários que coordenam ou apoiam na fase da implementação. Para garantir a sustentabilidade destes programas a longo prazo, é recomendada a remuneração destes participantes (Larouche et al., 2018; Nikitas et al., 2019). Uma das razões do declínio de alguns CB apresentada por Smith et al. (2015) é a elevada motivação necessária, dificultando o recrutamento;
- Os professores, uma vez que convivem diariamente com os alunos e que podem motivar as famílias para a participação nestas iniciativas. Em Madrid, o *Com Bici al Zuloaga*, o segundo mais antigo CB (tendo iniciado

em 2007), é organizado por um professor. Analogamente, em Edimburgo, o *WeeUnicorns*, por vezes com mais de 200 alunos participantes, também é organizado por um professor (Simón-i-Mas et al., 2024);

- O Poder Local, altamente influente no que toca à coordenação e investimento nestes programas. É o caso de Bogotá, Lisboa e Madrid, onde até hoje os programas dependem do apoio autárquico;
- As crianças, o eixo central dos CB, a quem confere não raras vezes o papel de incentivar as famílias a adotar os meios ativos. Estas são essenciais na criação, na participação e na existência destes programas.

Aspetos operacionais

Segundo o inquérito realizado junto de organizadores de CB de 13 países, por Simón-i-Mas et al. (2024), os CB percorrem maioritariamente um percurso de um a dois quilómetros. Por vezes, registam-se itinerários que podem chegar aos cinco quilómetros. A frequência de circulação é bastante alta, com 60% dos inquiridos a operar uma vez por semana, 10% diariamente e 8% duas vezes por semana. No que toca à tipologia de via utilizada, é de destacar que 75% dos CB circulam em estrada, utilizando uma ou todas as faixas disponíveis. Isto realça a necessidade de melhoria da infraestrutura ciclável, mas também o papel do CB como agente sensibilizador de proteção dos utilizadores do modo, dando visibilidade às questões relacionadas com a segurança, intrínsecas à circulação de crianças na via pública.

Por outro lado, sempre que os CB contam com a participação dos pais para supervisão, ficam ultrapassadas ou simplificadas questões legais e de seguros, que podem dificultar a realização destes programas.

Por fim, distinga-se que, no âmbito do apoio autárquico acima mencionado, a sustentabilidade destes programas pode ser reforçada pela existência de escolta policial, apoio financeiro e político, diálogos com outros agentes-parceiros das Câmaras Municipais, doações de material e estacionamento de bicicletas nas escolas. O apoio financeiro pode reverter em remuneração para os monitores, material e divulgação/comunicação.

Em Lisboa

Em 2015 surgiu em Lisboa o primeiro Cicloexpresso, na freguesia do Parque das

Nações. O que começou por ser uma atividade coordenada por pais, voluntários e funcionários da junta de freguesia, atualmente é um programa coordenado pela cooperativa Bicicultura a operar em sete aglomerações: Lisboa, Braga, Leiria, Palmela, Mafra e Matosinhos, estando presente também em Aveiro sob a coordenação da associação Ciclaveiro. No município de Lisboa está instituído, desde 2021, um programa municipal de comboios – *Comboios de Bicicletas de Lisboa* (Figura 6). Um comboio tem uma equipa de coordenação, que gere as inscrições das crianças, traça uma “linha”. Essa linha traduz-se num percurso/rota entre um determinado ponto de partida, definido de acordo com a morada dos inscritos, que é interetada por pontos de recolha, apelidados de “paragens”. A equipa nomeia “maquinistas”, ou seja, monitores voluntários que garantem o acompanhamento das crianças até à escola.



Figura 6: Comboio de bicicletas em Lisboa. Fonte: Visão - Todos a bordo no comboio de bicicletas!

Cada escola participante tem uma ou mais linhas que são definidas por um coordenador de linha no início do ano letivo e que podem ser ajustadas mediante novas inscrições. O programa aponta para percursos que devem passar o mais próximo possível de todas as residências dos alunos inscritos, tendo ainda em consideração a segurança e o conforto das crianças participantes. Fatores como o declive, a existência de rede ciclável segura, o volume esperado e velocidades praticadas de tráfego, entre outros, são tidos em

conta no planeamento de cada linha.

No ano letivo de 2022/2023 estiveram ativas 25 linhas de CB em Lisboa, com um total de 372 circulações, estando prevista uma circulação semanal apenas no percurso casa-escola. O CB de Lisboa registou neste período 240 crianças inscritas (CML, n.d.-b).

Outras cidades

Assinalam-se em outras cidades iniciativas de mobilidade escolar semelhantes ao CB. O primeiro registo corresponde à cidade belga de Brecht e está datado em 1998, admitindo-se que outras iniciativas não formais o tenham precedido. O primeiro manual que compila informação sobre como começar um CB foi publicado em 2001 (Schimenovitz et al., 2003), sendo seguido por outros divulgados em Espanha e nos Estados Unidos, em 2007 (Brown et al., 2007; Simón-i-Mas et al., 2024). Mais recentemente, em 2014, foi implementado o programa *Al colegio en Bici*, em funcionamento até à data, com mais de 140 rotas ativas na cidade de Bogotá, na Colômbia (Honey-Rosés, 2024). Em 2020-2021, houve uma nova vaga de programas implementados, sendo de realçar o *BiciBus*, em Barcelona (Figura 7), que contou com a adesão de cerca de 700 participantes neste período (Garcia, 2022).



Figura 7: *Bicibus*, o programa de CB de Barcelona. Fonte: dscarb

A primeira expansão de um CB aconteceu na Colômbia. Na cidade de Bogotá, o município decidiu desenvolver o programa como uma forma de levar as crianças para a escola. Segundo Simón-i-Mas et al., este é o maior programa municipal de CB funcional até hoje. Durante a mais recente vaga de 2020-21, surgiram os CB de Lisboa, Irlanda, Vic e Barcelona, na Catalunha, entre outros (Figura 8).

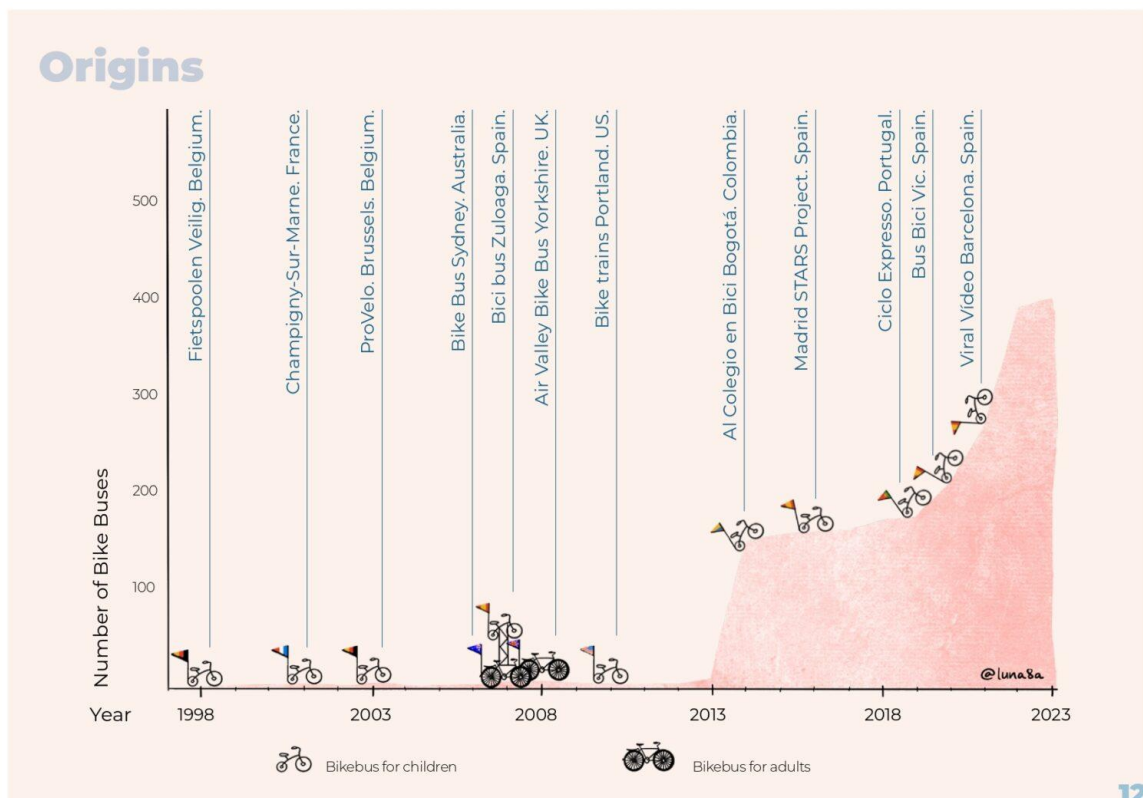


Figura 8: A evolução das iniciativas de Comboios de Bicicleta. Fonte: Simón-i-Mas et al., (2024)

2.4. Estratégia para a mobilidade ativa e sustentável

2.4.1. Estratégia Nacional para a Mobilidade Ativa Ciclável 2030

A Estratégia Nacional para a Mobilidade Ativa Ciclável 2030 (ENMAC) foi definida com o objetivo de dar continuidade à ENMAC 2020-2030, aprovada pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 131/2019, de 2 de agosto. No artigo 14.º foi determinada a criação de uma estratégia homóloga dedicada à componente pedonal, a Estratégia Nacional para a Mobilidade Ativa Pedonal 2030 (ENMAP), aprovada pela Resolução do

Conselho de Ministros n.º 67/2023, de 7 de julho.

A ENMAC tem como visão “Um país «orgulhosamente ativo», onde pedalar é uma atividade segura amplamente praticada, constituindo opção de mobilidade acessível e atrativa, maximizando benefícios para a saúde, economia e emprego, ambiente e cidadania”. Segundo os Censos de 2021 apenas 1% das pessoas se desloca de bicicleta para o trabalho, o que representa uma quota de 10% dentro das cidades. Em 2017, apenas 0,6% da população utilizou a bicicleta como meio de transporte no município de Lisboa (0,5% na Área Metropolitana de Lisboa) e apenas 0,4% no Porto (igualando a percentagem à Área Metropolitana do Porto) (INE, 2018).

A ENMAC definiu então como metas para 2030 a quota modal de viagens em bicicleta de 7,5%. Para concretizar estas metas, foram definidos os seguintes eixos de intervenção:

- Infraestruturas e Intermodalidade: “priorizando a disponibilização de vias adequadas para a circulação pedonal e em bicicleta, especialmente aquelas que permitam uma melhor relação custo-benefício relativamente ao automóvel. Em áreas onde o risco for elevado devem ser adotadas medidas de acalmia de tráfego e onde já existam áreas seguras e confortáveis devem ser analisadas as ligações e os pontos críticos de modo a manter a coesão, perceção de segurança e competitividade da rede”;
- Facilitar a integração com o transporte público, através da autorização de transporte da bicicleta “onde seja justificável”, da criação de estacionamento seguro, de sistemas públicos de bicicletas partilhadas junto de equipamentos e de interfaces de transporte;
- Capacitação e Apoio: Uma das formas de transformar a perceção da bicicleta de um objeto de lazer e desporto para um meio de transporte viável e competitivo é a formação dos cidadãos, especialmente os mais novos, criando um referencial de formação acessíveis no sentido de sensibilizar e capacitar, desde o conhecimento do Código da Estrada, boas práticas e condução de bicicleta. O projeto *Desporto Escolar sobre rodas*, criado pelo Ministério da Educação está em desenvolvimento dentro das escolas. É dinamizado por professores qualificados num trabalho regular e semanal. O modelo pedagógico de âmbito nacional

aplicado é baseado num manual de apoio ao professor e ao técnico qualificado que, prioritariamente, assenta em três pilares: (1) Ensino-aprendizagem *Saber andar de bicicleta*; (2) Educação Rodoviária; (3) Educação para a Cidadania. Dentro deste contexto foram atribuídas bicicletas a 259 estabelecimentos de ensino em 2022.

Referente às formas de apoio foram já criados programas de incentivo à aquisição de bicicletas, acessórios e serviços relacionados. Um exemplo disso é a inclusão da bicicleta no Incentivo pela Introdução no Consumo de Veículos de Emissões Nulas do Fundo Ambiental em 2023. Neste, estão incluídas bicicletas convencionais, elétricas e de carga. Os apoios variam entre os 100 e os 1 500 euros.

Cultura e comportamentos: O último eixo de intervenção complementa os anteriores com o objetivo de mudança de hábitos e perceção da bicicleta não como uma opção secundária ou desprestigiante, mas com valor intrínseco, enaltecendo as suas vantagens para o “bem-estar, flexibilidade, eficiência e fiabilidade”. Esta mudança far-se-á através da promoção da cultura de mobilidade ativa, onde se enquadra por exemplo o projeto internacional *Visão Zero*, que visa eliminar as mortes associadas ao tráfego rodoviário. Finalmente, a estratégia propõe que a mudança de perceção se faça junto de grupos específicos da população: jovens, trabalhadores, estudantes universitários, ciclistas de recreio e desporto e pessoas com mobilidade reduzida, promovendo iniciativas de ativação e experimentação, assim como eventos desportivos acompanhados de campanhas publicitárias de sensibilização.

2.4.2. Estratégia do Município de Lisboa

Em Lisboa, a maior parte das deslocações são realizadas com recurso ao automóvel particular. Segundo dados do Inquérito à Mobilidade 2017, realizado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), as deslocações na AML são predominantemente realizadas de automóvel, como condutor ou passageiro, representado 58,9% do total das deslocações (INE, 2018). Em 2023 foi batido o recorde de veículos a entrar em Lisboa (Andrade, 2018). Face a estes dados, a CML definiu como objetivo da sua visão estratégica para a mobilidade 2030, a inversão desta tendência. Se, em 2017, 58,9% das deslocações eram realizadas em automóvel particular, a meta para 2030 sugere uma redução para 34%. A CML propõe a aposta nos transportes públicos e no aumento da competitividade dos

modos suaves (CML, 2020).

O município também criou em 2020, o seu programa de apoio à aquisição de bicicletas, sendo que, em 2022, passou a limitar-se apenas à aquisição de acessórios e serviços de mecânica nas lojas e oficinas aderentes.

No que diz respeito a investimentos na infraestrutura ciclável, os primeiros troços de ciclovia em Lisboa foram construídos em 2001, tendo a construção de uma rede mais abrangente iniciado apenas em 2009. A partir 2017 houve um maior crescimento da rede ciclável, assim como a implementação do sistema de bicicletas partilhadas GIRA. Atualmente a cidade conta com 173 quilómetros de ciclovia.

Auditoria à rede ciclável existente

Em maio de 2024, a CML anunciou um investimento de 13 milhões de euros para aumentar a rede ciclável em 90 quilómetros. O plano de ação 24-25 para a rede ciclável tem como objetivo redesenhar a rede ciclável ao nível da segurança, do conforto e da funcionalidade. O diagnóstico foi suportado por uma auditoria encomendada à Copenhagenize (Copenhagenize France, 2023), uma consultora dinamarquesa, acompanhada por um inquérito à população realizado pela CML em parceria com esta empresa.

Segundo a auditoria da Copenhagenize, os objetivos ambiciosos de expansão da rede ciclável de Lisboa irão colmatar muitas das lacunas expostas, como a falta de ligações locais de pequena escala entre os principais elementos da rede e áreas da cidade atualmente mal servidas, com pouca ou nenhuma infraestrutura para bicicletas. De acordo com o documento, a data de execução desta empreitada ainda não foi fixada e a estratégia não inclui soluções para algumas áreas da cidade, eixos estruturantes e desenho da infraestrutura. Foram apontadas também falhas na separação entre velocípedes e peões, assim como o limite de velocidade de 50 km/h na grande maioria da rede rodoviária, o que constitui uma velocidade letal em caso de colisão com utentes vulneráveis da estrada. Os cruzamentos também foram salientados como carentes de melhoria, especialmente no que toca à sua segurança.

As universidades e as escolas apresentam uma distribuição distinta em Lisboa. Enquanto as universidades se localizam maioritariamente no centro e no norte, as escolas e creches distribuem-se de forma relativamente uniforme.

No que diz respeito à acessibilidade para as escolas e creches, a rede ciclável tem um desempenho menos bom comparativamente às universidades, sendo que “a distribuição de escolas e infantários que se encontram a mais de 300 m da rede de bicicletas reflete de perto as lacunas de alto nível identificadas na análise da rede.”

As escolas e creches em Benfica, Penha de França, Alcântara e Belém foram identificadas por não terem boas ligações à rede ciclável o que, aliado ao relevo acidentado, dificulta a utilização da bicicleta para as deslocações escolares, especialmente para crianças (Copenhagenize France, 2023).

Bloomberg Initiative for Cycling Infrastructure – BICI

Em junho de 2023, Lisboa foi selecionada para o programa *Bloomberg Initiative for Cycling Infrastructure* (BICI), promovido pela Bloomberg Philanthropies e pela Global Designing Cities Initiative, ao qual se candidataram 275 cidades. A candidatura apoiada pela Agência de Energia e Ambiente de Lisboa, Lisboa E-Nova visa melhorar as ligações escolares através da mobilidade ativa e a conectividade da rede ciclável da cidade. A autarquia prevê reforçar a conectividade em 20 escolas, abrangendo 20 mil estudantes, através de ciclovias protegidas e seguras. O programa BICI garante 400 mil euros de apoio financeiro para a execução deste objetivo (Lisboa Para Pessoas, 2023).

2.5. O uso dos SIG para modelação de rotas para crianças em bicicleta

Os SIG são uma ferramenta frequentemente utilizada para apoio à decisão e planeamento de infraestrutura ciclável. Embora sejam vários os exemplos da sua utilização como ferramenta de visualização e análise espacial, segundo Agyeman et al. (2023) após uma revisão sistemática de 49 publicações, existem poucos estudos de otimização de percursos de crianças em bicicleta para a escola. No entanto, já foram elaboradas várias soluções comerciais e académicas dedicadas à criação de rotas para ciclistas. Entre as comerciais destacam-se o Google Maps, que incorpora em algumas cidades o modo ciclável, bem como Komoot, Bikemap, RideWithGPS, entre outros. Estes últimos utilizam como base o *OpenStreetMap* (OSM) uma base de dados colaborativa que fornece informação da rede viária e ciclovária, bem com as suas características, o que permite criar rotas mais seguras através de ciclovias e vias partilhadas com peões. Estas ferramentas incluem geralmente algumas funcionalidades gratuitas, sendo também

possível adquirir serviços ou subscrições para expandir a sua funcionalidade. Outro exemplo semelhante seria o Openrouteservice (Figura 9), uma plataforma online e uma *Application Programming Interface* (API) de acesso livre que permite criar rotas para vários modos de transporte, incluindo diferentes tipos de ciclismo, utilizando perfis distintos para ciclismo regular, ciclismo de estrada e bicicleta de montanha. Disponibiliza também informações relativas à rota escolhida, tais como o declive, o tipo de superfície, a hierarquia da via e o tempo de deslocação estimado.

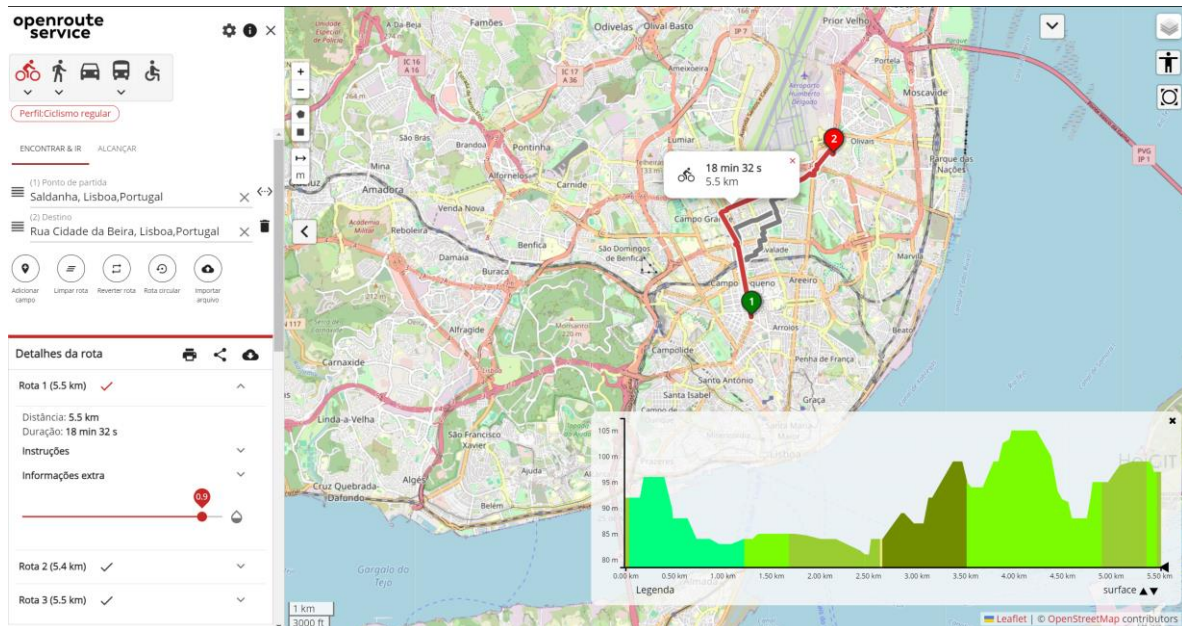


Figura 9: Demonstração da criação de rotas com o openrouteservice

Otimizar a seleção de rotas para ciclistas através dos SIG também é importante no que concerne ao apoio à decisão e planeamento de infraestrutura ciclável. Para tal são utilizadas diversas abordagens, desde a simples oferta de percursos consoante a menor distância ou menor tempo, à Análises Multicritério (AMC) (Derek & Sikora, 2019), método utilizado na Croácia que incluiu variáveis como a distância, o pavimento, o declive, a proximidade a serviços de saúde e a fontes de água, tendo este método utilizado a AMC e o Network Analyst para criar três modelos adaptados para três tipos de utilizador de bicicleta, dependendo dos seus níveis de experiência.

No município de Lisboa recorreu-se a uma metodologia semelhante para a criação do mapa de Potencial Ciclável do Município de Lisboa (PCML), utilizando a densidade populacional como preditor das origens dos utilizadores, os declives, a presença de

ciclovias e Polos Geradores, que representam os destinos dos ciclistas (Amaro & Lino, 2022). Concluiu-se que as áreas de potencial ciclável muito elevado representavam apenas 0,9% da área da rede viária e ciclável, e que a maior parte da rede se encontra numa classe de potencial médio (54,8%). Após o cruzamento do mapa de potencial ciclável com o índice de atropelamentos, calculado com base no índice de sinistralidade e da concentração dos atropelamentos ocorridos em 2013 e 2015 foi possível verificar que 1% dos atropelamentos ocorreram em vias com potencial ciclável muito elevado e 10% em vias de potencial elevado. O valor mais elevado, de 56,6% corresponde à classe de potencial médio, o que reforça a necessidade de expandir a rede ciclável para as vias abrangidas por esta classe.

Lovelace *et al.* (2017) criaram o *Propensity to Cycle Tool* (PCT) (Figura 10) um modelo de potencial ciclável que integra as origens e os destinos dos utilizadores. Utilizaram uma regressão logística para simular o impacto da distância acumulada na probabilidade de adotar o modo ciclável e incluindo também o efeito do declive. Para a criação das rotas usaram como base o planeador de rotas do *CycleStreets*, de forma a criar quatro cenários de potencial ciclável: o cumprimento da meta do governo do aumento da utilização da bicicleta de 3% para 6%; um cenário onde fosse atingida a igualdade de género e que as mulheres tivessem a mesma taxa de utilização da bicicleta que os homens; *Go Dutch*, cenário em que os utilizadores ingleses teriam a mesma probabilidade de adotar o modo ciclável que os holandeses; bicicletas elétricas, como facilitador da transição modal para a bicicleta.

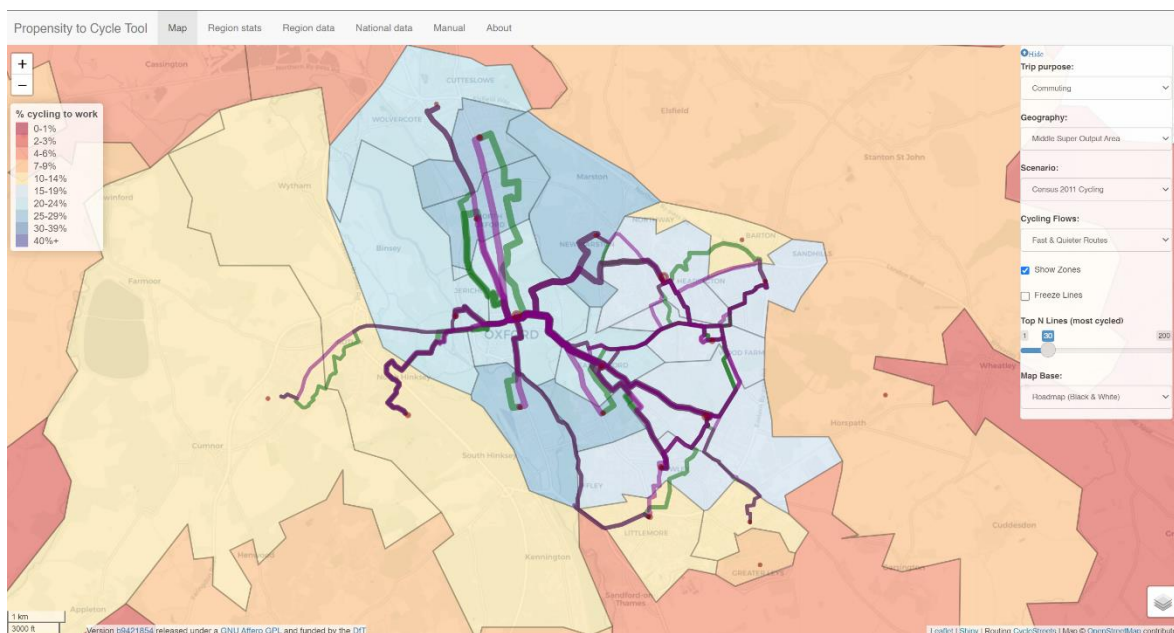


Figura 10: *Propensity to Cycle Tool (PCT)*

Posteriormente, foi desenvolvido o *Cycle Route Uptake and Scenarios Estimation (CRUSE)* (Figura 11), que serviu como uma expansão do PCT que integra a utilização recreativa da bicicleta, incluindo percursos utilizados para viagens em bicicleta e lazer como trilhos e a Eurovelo (Rede europeia de rotas cicláveis de longa distância). Estas ferramentas complementam-se, sendo o PCT mais dedicado à utilização da bicicleta como modo de transporte e o CRUSE abrangendo também o lazer e cicloturismo (Lovelace et al., 2024).

CRUSE: Cycle Route Uptake & Scenario Estimation tool for Ireland

Funded by Transport Infrastructure Ireland. Complete the [feedback survey](#) to help improve the tool.

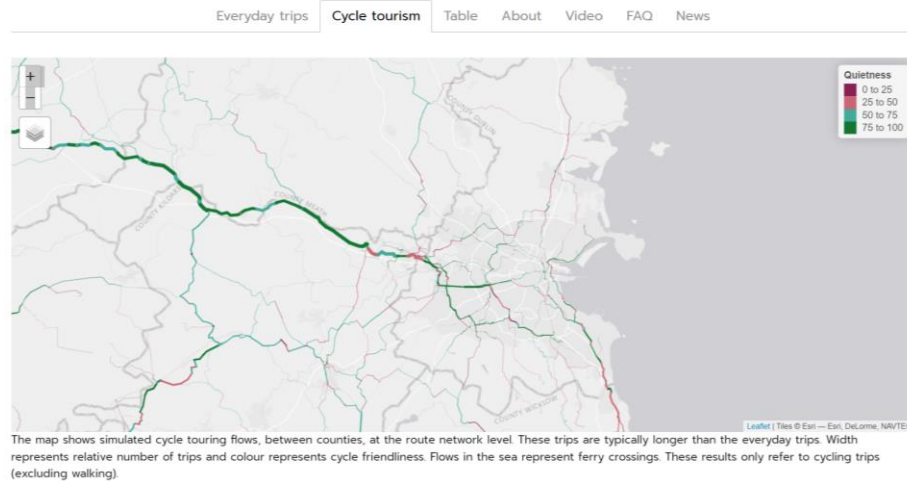


Figura 11: *Cycle Route Uptake and Scenarios Estimation (CRUSE)*

O NPT Scotland (Figura 12) é outra ferramenta baseada no PCT, tendo sido criada para a Escócia. Esta sugere as rotas com maior potencial para as escolas, separando o acesso a escolas primárias e secundárias. Foi criada com o propósito de ser utilizada por decisores políticos e planeadores, incluindo associações e outras organizações locais (Lovelace & Morgan, n.d.). As rotas são criadas com base no nível de tranquilidade (*quietness*) estimado pelo CycleStreets e no declive, não considerando outros aspetos que podem ter impacto na escolha de percursos em bicicleta específicos para crianças.

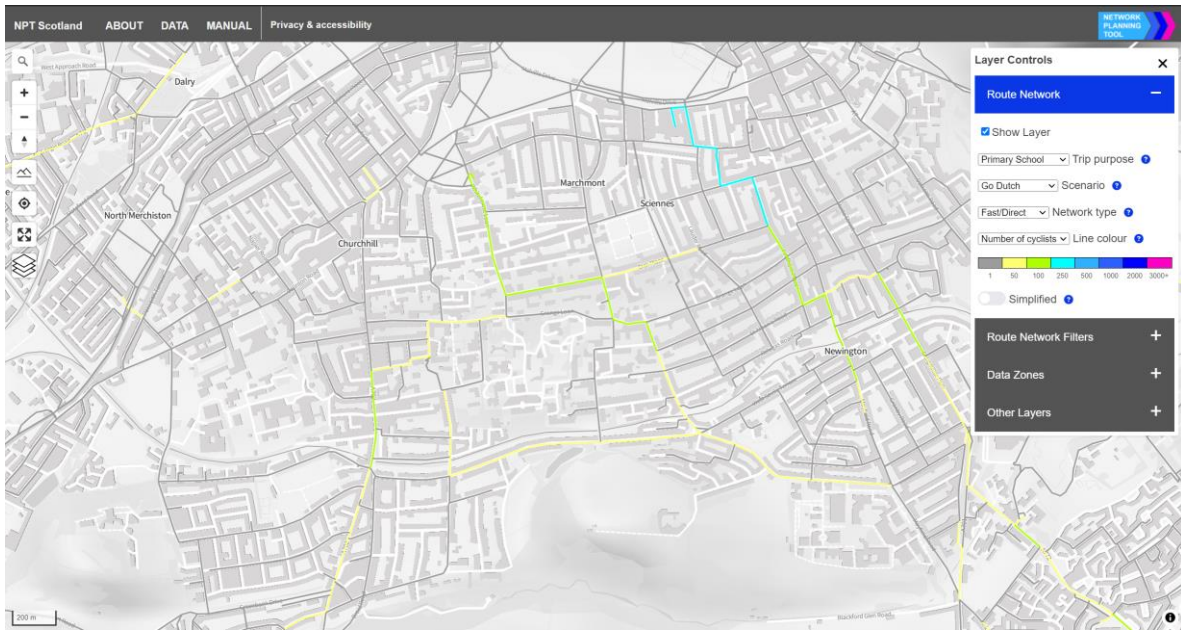


Figura 12: NPT Scotland

Para a Área Metropolitana de Lisboa, R. Félix et al. (2022) criaram o BicláR (Figura 13), uma ferramenta de apoio ao planeamento da rede ciclável. À semelhança dos modelos supramencionados, esta cria cenários distintos de potencial ciclável de acordo com as metas de percentagem da utilização da bicicleta como modo de transporte da ENMAC, incluindo o cenário da adoção de bicicletas elétricas. O biclaR utiliza o r5r (Pereira et al., 2021) como algoritmo de estimativa de percursos em bicicleta, que por sua vez se baseia no nível de stress (Level of Traffic Stress) de 3 e 4, declives, e que pode ser utilizado para estimativas de viagens multi-modais, em que a bicicleta é usada como primeira e última “milha”.

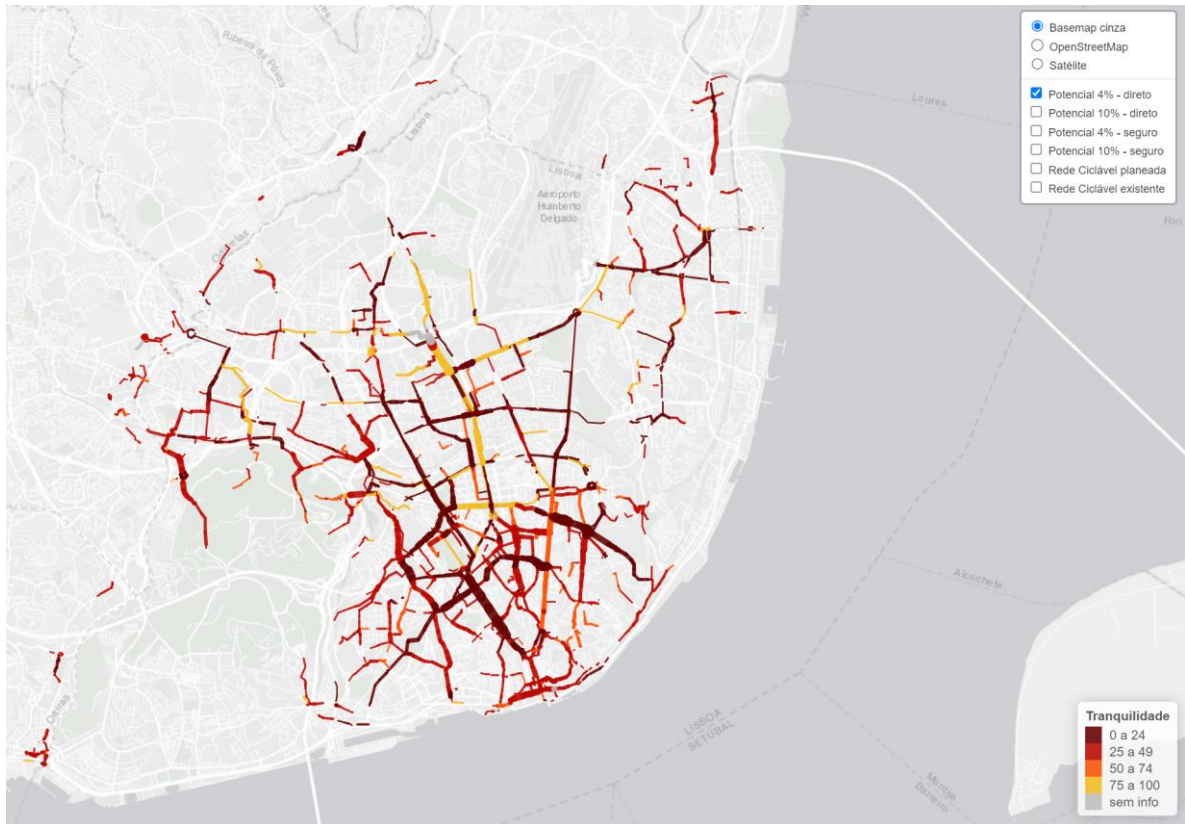


Figura 13: Biclár, as rotas com maior potencial de alteração modal para bicicleta em Lisboa

Nos últimos anos, as cidades têm-se dedicado cada vez mais na promoção dos modos ativos para as deslocações urbanas, com ênfase na segurança dos utilizadores mais vulneráveis. O planeamento de infraestrutura ciclável e a aposta na mobilidade escolar ativa e sustentável apresentam desafios que exigem a utilização de ferramentas analíticas para auxiliar a decisão. O desenvolvimento de ferramentas especificamente dedicadas às crianças que se deslocam a pé e de bicicleta tem sido limitado, com a maioria dos algoritmos existentes criados a pensar nos adultos.

3. Métodos

Neste capítulo é abordada a metodologia adotada para a realização do algoritmo ComSIG apresentada na Figura 14, que foi a seguinte:

1. Seleção do caso de estudo: Escolha das escolas a analisar para aplicar o algoritmo de seleção de rotas;
2. Identificação e classificação dos fatores de custo para a deslocação de crianças em bicicleta;
3. Criação de um modelo de custos ponderados para integração na rede viária e ciclável;
4. Teste de percursos individuais e comparação com um algoritmo baseado na distância mais curta;
5. Aleatorização de origens das viagens para as escolas: aleatorização de pontos num determinado raio da escola;
6. Criação da rede de rotas para a escola através do Network Analyst e sobreposição das mesmas;
7. Validação dos resultados com stakeholders;
8. Replicação do algoritmo para uma outra escola.

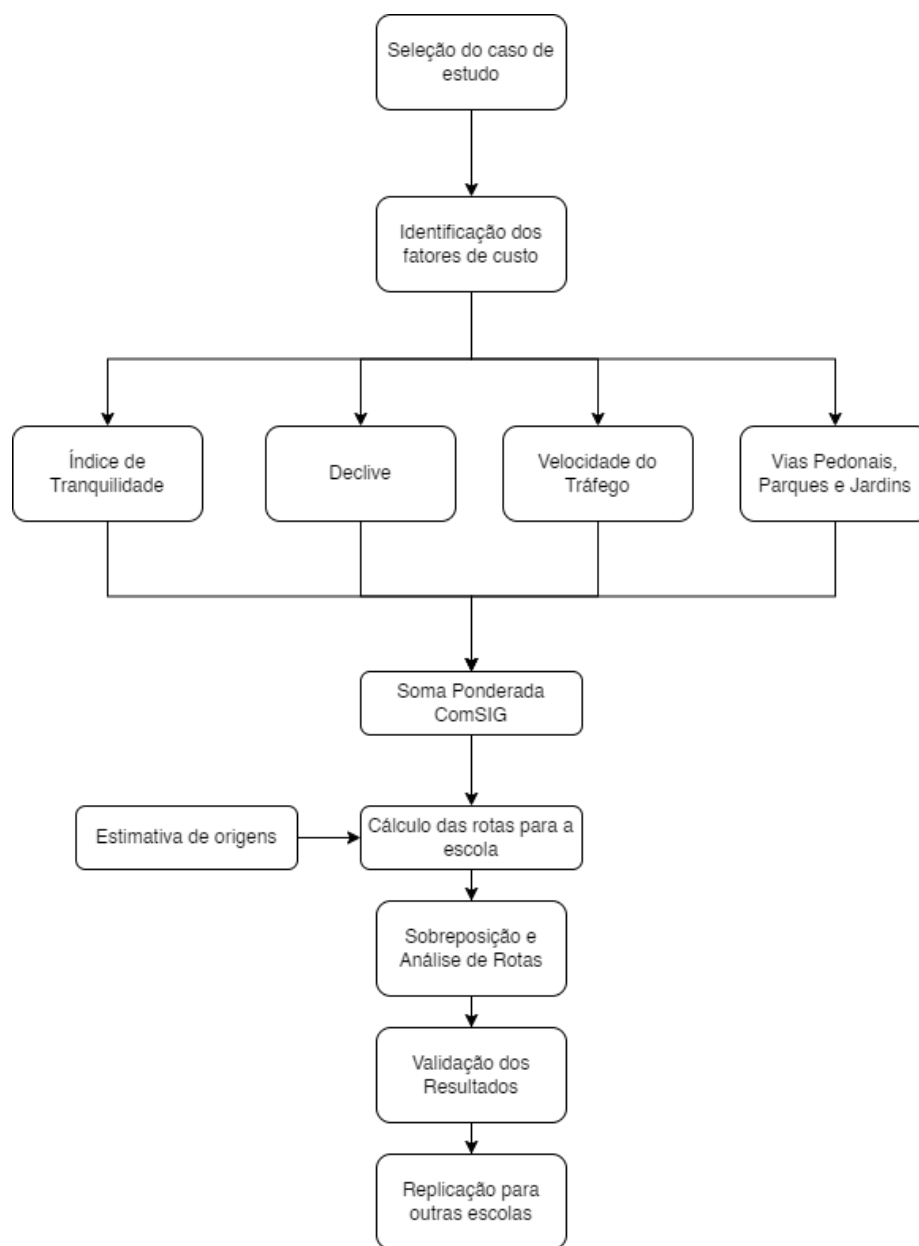


Figura 14: Fluxo metodológico

De seguida apresentam-se, em detalhe, os procedimentos metodológicos bem como as opções tomadas.

3.1. Caso de Estudo ComSIG

A cidade de Lisboa foi escolhida para a realização deste modelo com base no conhecimento local e facilidade de obtenção de dados. Segundo os Censos de 2021, residiam no município de Lisboa 545 796 habitantes, dos quais 71 220 eram crianças dos 0 aos 14 anos. Para a realização das suas deslocações, apenas 0,6% desta população

utilizou a bicicleta como modo de transporte. No caso das crianças do 1.º ciclo, apenas 1,3% se deslocou para a escola por modos ativos (CML, 2022).

Tal como já se referiu, Lisboa é uma cidade relativamente plana, contemplando 75% das vias com declive inferior a 5% (R. M. Félix, 2012) e o declive é alvo de ponderação na seleção de rotas para bicicleta. Todavia, a segurança é apresentada pelos utilizadores como um fator mais relevante. À luz destes pressupostos, devem ser tomadas medidas de atenuação de tráfego e a rede ciclável deve ser consolidada. Totalizando 173 quilómetros de ciclovias e vias partilhadas (Correia, 2024), a cidade apresenta, no entanto, algumas lacunas que dificultam a transição para o modo ciclável, nomeadamente a falta de ligação entre os principais elementos da rede, áreas mal servidas da cidade e falta de segregação entre a rede viária e a ciclável (Copenhagense France, 2023).

Na demonstração do algoritmo ComSIG para a criação de rotas adequadas ao acesso de crianças em bicicleta à escola, observa-se a Escola Básica de Telheiras, localizada na Freguesia do Lumiar, Lisboa, selecionada por estar abrangida pelo programa municipal de CB. Segundo os Censos 2021, no município de Lisboa, esta é a freguesia que registou o maior número de crianças a habitar: 6 790 crianças dos 0 aos 14 anos, correspondendo a 15% da população residente na freguesia.

3.2. Dados

3.2.1. Localização de escolas e alunos

A Escola Básica de Telheiras, uma escola de 1º ciclo que abrange alunos do 1º ao 4º ano, tem 604 alunos inscritos (DGEEC, 2024). A localização da escola foi obtida a partir da plataforma de dados abertos da CML, Lisboa Aberta. As origens dos alunos foram aleatorizadas utilizando um raio máximo de três quilómetros, através de uma função que cria exponencialmente mais pontos na proximidade da escola, simulando uma situação em que a maioria dos alunos reside em maior proximidade da escola (Silva, 2024) (Anexo 8). Para cada ponto, esta função seleciona primeiramente um ângulo aleatório. Tendo em consideração uma distância máxima de três quilómetros, cria o ponto, privilegiando a proximidade com a escola, através da proporcionalidade inversa da distância à escola. Finalmente, repete esta operação até ter sido criado o número de pontos pretendido.

3.2.2. Rede viária e ciclável

Para a preparação da rede viária do *OpenStreetMap*, foi utilizado o *software* R (R Core Team, 2024). Utilizando a metodologia descrita em (GitHub - U-Shift/Declives-RedeViaria: Mapas Com Os Declives de Uma Rede Viária, n.d.). Foi preparada a rede viária do município de Lisboa (Figura 15), tendo sido criada uma faixa de 100 metros para garantir que as vias próximas dos limites administrativos seriam incluídas na modelação. Seguidamente a rede foi filtrada para excluir vias onde a circulação de bicicleta não é permitida, como autoestradas, mantendo os caminhos pedonais, uma vez que neles é permitida a circulação de crianças até aos 10 anos. Foram também excluídos os segmentos de rede que estavam desconectados (Anexo 1), de forma a garantir que a rede estaria integralmente ligada entre si, assim como os segmentos que não tivessem tipologia definida, uma vez que isto impossibilita a integração do Índice de Tranquilidade (Anexo 2 e Anexo 3). O script R utilizado para a importação e limpeza da rede encontra-se no Anexo 6.



Figura 15: Rede viária e ciclável do município de Lisboa

3.3. Algoritmo identificador de percursos em bicicleta para as escolas

3.3.1. Atributos dos arcos

No processo de decisão de rotas para crianças em bicicleta há vários aspetos que devem ser ponderados. A distância do percurso, o declive e a segurança são alguns dos fatores a ter em consideração. Para poder incluir estas variáveis numa análise de redes, foi necessário escolher diferentes fontes de informação, integrá-las em cada arco e atribuir fatores de peso e ponderações, de forma a que o planeador escolhesse o percurso casa-escola mais adequado para as crianças. Assim, para este estudo, foram escolhidos os seguintes fatores: declive, índice de tranquilidade, velocidade do tráfego e existência de vias pedonais. Os atributos dos arcos estão valorados numa escala de 1 a 10.

Declives

Na integração dos declives foi considerado necessário partir a rede nos seus segmentos internos. Isto significa, por exemplo, segmentar uma estrada nas suas interseções, garantindo que seriam preservadas intactas as interseções entre túneis e pontes (Anexo 4). Esta operação permite que haja uma maior granularidade na análise de distâncias, o que é particularmente importante para que o declive de cada segmento seja o mais próximo possível da realidade.

Foi utilizado um Modelo Digital de Terreno (MDT) com uma resolução espacial de 10 m disponibilizado pelo Instituto Superior Técnico. Através da sobreposição do MDT com a rede viária, foi realizado o cálculo do declive em percentagem extraíndo os valores de elevação do MDT nos segmentos de estrada e, seguidamente, calculando a diferença de elevação entre os pontos dividida pela distância entre esses pontos. Estes declives foram seguidamente divididos em cinco classes: 0-3: “plano”; 3-5: “leve”; 5-8: “médio”; 8-10: “exigente”; “10-20: terrível”; >20: “impossível” (Figura 16 e Figura 17).



Figura 16: Declives da rede viária de Lisboa

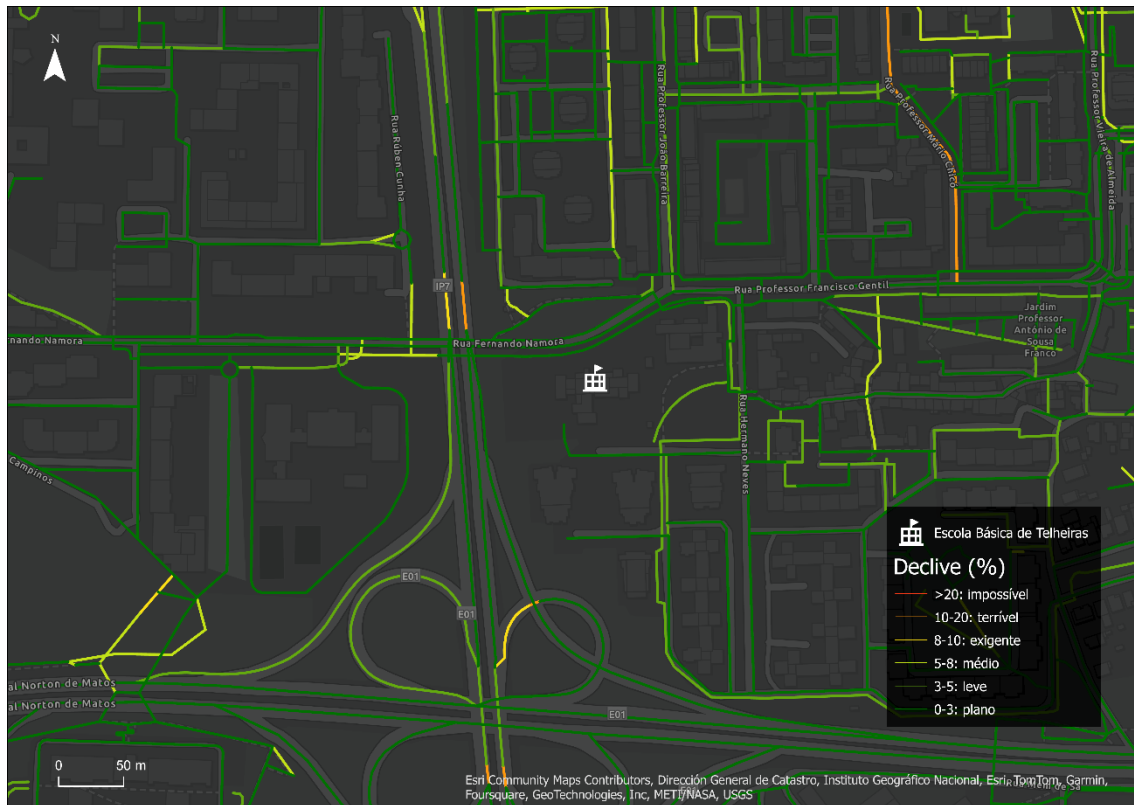


Figura 17: Declives da rede viária na envolvente da Escola Básica de Telheiras

Embora esta classificação tornasse viável a integração dos declives como fator de custo no modelo, decidiu-se utilizar uma métrica que associasse também o comprimento dos segmentos face ao declive. Isto porque no processo de decisão de rota, se a alternativa a uma rua declivosa for percorrer uma grande distância, haverá sempre uma ponderação entre uma pequena subida ou um grande desvio. Assim, utilizando um conjunto de condições foi avaliado o esforço físico necessário para cada segmento ao longo de um declive (d) e comprimento do segmento (c). Com base nestas condições, e utilizando o método “*Speed-Slope Factor*” (R. Félix, 2021) foi calculado o fator de custo do declive $CustoD$, apresentado nas seguintes fórmulas:

$$g(d, c) = \begin{cases} 4 & \text{se } 10 < d \leq 13 \wedge c > 15 \\ 4.5 & \text{se } 8 < d \leq 10 \wedge c > 30 \\ 5 & \text{se } 5 < d \leq 8 \wedge c > 60 \\ 6 & \text{se } 3 < d \leq 5 \wedge c > 120 \\ 7 & \text{outros} \end{cases}$$

Equação 1: Função g , dependente do declive (d), em percentagem e comprimento dos segmentos (c), em m

$$f_{CustoD}(d, g) = \begin{cases} 1.5, & \text{se } d < -30 \\ 1 + 2 \cdot \frac{0.7}{13} \cdot d + \frac{0.7}{13^2} \cdot d^2, & \text{se } -30 \leq d < 0 \\ 1 + \left(\frac{d}{g}\right)^2, & \text{se } 0 \leq d \leq 20 \\ 10, & \text{se } d > 20 \end{cases}$$

Equação 2: $CustoD$, dependente da função g e do declive (d)

Índice de Tranquilidade

O Índice de Tranquilidade é um indicador estimado pelo *CycleStreets* (*CycleStreets*, n.d.) (Figura 19 e Figura 20), uma plataforma para planear rotas de bicicleta criada no Reino Unido, concebido para incluir as necessidades dos ciclistas menos experientes, com base na informação do *OpenStreetMap*. Considera os seguintes fatores (quando disponíveis): hierarquização das vias, declives, existência e qualidade da infraestrutura

ciclável, sinalização e iluminação, entre outros. Varia numa escala de 0 a 100, do menos seguro para o mais tranquilo. Uma pontuação de 100 corresponde a pistas cicláveis e percursos pedestres, fora das principais vias de comunicação (*CycleStreets* » *Help and Documentation*, n.d.).

Esta variável foi integrada como fator de custo de forma a que o algoritmo desse preferência a rotas mais tranquilas e seguras. Foi criado um *CustoT* que penalizasse os segmentos com um menor índice de tranquilidade (*i*) através da definições de valores, posteriormente ajustados a uma regressão linear logística (Figura 18), apresentada na seguinte fórmula:

$$CustoT = 9,4409e^{-0,023i}$$

Equação 3: *CustoT*, relativo ao Índice de Tranquilidade

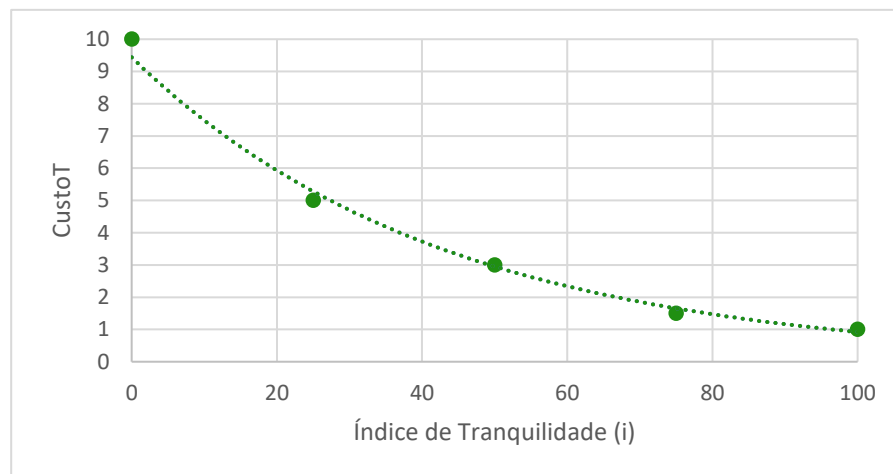


Figura 18: Fator *CustoT*, uma variável contínua

Na ausência de literatura que demonstre a relação entre a tranquilidade e o critério de seleção de rotas para crianças, o ajuste foi baseado em valores atribuídos pressupondo que valores de tranquilidade mais reduzidos teriam de ser exponencialmente penalizados.

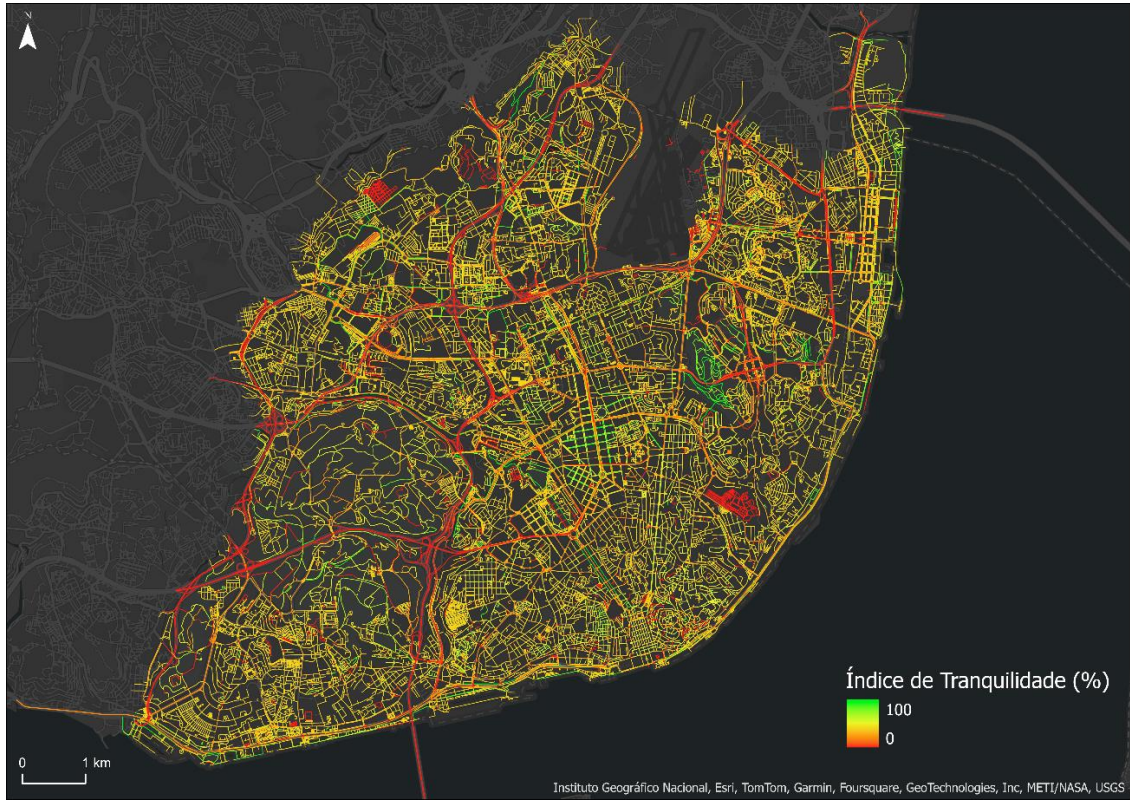


Figura 19: Índice de tranquilidade no concelho de Lisboa



Figura 20: Índice de tranquilidade na envolvente da Escola Básica de Telheiras

Velocidade do tráfego

A velocidade do tráfego em cada segmento foi considerada como outro fator de custo (Figura 21 e Figura 22). Quanto maior a velocidade maior é a probabilidade de mortalidade no caso de colisão e, por sua vez, menos segura é uma via. De acordo com a velocidade máxima permitida em cada rua, informação retirada do OSM, valores que estão compreendidos entre os 40 e os 120 km/h. Foi então criado um fator *CustoV* que penalizasse todas as vias onde a velocidade fosse superior a 50 km/h, o limite máximo de velocidade dentro de localidades.

$$f(v) = \begin{cases} 10, & \text{se } v > 50 \\ 1, & \text{se } v \leq 50 \end{cases}$$

Equação 4. Fator *CustoV*, uma variável discreta

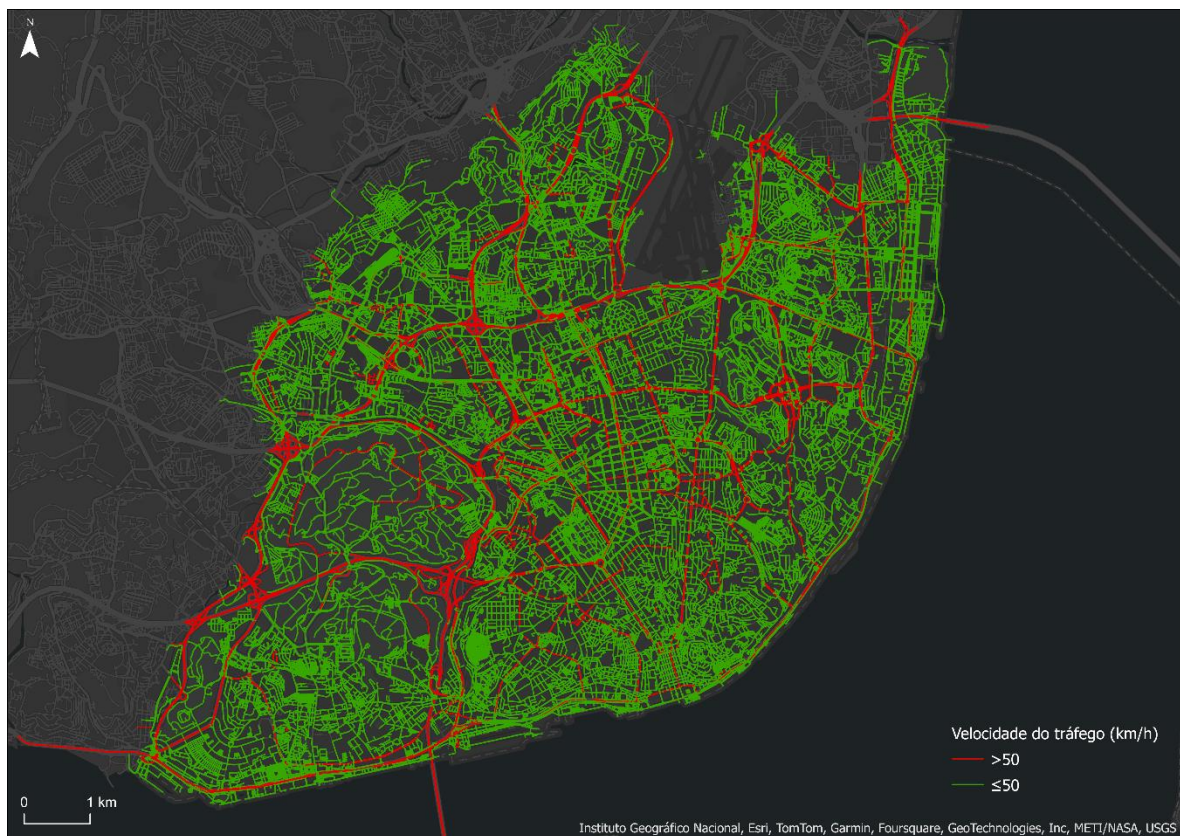


Figura 21: Velocidade do tráfego em Lisboa

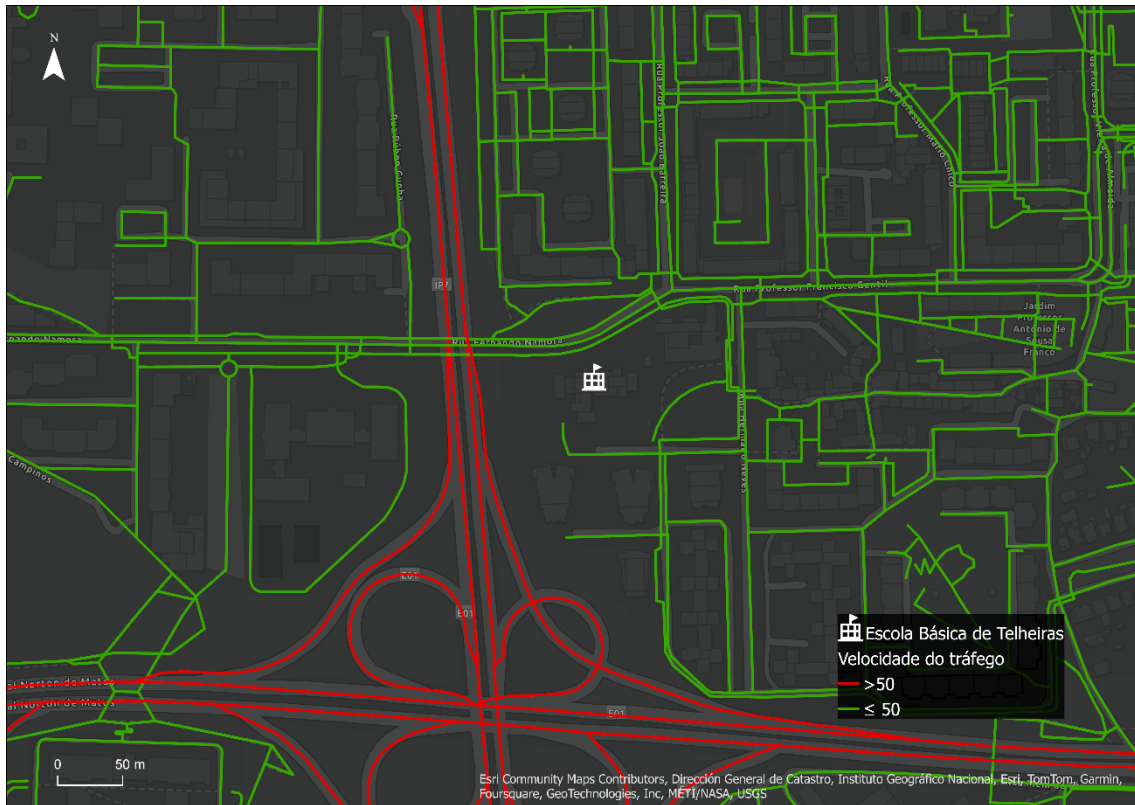


Figura 22: Velocidade do tráfego na envolvente da Escola Básica de Telheiras

Vias pedonais, parques e jardins

Geralmente, no planeamento de rotas para ciclistas, só se considera a travessia de parques e jardins que contenham ciclovias ou vias partilhadas com o peão. No entanto, uma vez que as crianças até aos 10 anos podem circular de bicicleta no passeio¹ e que, em certos casos, pode ser a opção mais segura, foi criado um fator de custo para encorajar a seleção de rotas por dentro de parques e jardins. Este fator foi criado após serem testados alguns percursos nas redondezas de parques e jardins e de ser observado que o algoritmo não considerava os caminhos pedonais suficientemente atrativos. Assim, foram selecionados os segmentos com a designação *footway* do OSM e criado o fator *CustoF*, que atribui um peso de 1 a segmentos que sejam *footway* (Figura 23 e Figura 24) e 10 aos restantes, como apresentado na seguinte fórmula:

¹ Artigo 17º, alínea 3 do Código da Estrada Decreto-Lei n.º 113/2008 de 1 de Julho

$$CustoF = \begin{cases} 1, & \text{se } highway = footway \\ 10, & \text{outros} \end{cases}$$

Equação 5: Fator CustoF, uma variável discreta

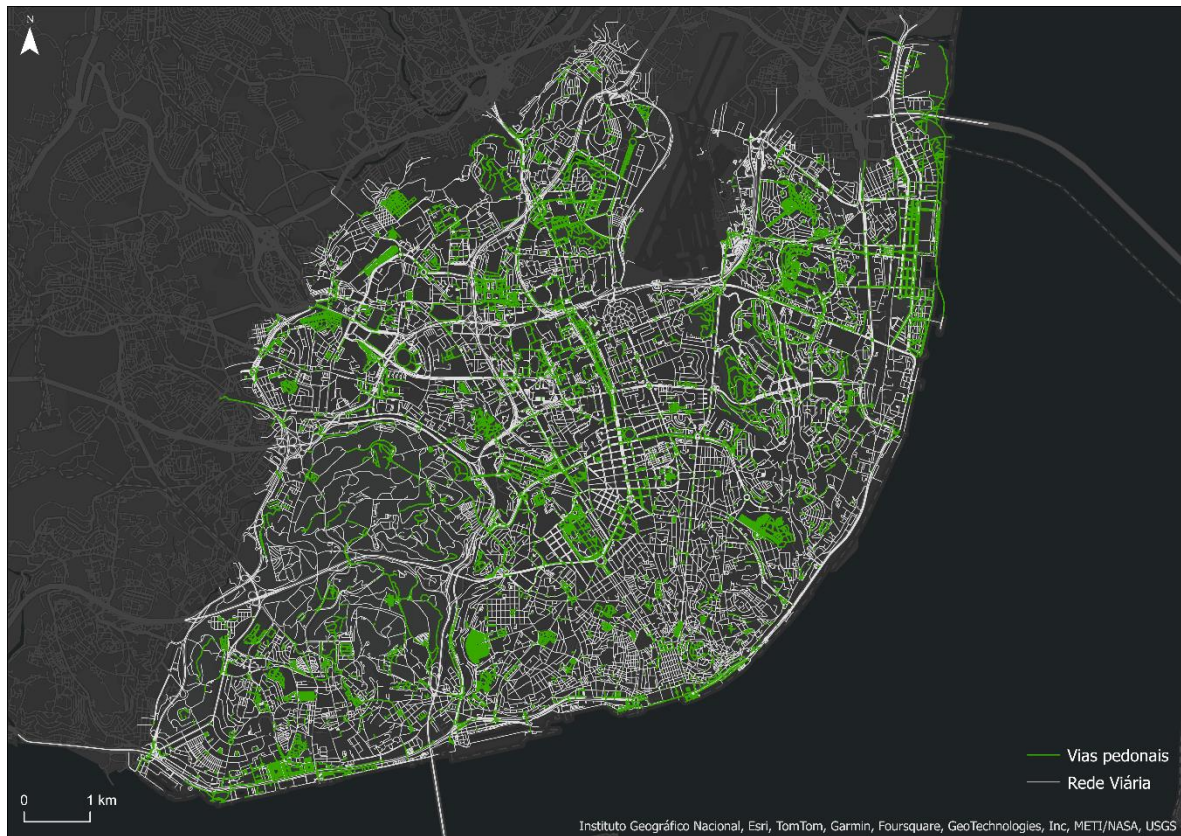


Figura 23: Vias pedonais em Lisboa

representa o custo maior ou menor que o percurso estimado tem em relação ao custo base (apenas a distância), o caminho mais curto. O script em R para o cálculo do custo total é apresentado no Anexo 7.

3.4. Planeador de rotas adequadas a crianças

Utilizando a extensão *Network Analyst* do ArcgisPro foi estimada a rede viária com os fatores de custo. O custo final foi multiplicado pelo comprimento dos segmentos para ser depois introduzido como fator de custo no parâmetro “distância” do *Network Analyst* tornando possível criar rotas individuais. Definindo um ponto de origem e um de destino, o algoritmo, doravante denominado ComSIG, sugere o percurso mais adequado a crianças em bicicleta, resultando no caminho de menor custo, segundo o algoritmo de Dijkstra (Dijkstra, 1959).

3.5. Rede ciclável para a escola

Através do algoritmo ComSIG, é possível criar rotas individuais para qualquer par de origens e destinos, tendo em consideração os aspetos que são mais importantes para a seleção de rotas para crianças.

No seguimento desta metodologia é possível replicar a criação de rotas para toda a população estudantil de uma escola. Deste modo é possível aferir quais os potenciais percursos que os alunos dessa escola utilizarão para fazer o trajeto para a escola em bicicleta.

Para obter os percursos de todos os alunos para a escola, foi utilizado o método de análise “*closest facility*”. Este permite que sejam definidas várias origens e destinos. Neste caso foi definido apenas um destino, a escola (Escola Básica de Telheiras), e o número de origens correspondente aos alunos inscritos nessa escola (604).

Não havendo literatura portuguesa que concretize a distância aceitável para uma criança percorrer em bicicleta e tendo sido considerado que as crianças circulam a uma média de 10 km/h e pressupondo um tempo de deslocação inferior a 30 minutos, segundo a referência máxima do modo pedonal, consideraram-se cicláveis os percursos cuja distância fosse inferior a 5 km. Esta é também a distância máxima percorrida por um CB em Lisboa, que corresponde à linha que serve a Escola Básica Quinta dos Frades, em Telheiras. Foram então eliminadas 68 rotas que não cumpriam este critério.

Os percursos individuais criados foram depois sobrepostos, tendo sido usada a função `overlay` do pacote `R stplanr` (Lovelace & Ellison, 2018) que soma atributos das rotas que se sobrepõem, gerando um novo atributo que reflete o número de percursos sobrepostos (Figura 25) (Anexo 9). Foi assim possível avaliar onde diferentes percursos convergem e quais são as rotas mais utilizadas pelas crianças que se deslocam para a escola em bicicleta, gerando uma rede agregadora destes percursos, que conflui num destino – a escola.



Figura 25: Sobreposição dos percursos para a EB1 Telheiras desde as residências dos alunos, gerando uma rede

3.6. Validação

De forma a validar o algoritmo ComSIG, foi conduzida uma entrevista a um elemento da cooperativa Bicicultura (A. Dias, comunicação pessoal, 21 de agosto de 2024). Dr. André Dias é Gestor de Projeto do programa Cicloexpresso, coordenador de linha e maquinista dos CB de Lisboa. O objetivo desta conversa era a validação das rotas sugeridas pelo algoritmo. Foram apresentadas 3 rotas entre pontos sugeridos pelo *stakeholder*.

3.7. Replicação para outras escolas

A metodologia de criação de rotas para uma escola foi replicada para aferir as diferenças de seleção de rotas em diferentes áreas da cidade. A escola escolhida para a replicação do algoritmo foi a Escola Básica do Bairro de São Miguel, pela sua proximidade a eixos estruturantes como a Avenida da República, que apresenta uma ciclovia bidirecional numa área central da cidade, assim como a rede de vias partilhadas (30+bici) do Campo Pequeno. A escola também é abrangida pelo programa de CB de Lisboa.

4. Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados da criação do algoritmo ComSIG.

Como algoritmo de criação de rotas para crianças em bicicleta, o ComSIG permite planejar um percurso mais acessível e seguro para qualquer origem e destino. Este possibilita também a criação simultânea de percursos a partir de um destino e de múltiplas origens.

Para aferir as diferenças entre as rotas criadas pelo ComSIG e as criadas por um algoritmo tradicional, baseado apenas no fator distância, foi realizado um estudo comparativo. Foram testados três pares de origens e destinos, de modo a comparar a criação de rotas pelo algoritmo ComSIG com um algoritmo tradicional, baseado apenas na distância mais curta. De modo a facilitar a visualização dos fatores de custo que influenciam a escolha de rotas, foram representados os fatores de custo nas rotas do ComSIG e do algoritmo tradicional.

A rota criada nas Avenidas Novas (Figura 26 a Figura 29) é principalmente influenciada pelo fator tranquilidade, uma vez que o declive é relativamente semelhante para ambas as rotas. A velocidade do tráfego é inferior a 50km/h em ambas as rotas, logo também não é um fator que influencia a escolha da rota.

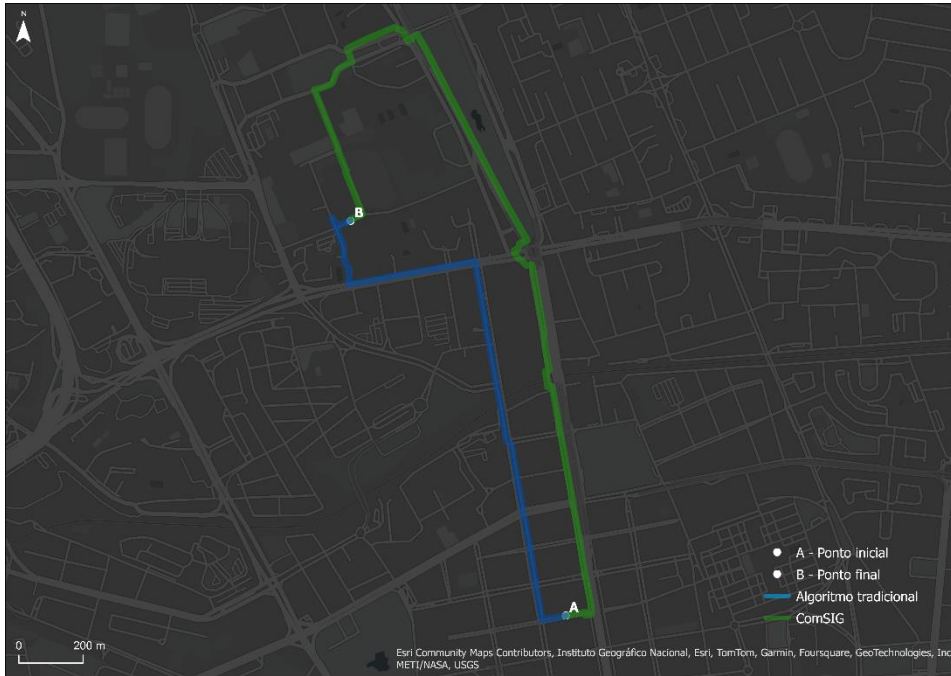


Figura 26: Rotas de teste criadas para as Avenidas Novas

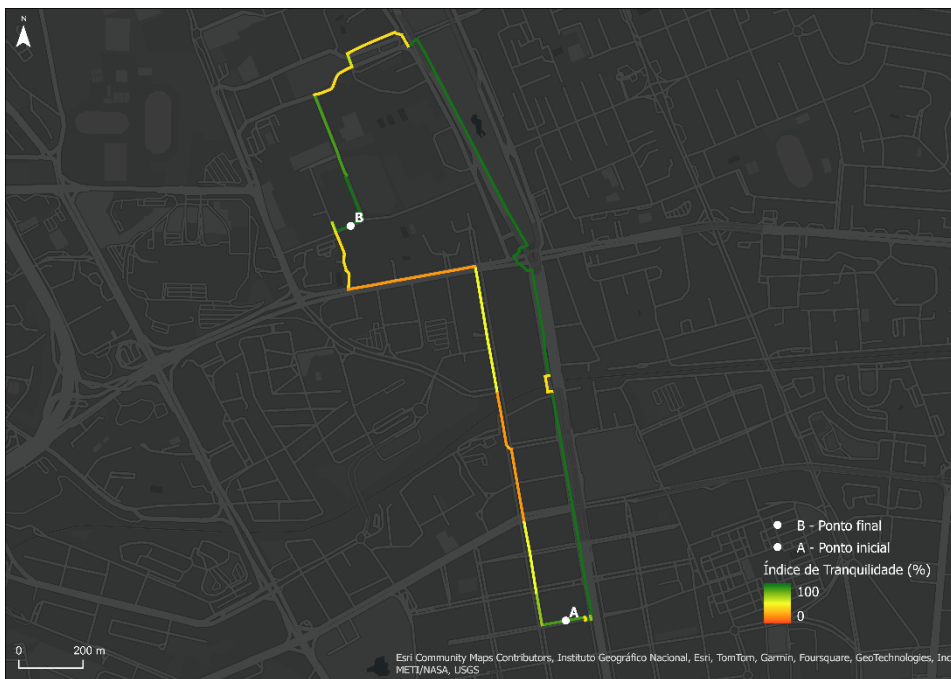


Figura 27: Índice de tranquilidade das rotas das Avenidas Novas

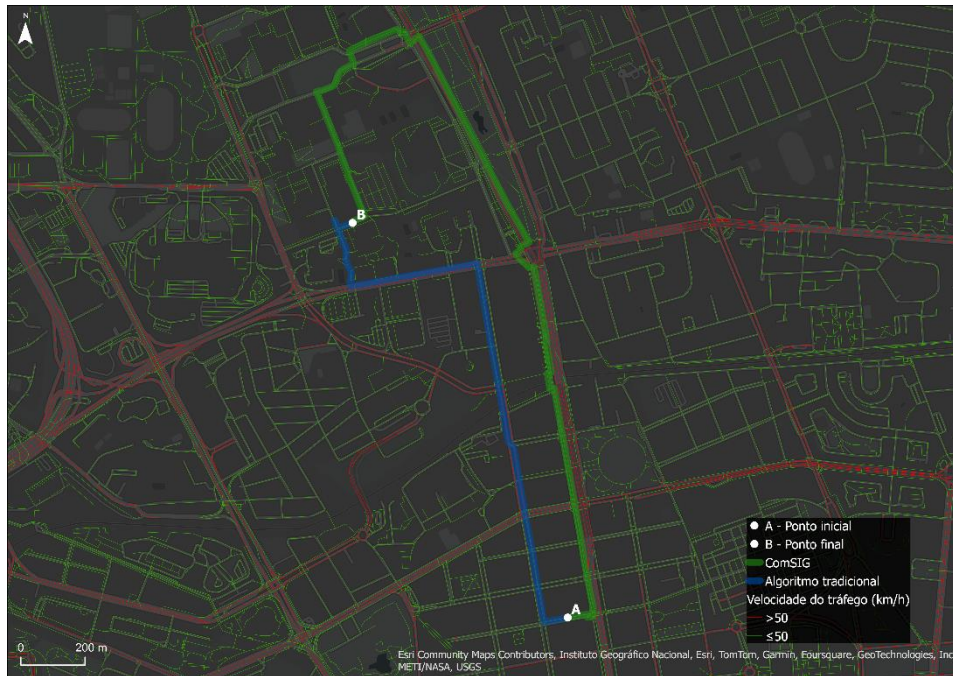


Figura 28: Velocidade do tráfego na envolvente das rotas das Avenidas Novas

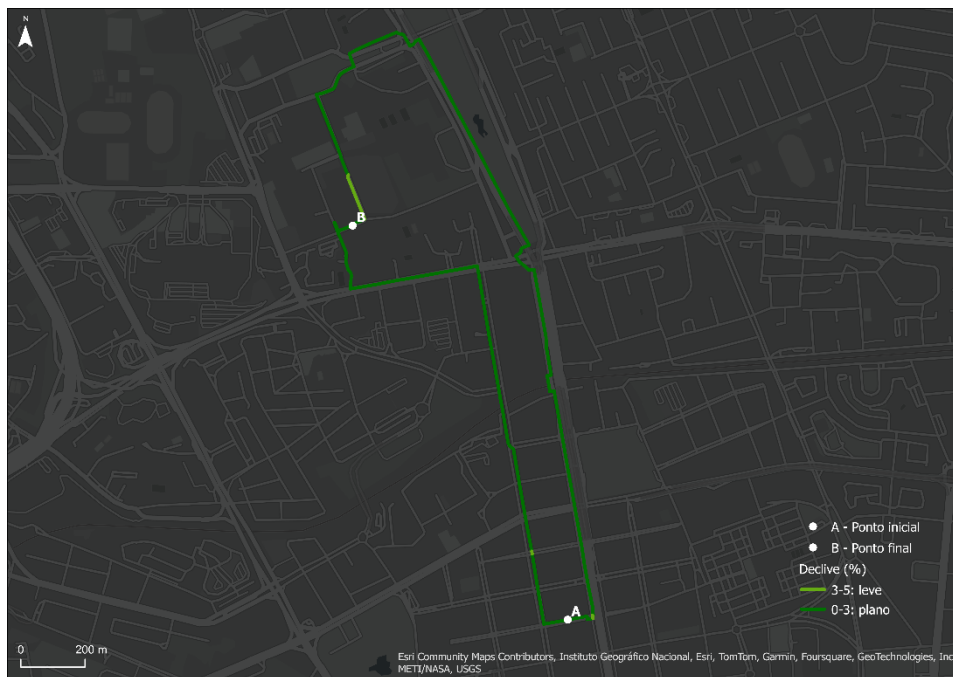


Figura 29: Declive das Rotas das Avenidas Novas

Outra rota criada na proximidade do parque da Bela Vista (Figura 30 a Figura 33) demonstra a importância do fator declive cumulativo. Embora a rota criada pelo algoritmo tradicional atravessasse o parque e por isso seja mais tranquila, o declive mais acentuado

significa um maior esforço por parte da criança, especialmente no segmento com declive entre 8 e 10%. Nesta situação seria provável que a criança levasse a bicicleta pela mão, o que é pouco desejável. Assim, a rota criada pelo ComSIG, embora apresente menor tranquilidade, poderá ser uma alternativa viável, uma vez que sugere a circulação no passeio. Esta rota evidencia a ausência de infraestrutura ciclável nesta área (Anexo 5), sendo que a norte do ponto final já existe uma ciclovia segregada, bastaria expandi-la para garantir a segurança no setor final desta rota.

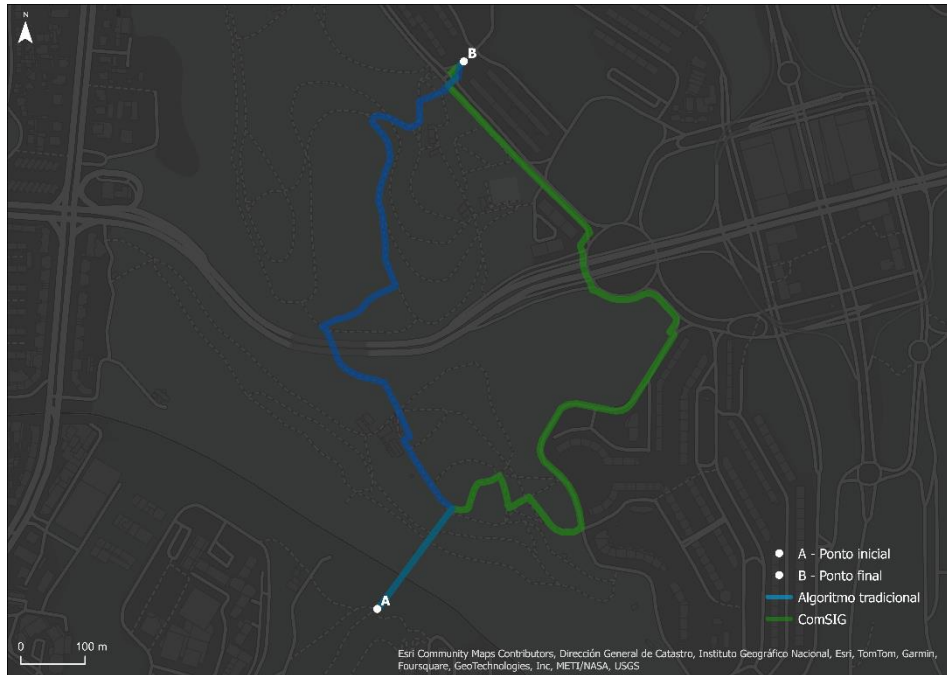


Figura 30: Rotas de teste criadas para o parque da Bela Vista

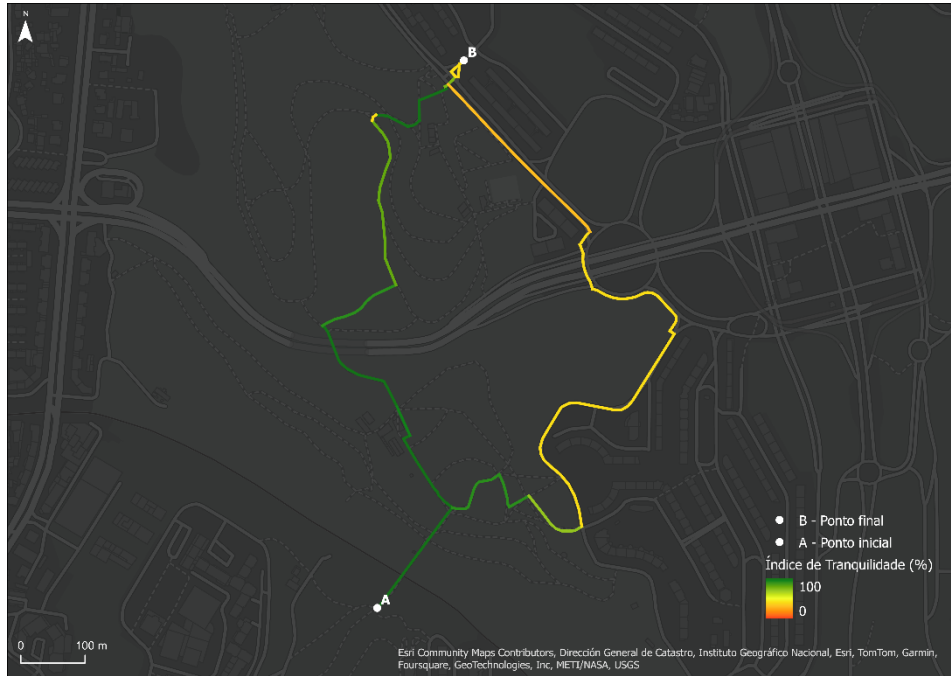


Figura 31: Índice de tranquilidade das rotas do parque da Bela Vista

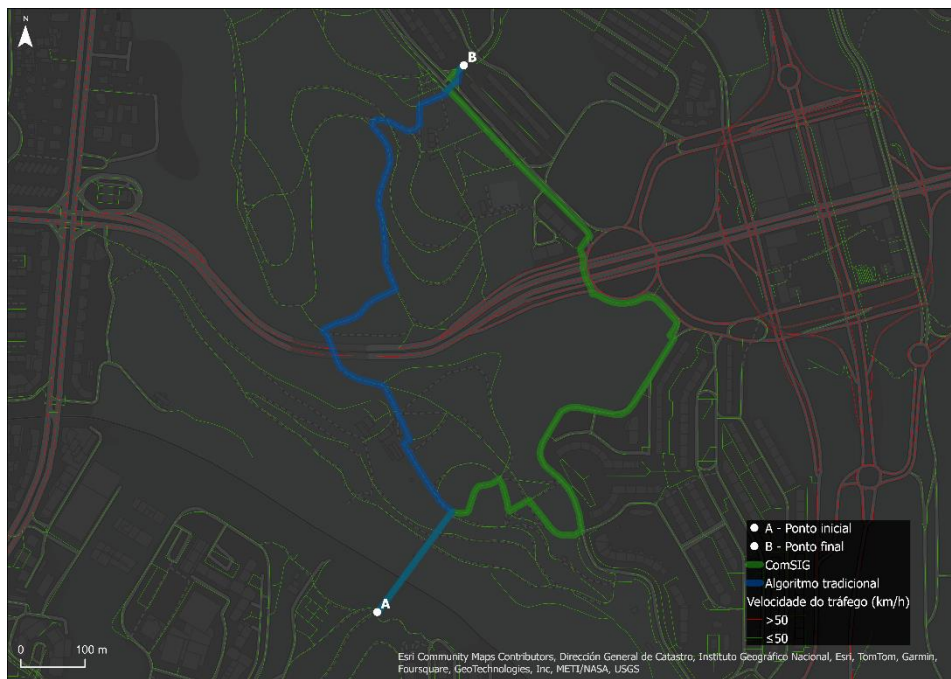


Figura 32: Velocidade do tráfego na envolvente do parque da Bela Vista

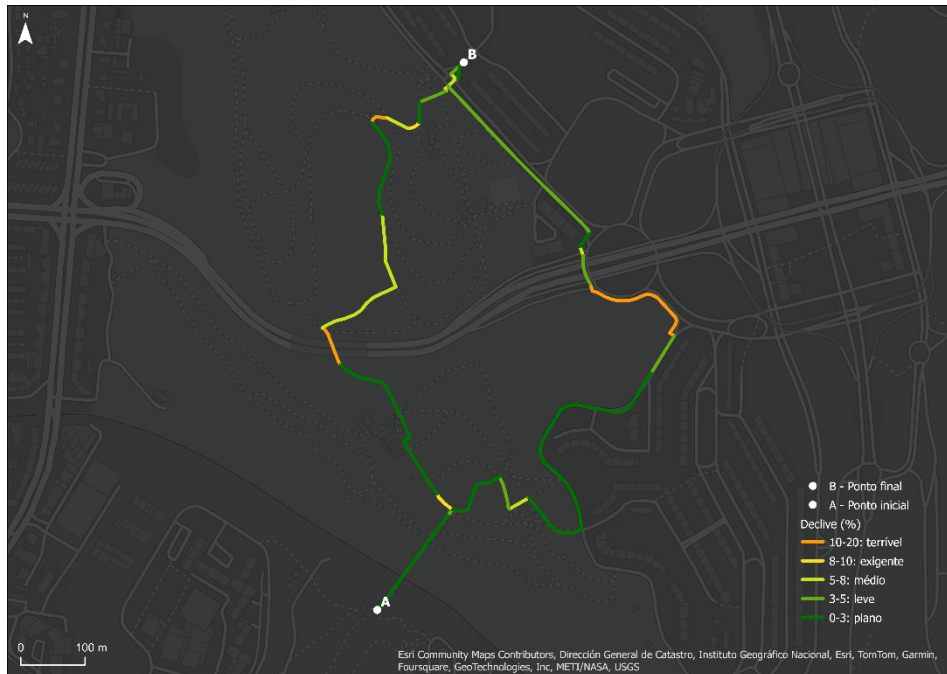


Figura 33: Declive das rotas do parque da Bela Vista

A última rota a ser testada foi sugerida pelo Gestor do Programa de CB de Lisboa e situa-se nos Olivais (Figura 34 a Figura 37). A rota escolhida pelo algoritmo tradicional é mais curta, no entanto menos tranquila. A rota selecionada pelo ComSIG inclui um segmento no passeio (embora também haja uma ciclovia separada por pilaretes de plástico paralelamente a este passeio) e um troço da ciclovia da Av. Marechal Gomes da Costa, que tem uma barreira de cimento a segregá-la. Esta rota também apresenta um declive mais favorável ao longo de todo o percurso. É de notar que embora a circulação automóvel seja mais intensa nas estradas adjacentes ao percurso escolhido, pelo facto de haver uma boa separação entre a estrada e a ciclovia, o percurso é provavelmente o mais seguro.

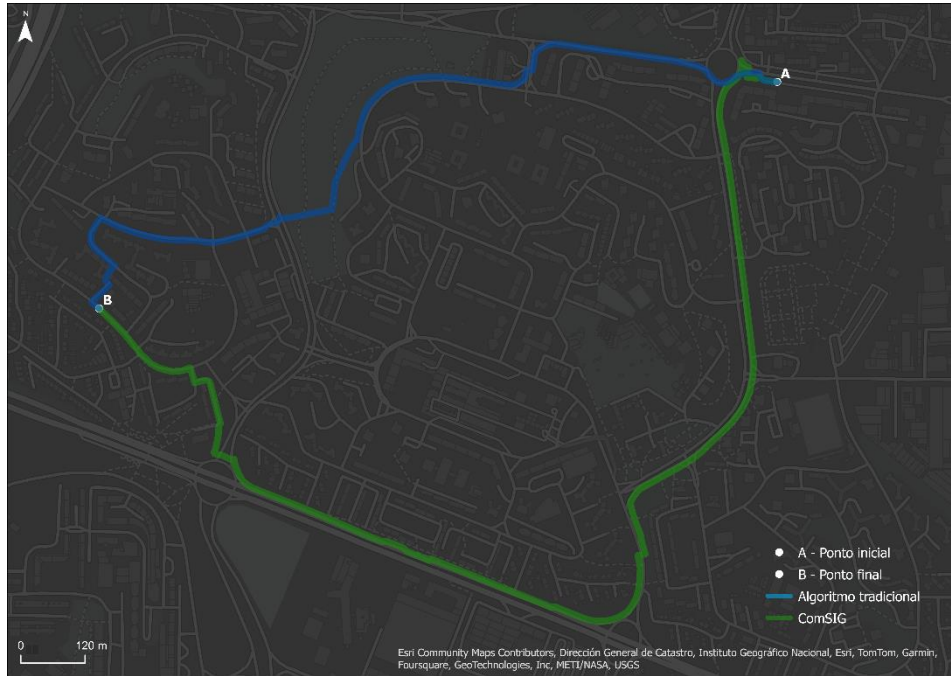


Figura 34: Rotas de teste criadas para os Olivais

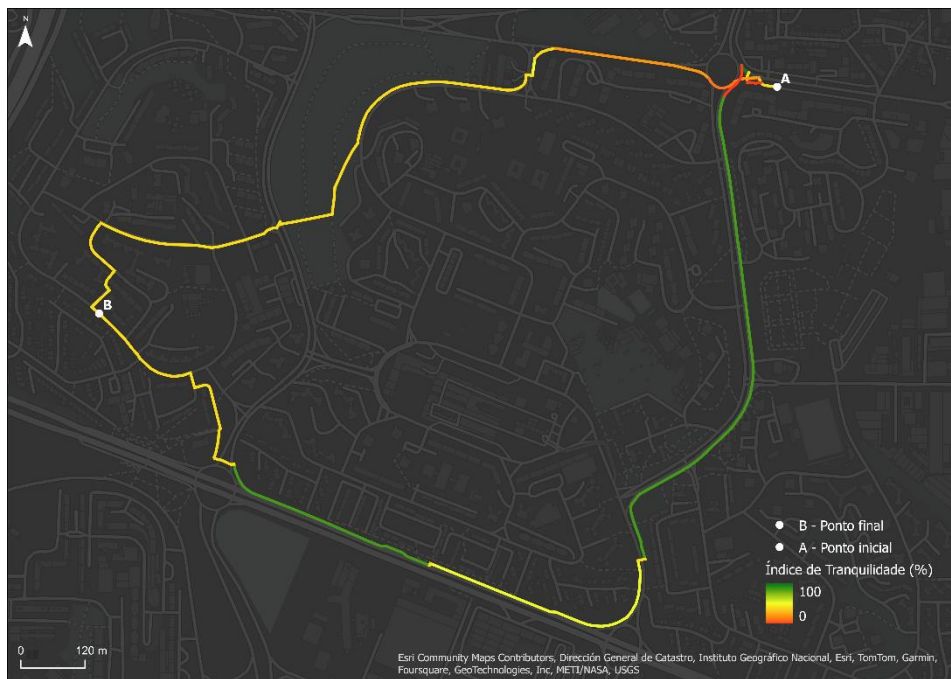


Figura 35: Índice de tranquilidade das rotas dos Olivais

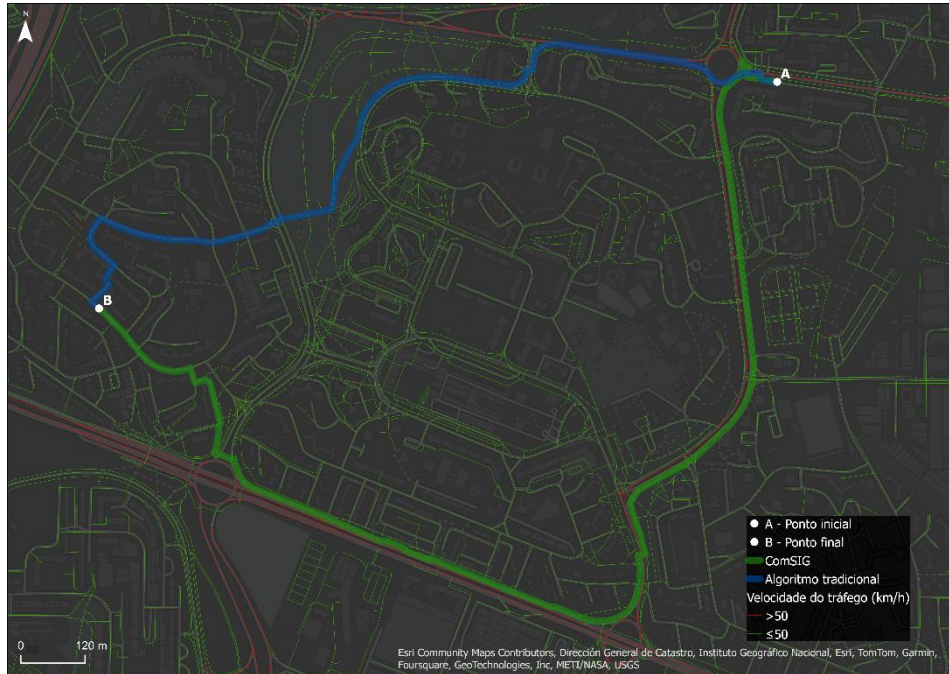


Figura 36: Velocidade do tráfego na envolvente dos percursos dos Olivais

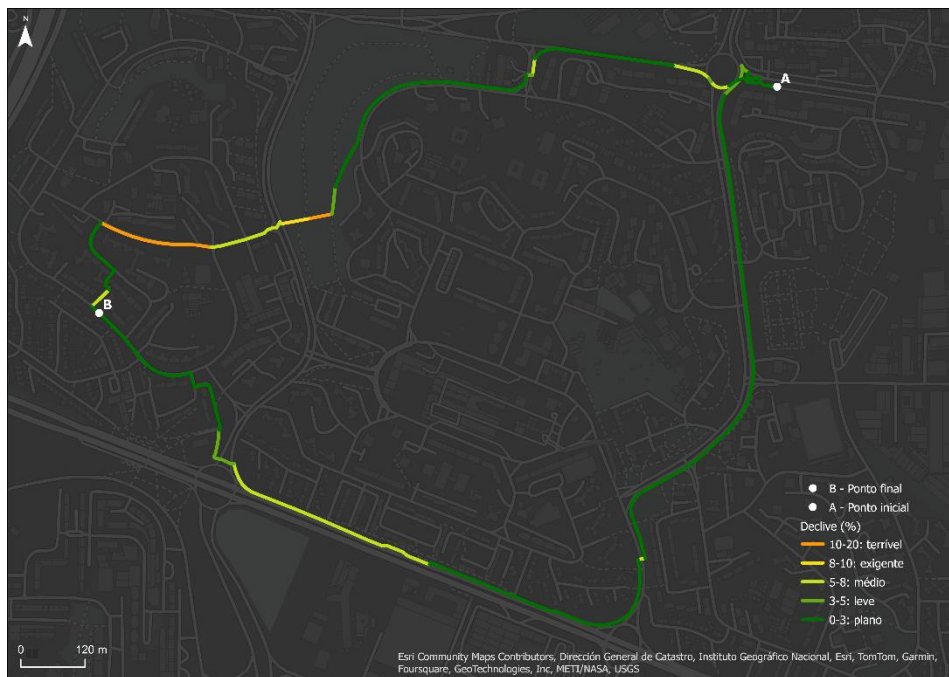


Figura 37: Declive das rotas dos Olivais

Após a análise de percursos individuais, é de notar que o algoritmo ComSIG cria rotas 48% mais longas comparativamente a algoritmos tradicionais de caminho mais curto. Esta tendência deve-se principalmente à priorização da segurança face à distância. O algoritmo considera fatores de custo como o declive, a tranquilidade e a presença de caminhos pedonais, o que se traduz em rotas mais longas, mas também mais seguras.

4.1. Análise comparativa com um algoritmo tradicional

Nesta análise foram criadas rotas utilizando o mesmo conjunto de pontos aleatórios e a mesma escola, o que permitiu uma comparação direta entre os dois algoritmos (Quadro 1).

Esta comparação reforça os resultados enunciados anteriormente. O ComSIG criou mais rotas com distâncias superiores a cinco quilómetros, sendo a distância média 45% superior às rotas criadas pelo algoritmo tradicional, o que implica a eliminação de mais rotas com distâncias superiores a cinco quilómetros. Este resultado é concordante com estudos existentes, que indicam a segurança como a principal preocupação dos utilizadores de bicicleta, especialmente para os mais vulneráveis, como é o caso das crianças. Como referido na revisão da literatura, a escolha de percurso para ciclistas incide muito mais em rotas consideradas seguras e agradáveis, mesmo que isso signifique percorrer uma distância maior (Broach et al., 2012), sendo que para as crianças pode-se considerar um desvio maior para que a rota seja ainda mais segura e plana. Quando são eliminadas as rotas maiores que cinco quilómetros, a distância média das rotas criadas pelo ComSIG iguala-se à do algoritmo tradicional.

Ao examinar as características das rotas criadas pelos algoritmos, é de notar que o ComSIG criou mais rotas com um declive médio inferior às do algoritmo tradicional. Percursos mais declivosos são um desafio para crianças em bicicleta, especialmente numa fase inicial, no entanto, este nem sempre é um aspeto decisivo aquando da seleção de rotas, especialmente quando as crianças são acompanhadas por adultos.

As rotas criadas pelo ComSIG apresentaram em média maiores Índices de Tranquilidade, o que também é um indicador da sua maior segurança. A integração deste fator é uma das potencialidades do algoritmo, uma vez que permite criar rotas com menores níveis de tráfego, maior presença de espaços verdes ao longo do percurso e menores níveis de ruído. A tranquilidade média das rotas criadas pelo ComSIG para esta escola é de 59%, enquanto que o algoritmo tradicional apresenta uma tranquilidade média de 41%.

Circular em vias pedonais é uma opção viável para crianças até aos 10 anos, podendo ser uma alternativa a considerar quando não existam ciclovias. Assim, o fator de custo das vias pedonais condiciona o algoritmo ComSIG a escolher rotas cuja distância percorrida em vias pedonais é ligeiramente superior às do algoritmo tradicional. Assim, em média, 22,2% da distância dos percursos corresponde a passeios e vias pedonais. Isto significa

que a cada 100 km percorridos pelas crianças, 22 implicam a circulação no passeio. Este resultado é indício da necessidade de reforçar a infraestrutura ciclável nas áreas onde foram selecionados passeios, uma vez que a circulação de bicicletas nestes locais, embora permitida a crianças, não é desejável na maioria dos casos por ser potencialmente conflituosa com a circulação de peões.

A velocidade do tráfego ao longo dos percursos criados por ambos os algoritmos é maioritariamente inferior a 50km/h. O algoritmo ComSIG criou para esta escola rotas com menor incidência em segmentos onde a velocidade dos automóveis fosse superior a 50km/h, não só por este ser um dos fatores de custo, mas também pela menor tranquilidade que estes apresentam.

Quadro 1: Comparação das rotas criadas pelo algoritmo ComSIG e o algoritmo tradicional para a Escola Básica de Telheiras

	Algoritmo tradicional	ComSIG
Número de rotas com mais de 5 km a eliminar	5	126
Distância média (antes de eliminar rotas >5 km)	2,2 km	3,2 km
Distância média (após eliminar rotas >5 km)	2,2 km	2,2 km
Declive médio	2,7%	2,32%
Tranquilidade média	41%	59%
Distância percorrida em caminhos pedonais	20,4%	22,2%
Distância percorrida em vias com velocidade de tráfego inferior a 50 km/h	81,5%	95,1%

Ao sobrepor a rede ciclável existente com a rede de rotas escolhidas pelo ComSIG, é possível identificar algumas lacunas onde é necessário criar infraestrutura de ligação ou reforçar eixos da rede viária com novas ciclovias. Na Figura 38 é possível, por exemplo, verificar que na envolvente da Escola Básica de Telheiras apenas existe uma ciclovia na Rua Fernando Namora e que os bairros envolventes carecem de infraestrutura ciclável para responder à procura potencial de viagens para a escola.

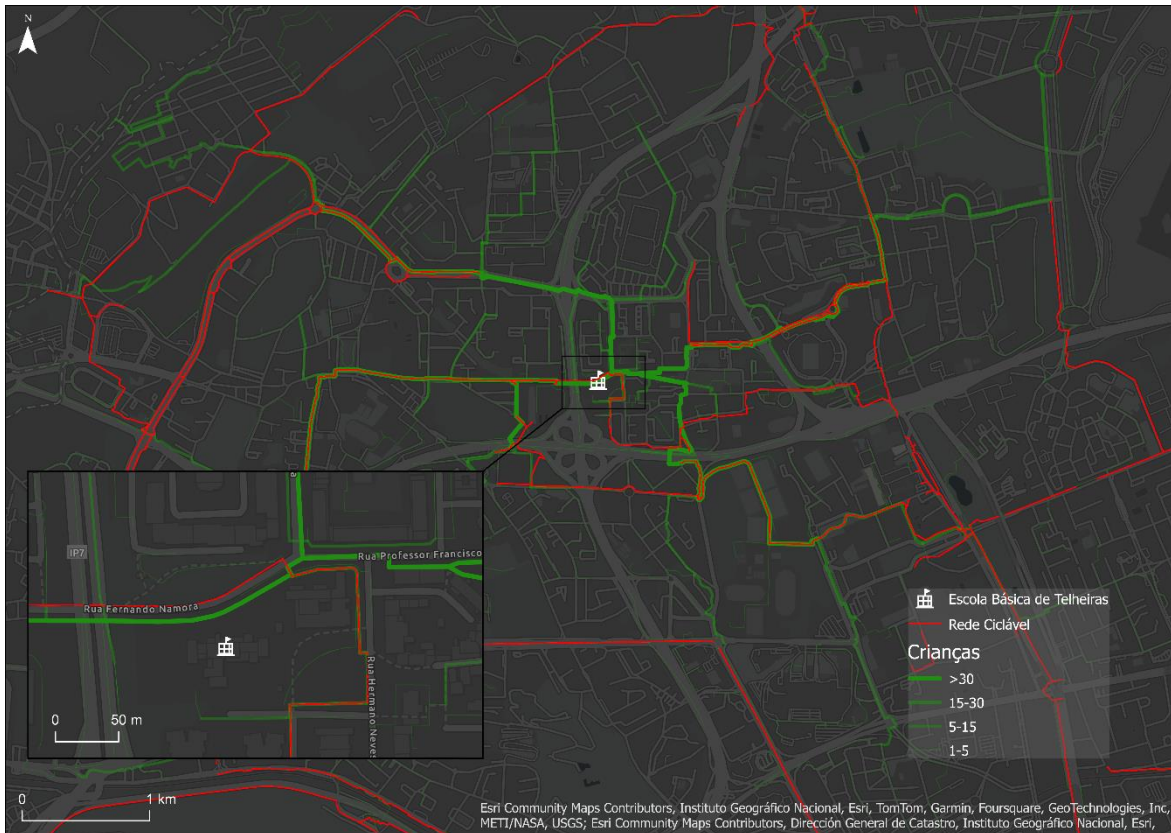


Figura 38: Sobreposição da rede de rotas com a rede ciclável em Telheiras

Este tipo de análise é uma das potencialidades do algoritmo, não só para o planeamento de nova infraestrutura, mas também para o estudo da implementação de medidas de acalmia de tráfego e de programas de CB ou Pedibus.

4.2. Resultados da validação

No decurso da entrevista com um Gestor de Projeto dos CB de Lisboa foram demonstradas as rotas criadas pelo ComSIG em comparação com as rotas criadas pelo algoritmo tradicional e discutidas as potencialidades futuras do ComSIG. Foi visto que embora as rotas criadas pelo algoritmo apresentassem uma maior distância que as rotas convencionais, seriam mais seguras por incluírem, onde possível, a circulação pela ciclovia ou no interior de parques e jardins. Por sugestão do Gestor de Projeto foi testado um percurso, na freguesia dos Olivais, com origem na Avenida de Berlim, terminando na Rua Cidade da Beira (Figura 34). A justificação para esta escolha baseia-se no conhecimento

local do entrevistado. O ComSIG selecionou um percurso de 3,2 km que inclui uma ciclovia, enquanto que o algoritmo tradicional selecionou um percurso de 2,2 km que acompanha o limite exterior de um parque. Embora o percurso do ComSIG fosse maior, o Gestor de Projeto realçou que passava por menos cruzamentos complexos e potencialmente perigosos.

Foi apresentada como potencialidade a utilização do ComSIG numa fase inicial do planeamento de linhas de CB, destacando-se a possibilidade de ser utilizado em qualquer cidade. Foi referido que o algoritmo também poderá ser uma ferramenta útil para apoiar o planeamento da rede ciclável e potencialmente poderá ser adaptado para facilitar a sua implementação em autarquias ou junto de outras entidades, sob a forma de uma ferramenta independente.

4.3. Resultados da replicação para outras escolas

Após a replicação da metodologia para a Escola Básica do Bairro de São Miguel, foi possível aferir que o ComSIG criou mais rotas com distância superior a cinco quilómetros que o algoritmo tradicional, sendo a distância média das mesmas 32% superior. Comparativamente à rede de percursos da Escola Básica de Telheiras, o número de rotas maiores que cinco quilómetros é inferior, uma vez que a rede viária e ciclável é mais densa nesta área da cidade. Tal como na demonstração anterior, o ComSIG criou rotas com menos declivosas, incidindo em segmentos onde a tranquilidade é maior e os percursos incluem maiores segmentos de passeio e vias pedonais. A velocidade do tráfego também é maioritariamente inferior a 50km/h, sendo que o algoritmo tradicional apresentou para esta escola uma menor percentagem de distância percorrida em estradas onde a velocidade dos automóveis fosse inferior a 50km/h.

Quadro 2: Comparação das rotas criadas pelo algoritmo ComSIG e o algoritmo tradicional para a Escola Básica do Bairro de São Miguel

	Algoritmo tradicional	ComSIG
Número de rotas com mais de 5 km a eliminar	7	55
Distância média (antes de eliminar rotas >5 km)	2,2 km	2,9 km

Distância média (após eliminar rotas >5 km)	2,1 km	2,3 km
Declive médio	2,2%	1,9%
Tranquilidade média	40,6%	59,4%
Distância percorrida em caminhos pedonais	6,8%	15,8%
Distância percorrida em vias com velocidade de tráfego inferior a 50 km/h	62,9	91,2%

Realizando a análise da sobreposição da rede da Escola Básica do Bairro de São Miguel com a rede ciclável, na Figura 39 é possível verificar algumas lacunas na infraestrutura ciclável. Não existindo ligação por ciclovia entre a Avenida da República e o quarteirão envolvente da Escola Básica do Bairro de São Miguel, o algoritmo é forçado a utilizar as ruas José Carlos dos Santos e Visconde de Seabra. É de notar também que a Avenida dos Estados Unidos da América apresenta mais de 30 passagens e não está dotada de qualquer infraestrutura ciclável, sendo que é uma avenida notoriamente perigosa, apresentando velocidades superiores a 50 km/h e com vários relatos de atropelamentos (Ferreira, 2024).

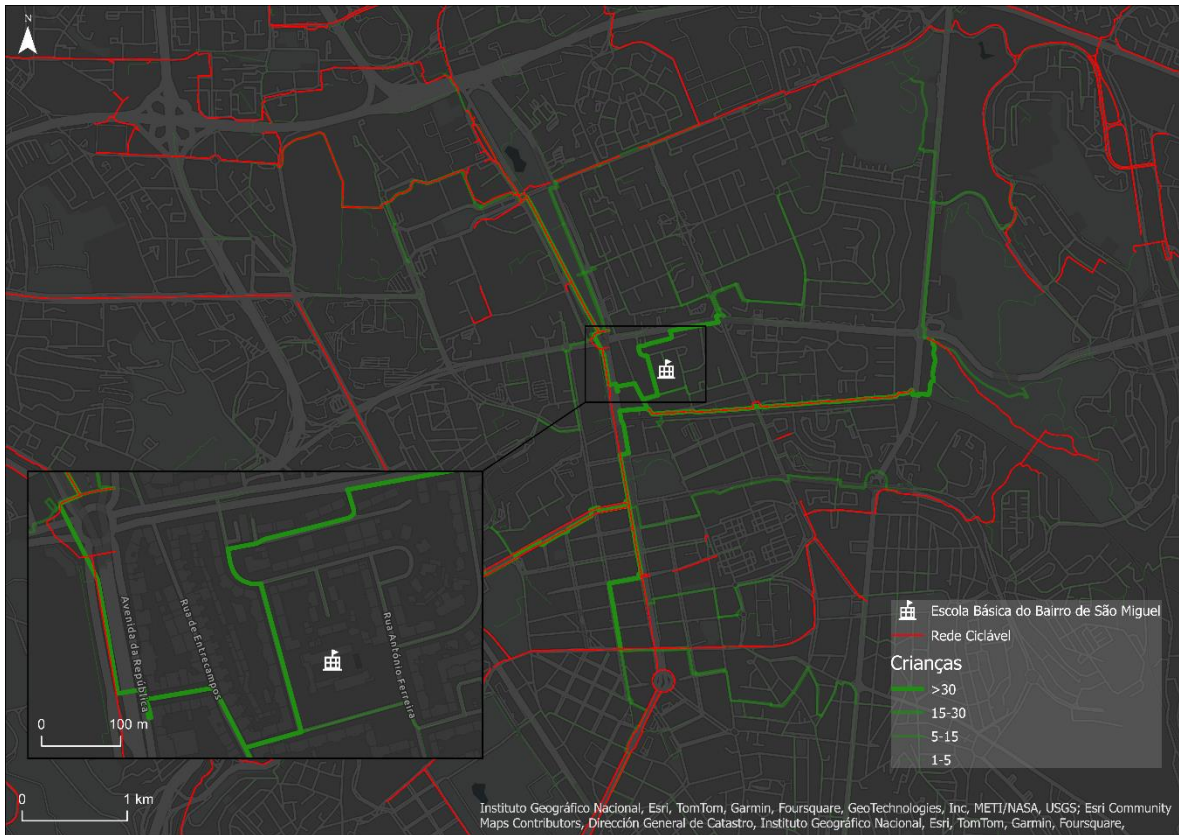


Figura 39: Sobreposição da rede de rotas com a rede ciclável nas Avenidas Novas

5. Conclusões

5.1. Considerações finais

A adoção da bicicleta nas deslocações urbanas é uma forma de contribuir para a redução das emissões de GEE, reduzindo o ruído e o congestionamento nas cidades. De forma a cumprir as metas da ENMAC é fundamental criar condições para que o modo ciclável seja mais atrativo. O investimento em infraestrutura mais segura e competitiva, a adoção de medidas de acalmia de tráfego e programas de incentivo à aquisição de bicicletas são algumas das estratégias para fomentar o seu uso.

Aumentar a segurança das deslocações em bicicleta é a melhor forma de incentivar a adoção dos modos ativos, que contribuem para o bem-estar e a saúde, assim como para a economia, resultando em menos gastos públicos atenuando, a montante, despesa pública na área da saúde, decorrente de acidentes e doenças crónicas, e na área das obras públicas, com a renovação de infraestruturas, recondução de trânsito, ou outras.

Ao sensibilizar as crianças, inculcando-lhes o hábito de utilizar a bicicleta para as deslocações utilitárias, estamos a preparar a próxima geração para um modelo de cidade mais sustentável, com menos automóveis a circular.

Programas de mobilidade ativa como o CB, o *ComBina* e o *Mexe-te Pela Tua Cidade!* são uma forma de sensibilizar pais e crianças para a importância da bicicleta nas deslocações casa-escola. Os benefícios são evidentes para os participantes, uma vez que a atividade física contribui diretamente para a saúde física e psicológica. Por outro lado, chegar à escola em meios ativos aumenta a capacidade de aprendizagem em contexto escolar e, a nível social, expõe as crianças à sensibilização para a mobilidade sustentável. Também a envolvente da escola beneficia destes programas, através da redução do congestionamento, que impacta a qualidade do ar, o ruído e a segurança das crianças.

Melhorar a infraestrutura através da acalmia do tráfego, das restrições à circulação de automóveis no perímetro escolar e da criação de ciclovias deverá ser tendencialmente uma prioridade, uma vez que facilita a implementação dos programas de mobilidade ativa.

Ao longo da construção desta dissertação e do algoritmo em si, concluiu-se que apesar da utilização dos SIG para o planeamento de rotas para utilizadores em bicicleta ser bastante abrangente no meio académico, não foram encontrados algoritmos

especialmente direcionados aos mais novos.

A criação deste algoritmo parte de uma lacuna que se observa na circulação segura de crianças em bicicleta, da aparente inexistência de uma ferramenta que permita criar rotas desta natureza nos trajetos casa-escola, com fatores ponderados especificamente para este público-alvo.

Os dados utilizados para a análise foram a rede viária do *OpenStreetMaps*, a rede de escolas da DGEEC e o Modelo Digital de Terreno (MDE) fornecido pelo Instituto Superior Técnico. Para integrar estes elementos no algoritmo, foi necessário realizar uma limpeza da rede viária, o que incluiu filtrar as vias onde a circulação de bicicletas não é permitida, mantendo os passeios e vias pedonais, uma vez que seriam importantes para a análise.

Na fase de seleção e de identificação de uma escola para análise, foi questionada a cooperativa Bicicultura, garantindo que a escolhida fosse abrangida pelo programa municipal de CB e que apresentasse variedade de relevo, tipologias de rede e proximidade a parques e jardins (onde existem vias pedonais). Com estes pressupostos, foi selecionada a Escola Básica de Telheiras, Lisboa, a partir de uma listagem apresentada pela Bicicultura.

Para criar o planeador de rotas para crianças em bicicleta foram incluídos o índice de tranquilidade do *cyclestreets* e as velocidades máximas permitidas em cada segmento da rede viária, ambos extraídos do OSM. Estes parâmetros foram ponderados juntamente com o declive e a presença de vias pedonais num fator de custo que, através do *Network Analyst*, permite criar rotas mais seguras para crianças em bicicleta. A ponderação foi alterada iterativamente e foi sendo validada com base em conhecimento local. Finalmente, foram criados pontos aleatórios que representassem os alunos da Escola Básica de Telheiras. Através do *Network Analyst* foram criados todos os percursos para a escola.

O resultado da análise de todos os percursos para a escola poderá ser essencial para identificar o ponto de origem das crianças e os pontos de confluência. Desta forma, o algoritmo poderá vir a apoiar o planeamento da requalificação viária, identificando os eixos estruturantes para as deslocações de crianças em bicicleta. Este permite identificar as vias prioritárias que devem ser objeto de investimento, nomeadamente na implementação de medidas de acalmia de tráfego ou de programas como o CB.

Quanto ao efeito multiplicador deste modelo, pelo facto de o tratamento dos dados e

de a criação dos fatores de custo ter sido feita em R, a sua replicação para outras cidades ou outras escolas estará facilitada. Do mesmo modo será possível calibrar o modelo, introduzindo novos fatores e ajustando as ponderações, por exemplo, se regiões estudadas futuramente forem mais planas, o declive não será um fator tão importante, podendo ser substituído por outros fatores.

Dado que existem poucos estudos desenvolvidos que demonstrem a criação de algoritmos semelhantes, esta dissertação poderá servir como base para aprofundar o conhecimento na otimização de rotas para crianças em bicicleta. O mesmo modelo permite adaptações e melhorias futuras.

Finalmente, o contacto com todas as partes envolvidas no contexto da mobilidade escolar constitui um eixo fundamental. A comunicação com a população escolar é indispensável para aferir as preocupações dos pais, do corpo docente, dos assistentes operacionais e, acima de tudo, das crianças. Também é essencial o contacto com as entidades locais que contribuem para a dinamização do modo ciclável, como cooperativas e associações ligadas à mobilidade ativa.

5.2. Limitações e Desenvolvimentos futuros

O algoritmo ComSIG destaca-se como uma solução pioneira neste campo pouco explorado e como tal, há espaço para desenvolvimento adicional no sentido de aumentar a sua eficácia e adaptabilidade. Para tal, será essencial explorar algumas áreas em falta como a adaptação para crianças de diferentes idades, a incorporação de dados reais de alunos, automatização da criação de rotas, considerando alternativas com *software* de utilização livre.

À medida que as crianças crescem, as suas capacidades físicas e cognitivas evoluem, o que impacta a sua capacidade de percorrer diferentes tipos de rotas em bicicleta. Para crianças mais novas, o algoritmo poderá dar prioridade a rotas com declives mais suaves, distâncias mais curtas e maiores níveis de segurança, incluindo mais ciclovias segregadas e velocidades de tráfego mais reduzidas. Para crianças em fases de desenvolvimento mais avançadas, o algoritmo poderá ser adaptado para incluir rotas ligeiramente maiores e que incluam situações de trânsito gradualmente mais complexas. Esta característica poderá garantir a relevância e segurança do algoritmo para alunos em diferentes faixas etárias.

Um avanço significativo deste algoritmo será a incorporação de dados reais de alunos para o processo de criação de rotas para a escola. Ao saber a morada exata ou aproximada dos alunos, o ComSIG poderá criar rotas personalizadas que maximizem a segurança. Isto poderá também contribuir para o planeamento de linhas de CB, quando se identificam grupos de crianças que vivam em proximidade, criando um percurso que otimize a participação de mais crianças no programa. A rede de rotas para a escola foi criada com base em pontos aleatórios. Isto possibilita a reprodução fácil do modelo, no entanto poderá ser considerada a criação desta rede com base nas moradas reais dos alunos das escolas. O processo de geração de pontos aleatórios apenas considerações com base na distância à escola, o que significa que alguns pontos serão criados em localizações que não correspondem a habitações. Para evitar esta limitação, futuramente a criação de pontos aleatórios poderá ser restringida a edifícios habitacionais.

A integração de métodos de *Machine Learning* também poderá contribuir para a criação de rotas. Algoritmos deste tipo podem ser treinados com diferentes conjuntos de dados, desde fotografias, padrões de trânsito, relatórios de acidentes a fatores ambientais (como qualidade do ar e níveis de ruído), para potenciar rotas mais confortáveis e seguras. O algoritmo também poderá aprender com dados reais de utilização, por exemplo, se um maquinista de um CB considerar uma rota pouco segura, o sistema de *Machine Learning* poderá reduzir a probabilidade de seleção dessa rota e procurar outras alternativas.

Uma das potencialidades futuras do algoritmo sugeridas pelo Gestor de Projeto dos CB de Lisboa baseia-se na preocupação com os cruzamentos e interseções, que são pontos críticos na seleção de rotas para CB. Uma rota com menos cruzamentos será em princípio mais segura. A integração deste fator foi uma das recomendações apontadas pelo *stakeholder*.

O algoritmo ComSIG foi concebido com o objetivo de criar rotas individuais ou múltiplas com o mesmo destino. Embora tenham sido testadas formas de automatizar este processo com recurso ao *Python* e o *ArcPy*, não foi possível desenvolver este componente, tendo sido realizada de forma manual. Futuramente, esta automatização poderá revelar-se útil para o planeamento de rotas para diversas escolas, com benefícios para os municípios ou entidades governamentais que queiram expandir o modelo para as suas comunidades escolares.

Atualmente, o ComSIG utiliza ferramentas exclusivas como o *Network Analyst* do

ArcGIS. Estas ferramentas, de elevado potencial, somam muitas funcionalidades. São, no entanto, bastante dispendiosas e de acesso limitado, o que pode dificultar a implementação para as escolas ou municípios com menos recursos. A utilização de ferramentas alternativas de acesso livre, como o QGIS, poderá contribuir para a criação de um algoritmo mais acessível, encorajando a sua utilização no planeamento de infraestrutura e de programas de incentivo à mobilidade escolar ativa.

Estes desenvolvimentos futuros serão cruciais não só para melhorar o algoritmo ComSIG, mas também para criar um precedente no planeamento da mobilidade escolar ativa para crianças. Ao desenvolver estes aspetos, o algoritmo poderá constituir uma referência para ferramentas semelhantes, impulsionando a evolução de sistemas de transporte escolar mais sustentáveis e seguros.

Referências Bibliográficas

- Amaro, M., & Lino, F. (2022). Os SIG na análise e planeamento da rede ciclável: potencial ciclável do Município de Lisboa. *O Compromisso Da Geografia Para Territórios Em Mudança. Livro de Atas Do XIII Congresso Da Geografia Portuguesa*, 117–121. <https://repositorio.ul.pt/handle/10451/53434>
- Anna, R., & Rocca, L. (2009). Soft Mobility and Urban Transformation. *TeMA - Journal of Land Use, Mobility and Environment*, 2, 85–90. <https://doi.org/10.6092/1970-9870/125>
- ANSA English. (2024, January 30). *Road accidents -21% in 14 days of 30 kph limit in Bologna - General News - Ansa.it*. https://www.ansa.it/english/news/general_news/2024/01/30/road-accidents-21-in-14-days-of-30-kph-limit-in-bologna_705d49bd-4b92-424b-b7ae-c71439c93cb0.html
- Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (ANSR). (2023). *Relatório Anual 2023: Sinistralidade 24 Horas, Fiscalização e Contraordenações Rodoviárias*. <http://www.ansr.pt/Estatisticas/RelatoriosDeSinistralidade/Documents/2023/Relat%C3%B3rio%20Anual%20de%20Sinistralidade%20a%2024h,%20fiscaliza%C3%A7%C3%A3o%20e%20contraordena%C3%A7%C3%B5es%20rodovi%C3%A1rias%202023.pdf>
- Belga. (2024, January 22). *Bruxelles Mobilité liste les impacts positifs de la zone 30 généralisée*. Le Soir. <https://www.lesoir.be/562934/article/2024-01-22/bruxelles-mobilite-liste-les-impacts-positifs-de-la-zone-30-generalisee>
- Blondiau, T., Van Zeebroeck, B., & Haubold, H. (2016). Economic benefits of increased cycling. *Transportation Research Procedia*, 14, 2306–2313.
- Boreham, C., & Riddoch, C. (2001). The physical activity, fitness and health of children. *Journal of Sports Sciences*, 19(12), 915–929. <https://doi.org/10.1080/026404101317108426>
- Börjesson, M., & Eliasson, J. (2011). The Value of Time and External Benefits in Bicycle Appraisal. In *CTS Working Paper 2011:22*. Centre for Transport Studies, Royal Institute of Technology.
- Bouaoun, L., Haddak, M. M., & Amoros, E. (2015). Road crash fatality rates in France: A comparison of road user types, taking account of travel practices. *Accident Analysis and Prevention*, 75, 217–225. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2014.10.025>
- Brink, M., Mathieu, S., & Rüttener, S. (2022). Lowering urban speed limits to 30 km/h reduces noise annoyance and shifts exposure–response relationships: Evidence from a field study in Zurich. *Environment International*, 170, 107651. <https://doi.org/10.1016/J.ENVINT.2022.107651>
- Broach, J., Dill, J., & Gliebe, J. (2012). Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(10), 1730–1740. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2012.07.005>

- Brown, A., Marchetti, L., Pullen, N., Scully, M., & Zegeer, C. (2007). *Safe Routes to School Guide*. <http://www.saferoutesinfo.org>
- Câmara Municipal de Lisboa. (2021). *Como Pedala Lisboa*. Câmara Municipal de Lisboa.
- Câmara Municipal de Lisboa. (2022). *Mãos ao Ar! Lisboa 2022*. https://www.lisboa.pt/fileadmin/cidade_temas/mobilidade/documentos/maos_ao_ar_relatorio_2022.pdf#page=6.03
- Chriqui, J. F., Leider, J., Thrun, E., Nicholson, L. M., & Slater, S. (2016). Communities on the Move: Pedestrian-Oriented Zoning as a Facilitator of Adult Active Travel to Work in the United States. *Frontiers in Public Health*, 4, 185406. <https://doi.org/10.3389/FPUBH.2016.00071/BIBTEX>
- Clarke, R. (2022). *School Streets: Putting Children and the Planet First*. FIA Foundation. <https://www.childhealthinitiative.org/media/790954/these-are-our-streets-manifesto-2030.pdf>
- CML. (n.d.-a). *Combina*. <https://www.lisboa.pt/Temas/Mobilidade/Escolar/Combina>.
- CML. (n.d.-b). *Comboio de Bicicletas*. <https://www.lisboa.pt/Temas/Mobilidade/Escolar/Comboio-de-Bicicletas>.
- CML. (n.d.-c). *Mobilidade, Programa de Mobilidade Escolar Mexe-te Pela Tua Cidade - Municipio de Lisboa | Portal*. Retrieved July 18, 2024, from <https://www.lisboa.pt/temas/mobilidade/escolar/mexe-te-pela-tua-cidade>
- Comissão Europeia. (2000). *Cidades para bicicletas, cidades de futuro*. EUR-OP.
- Copenhaguenize France. (2023). *RELATÓRIO FINAL: Análise multicritérios da rede existente*. Câmara Municipal de Lisboa. https://www.lisboa.pt/fileadmin/portal/temas/mobilidade/rede_ciclavel/Fase_2_Relatorio.pdf
- Correia, F. A. (2024). *Rede ciclável: Plano de ação 24-25*. Lisboa. [/mnt/data/Apresentacao_Plano_Acao_24_25_Rede_Ciclavel\(1\).pdf](/mnt/data/Apresentacao_Plano_Acao_24_25_Rede_Ciclavel(1).pdf)
- CycleStreets. (n.d.). Retrieved July 24, 2024, from <https://www.cyclestreets.net/about/>
- CycleStreets » *Help and documentation*. (n.d.). Retrieved July 24, 2024, from <https://www.cyclestreets.net/help/journey/howitworks/>
- DaCoTA. (2012). *Children in road traffic, Deliverable 4.8c of the EC FP7 project DaCoTA*. DaCoTA.
- de Haas, M., & Kolkowski, L. (2023). *Cycling facts 2023*. Netherlands Institute for Transport Policy Analysis (KiM).
- Deenihan, G., & Caulfield, B. (2014). Estimating the health economic benefits of cycling. *Journal of Transport & Health*, 1(2), 141–149. <https://doi.org/10.1016/J.JTH.2014.02.001>

- DeLisle, J., & Grissom, T. (2013). An Empirical Study of the Efficacy of Mixed-Use Development: The Seattle Experience. *Journal of Real Estate Literature*, 21(1), 25–57.
<https://doi.org/10.1080/10835547.2013.12090352>
- Derek, J., & Sikora, M. (2019). Bicycle route planning using multiple criteria GIS analysis. *2019 27th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM 2019*. <https://doi.org/10.23919/SOFTCOM.2019.8903800>
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>
- Direção-Geral da Educação. (2022). *DE sobre rodas - Comunicado nº 1: Informação sobre a entrega de material velocipédico*.
- Direção-Geral da Educação, & Federação Portuguesa de Ciclismo. (2022). *Pedala! Da Escola para a Vida: Manual de Apoio ao Professor e Técnico Qualificado*. Direção-Geral da Educação/Desporto Escolar.
- Direção-Geral de Estatísticas da Educação e Ciência (DGEEC). (2024). *Educação em Números - Portugal*. Recenseamento Escolar Anual (REA).
- ETSC. (2022). *Reducing child deaths on European roads. PIN Flash Report 43*. ETSC.
https://etsc.eu/wp-content/uploads/ETSC_PINFLASH43.pdf
- European Commission. (2020). *EU transport in figures – Statistical pocketbook 2020*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/doi/10.2832/491038>
- European Commission. (2023). *Road Safety Thematic Report – Children*. European Road Safety Observatory.
- European Commission, D. G. for T. (2021). *Facts and Figures Cyclists*. European Road Safety Observatory.
- European Environment Agency. (2023). *Trends and projections in Europe 2023*.
<https://doi.org/10.2800/595102>
- European Transport Safety Council (ETSC). (1997). *Visions, targets & strategies*.
- European Transport Safety Council (ETSC). (2021). *Road safety priorities for the EU: Briefing to members of the European Parliament*. European Transport Safety Council.
- Félix, R. (2021, April 15). *Speed-Slope factor*.
<https://web.tecnico.ulisboa.pt/~rosamfelix/gis/declives/SpeedSlopeFactor.html#ref-price2008>
- Félix, R., & Batista Silva, J. (2013). *User's needs and preferences for planning and management of cycling network in the city of Lisbon, a "starter city"*.
<https://www.researchgate.net/publication/303944399>

- Félix, R., Lovelace, R., & Moura, F. (2022). *biclaR: Ferramenta de apoio ao planeamento da rede ciclável na área metropolitana de Lisboa*. CERIS - Instituto Superior Técnico e Transportes Metropolitanos de Lisboa. <https://biclar.tmlmobilidade.pt>
- Félix, R. M. (2012). *Gestão da Mobilidade em Bicicleta: Necessidades, factores de preferência e ferramentas de suporte ao planeamento e gestão de redes. O caso de Lisboa*.
- Félix, R., Moura, F., & Clifton, K. J. (2019). Maturing urban cycling: Comparing barriers and motivators to bicycle of cyclists and non-cyclists in Lisbon, Portugal. *Journal of Transport and Health*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.100628>
- Ferreira, M. (2024, September 12). *Dois atropelamentos mortais em menos de duas semanas. Livre quer medidas de “acalmia do tráfego” e “redução de velocidade” em Lisboa – Observador*. Observador. <https://observador.pt/2024/09/12/dois-atropelamentos-mortais-em-menos-de-duas-semanas-livre-quer-medidas-de-acalmia-do-trafego-e-reducao-de-velocidade-em-lisboa/>
- Flusche, D. (2009). *The economic benefits of bicycle infrastructure investments*.
- Garcia, H. (2022, November 28). *Barcelona’s bike bus scheme for kids encourages green transport habits*. Reuters.
- Geurs, K. T., La Paix, L., & Van Weperen, S. (2016). A multi-modal network approach to model public transport accessibility impacts of bicycle-train integration policies. *European Transport Research Review*, 8, 1–15.
- GitHub - U-Shift/Declives-RedeViaria: *Mapas com os declives de uma rede viária*. (n.d.). Retrieved July 24, 2024, from <https://github.com/U-Shift/Declives-RedeViaria?tab=readme-ov-file>
- Gössling, S. (2020). Why cities need to take road space from cars - and how this could be done. *Journal of Urban Design*, 25(4), 443–448. <https://doi.org/10.1080/13574809.2020.1727318>
- Holden, E., Gilpin, G., & Banister, D. (2019). Sustainable mobility at thirty. *Sustainability (Switzerland)*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/su11071965>
- Honey-Rosés, J. (2024, January 9). *The Global Bike Bus Movement*. City Lab Barcelona. <https://citylabbcn.org/the-global-bike-bus-movement/>
- Huang, C., Dannenberg, A. L., Haaland, W., & Mendoza, J. A. (2018). Changes in Self-Efficacy and Outcome Expectations From Child Participation in Bicycle Trains for Commuting to and From School. <https://doi.org/10.1177/1090198118769346>, 45(5), 748–755. <https://doi.org/10.1177/1090198118769346>
- Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I. P. (2011). *Glossário do Pacote da Mobilidade*. IMTT.
- Instituto da Mobilidade e dos Transportes, I. P. (2012). *Plano de Promoção da Bicicleta e Outros Modos Suaves (PPBOMS)*.
- Instituto Nacional de Estatística (INE). (2018). *Mobilidade e funcionalidade do território nas Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa - 2017*.

https://www.ine.pt/ngt_server/attachfileu.jsp?look_parentBoui=349565256&att_display=n&att_download=y

- International Obesity Task Force, & European Association for the Study of Obesity. (2005). *EU Platform on Diet, Physical Activity and Health: International Obesity Task Force EU Platform Briefing Paper*. International Obesity Task Force.
- IPDJ. (2022, September 29). *IPDJ e DGE entregam os primeiros kits de bicicletas nas escolas no âmbito do projeto «Desporto Escolar sobre rodas»*. <https://lpdj.gov.pt/-/lpdj-e-dge-entregam-os-primeiros-kits-de-bicicletas-nas-escolas-no-ambito-do-projeto-desporto-escolar-sobre-rodas>.
- Jacobsen, P. L. (2015). Safety in numbers: more walkers and bicyclists, safer walking and bicycling. *Injury Prevention, 21*(4), 271–275.
- Katsavounidou, G. (n.d.). *“Stop the Child Murder”*: How a grassroots movement for children’s safety formed a new paradigm in urban design. Retrieved August 6, 2024, from <https://www.humankind.city/2015/12/woonerf->
- Larouche, R., Mammen, G., Rowe, D. A., & Faulkner, G. (2018). Effectiveness of active school transport interventions: A systematic review and update. *BMC Public Health, 18*(1), 1–18. <https://doi.org/10.1186/S12889-017-5005-1/TABLES/3>
- Lee, J., Choi, K., & Leem, Y. (2016). Bicycle-based transit-oriented development as an alternative to overcome the criticisms of the conventional transit-oriented development. *International Journal of Sustainable Transportation, 10*(10), 975–984. <https://doi.org/10.1080/15568318.2014.923547>
- Leung, K. Y. K., & Loo, B. P. Y. (2017). Association of children’s mobility and wellbeing: A case study in Hong Kong. *Travel Behaviour and Society, 9*, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.tbs.2017.07.004>
- Lisboa Para Pessoas. (2023, June 2). *Lisboa entre as 10 cidades que vão receber dinheiro da Bloomberg para infraestrutura ciclável*. <https://lisboaparapessoas.pt/2023/06/02/lisboa-bloomberg-bici-infraestrutura-ciclavel/>
- Litman, T. (2016). Transportation affordability. *Transportation, 250*, 360–1560.
- Loong, C., van Lierop, D., & El-Geneidy, A. (2017). On time and ready to go: An analysis of commuters’ punctuality and energy levels at work or school. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 45*, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.TRF.2016.11.014>
- Lovelace, R., & Ellison, R. (2018). stplanr: A package for transport planning. *The R Journal, 10*(2), 10. <https://doi.org/10.32614/RJ-2018-053>
- Lovelace, R., Goodman, A., Aldred, R., Berkoff, N., Abbas, A., & Woodcock, J. (2017). The Propensity to Cycle Tool: An open source online system for sustainable transport planning. *Journal of Transport and Land Use, 10*(1), 505–528. <https://doi.org/10.5198/JTLU.2016.862>

- Lovelace, R., & Morgan, M. (n.d.). *About - NPT*. Retrieved September 3, 2024, from <https://www.npt.scot/about>
- Lovelace, R., Talbot, J., & Mahfouz, H. (2024). *CRUSE Tool project: Extension report*. University of Leeds, Institute for Transport Studies.
- Marquet, O., & Miralles-Guasch, C. (2015). The walkable city and the importance of the proximity environments for Barcelona's everyday mobility. *Cities*, *42*, 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2014.10.012>
- Marshall, W. E., & Ferenchak, N. N. (2019). Why cities with high bicycling rates are safer for all road users. *Journal of Transport & Health*, *13*, 100539. <https://doi.org/10.1016/J.JTH.2019.03.004>
- Marshall, W. E., & Garrick, N. W. (2011). Evidence on why bike-friendly cities are safer for all road users. *Environmental Practice*, *13*(1), 16–27.
- Martínez-Gómez, D., Ruiz, J. R., Gómez-Martínez, S., Chillón, P., Rey-López, J. P., Díaz, L. E., Castillo, R., Veiga, O. L., & Marcos, A. (2011). Active Commuting to School and Cognitive Performance in Adolescents: The AVENA Study. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, *165*(4), 300–305. <https://doi.org/10.1001/ARCHPEDIATRICS.2010.244>
- Masoumi, H., van Rooijen, M., & Sierpiński, G. (2020). Children's independent mobility to school in seven European countries: A multinomial logit model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *17*(23), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ijerph17239149>
- Mendoza, J. A., Haaland, W., Jacobs, M., Abbey-Lambertz, M., Miller, J., Salls, D., Todd, W., Madding, R., Ellis, K., & Kerr, J. (2017). Bicycle Trains, Cycling, and Physical Activity: A Pilot Cluster RCT. *American Journal of Preventive Medicine*, *53*(4), 481–489. <https://doi.org/10.1016/J.AMEPRE.2017.05.001>
- Mindell, J. S., Leslie, D., & Wardlaw, M. (2012). Exposure-Based, “Like-for-Like” Assessment of Road Safety by Travel Mode Using Routine Health Data. *PLoS ONE*, *7*(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050606>
- Moreno, C., Allam, Z., Chabaud, D., Gall, C., & Pratlong, F. (2021). *Introducing the “15-Minute City”: Sustainability, Resilience and Place Identity in Future Post-Pandemic Cities*. <https://doi.org/10.3390/smartcities>
- Nello-Deakin, S. (2019). Is there such a thing as a ‘fair’ distribution of road space? *Journal of Urban Design*, *24*(5), 698–714. <https://doi.org/10.1080/13574809.2019.1592664>
- Nikitas, A., Wang, J. Y. T., & Knamiller, C. (2019). Exploring parental perceptions about school travel and walking school buses: A thematic analysis approach. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, *124*, 468–487. <https://doi.org/10.1016/J.TRA.2019.04.011>
- Oeschger, G., Carroll, P., & Caulfield, B. (2020). Micromobility and public transport integration: The current state of knowledge. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, *89*. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102628>

- Oja, P., Titze, S., Bauman, A., de Geus, B., Krenn, P., Reger-Nash, B., & Kohlberger, T. (2011). Health benefits of cycling: A systematic review. *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 21(4), 496–509. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0838.2011.01299.X>
- Organização Mundial da Saúde (OMS). (2018). *Health economic assessment tool (HEAT) for walking and for cycling: Methods and user guide on physical activity, air pollution, injuries and carbon impact assessments*. WHO Regional Office for Europe.
- Ostermeijer, F., Koster, H. R. A., & van Ommeren, J. (2019). Residential parking costs and car ownership: Implications for parking policy and automated vehicles. *Regional Science and Urban Economics*, 77, 276–288.
- Pereira, R. H. M., Saraiva, M., Herszenhut, D., Braga, C. K. V., & Conway, M. W. (2021). r5r: Rapid Realistic Routing on Multimodal Transport Networks with R extsuperscript{5} in R. *Findings*. <https://doi.org/10.32866/001c.21262>
- Prud'Homme, R., & Bocarejo, J. P. (2005). The London congestion charge: A tentative economic appraisal. *Transport Policy*, 12(3), 279–287.
- Pucher, J., & Buehler, R. (2008). Making Cycling Irresistible: Lessons from The Netherlands, Denmark and Germany. *Transport Reviews*, 28(4), 495–528. <https://doi.org/10.1080/01441640701806612>
- Pucher, J., & Buehler, R. (2009). Integrating Bicycling and Public Transport in North America. *Journal of Public Transportation*, 12(3), 79–104. <https://doi.org/10.5038/2375-0901.12.3.5>
- Pucher, J., & Buehler, R. (2012). *City cycling*. MIT Press.
- Quintero-Barbosa, B., & Chávez-González, M. (2023). La regulación de la movilidad ciclista en la Zona Metropolitana Colima-Villa de Álvarez. *Legado De Arquitectura Y Diseño*, 18(34), 187–196. <https://doi.org/10.36677/legado.v18i34.20929>
- R Core Team. (2024). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Rothman, L., Hagel, B., Howard, A., Cloutier, M. S., Macpherson, A., Aguirre, A. N., McCormack, G. R., Fuselli, P., Buliung, R., HubkaRao, T., Ling, R., Zanotto, M., Rancourt, M., & Winters, M. (2021). Active school transportation and the built environment across Canadian cities: Findings from the child active transportation safety and the environment (CHASE) study. *Preventive Medicine*, 146, 106470. <https://doi.org/10.1016/J.YPMED.2021.106470>
- Schimenovitz, F., Meunier, C., & Boutora, M. (2003). *Le Ramassage Scolaire Non-Motorisé: Bus Pédestre et Bus Cycliste*.
- Schnabel, I. (2024). The Last Mile. *Federal Reserve Bank of St. Louis Review*, 106(2), 72–86. <https://doi.org/10.20955/r.106.72-86>
- Silva, D. M. V. (2024). Avaliação do potencial ciclável do percurso casa-escola em Lisboa. In *Relatório de Estágio para Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território*.

- Simón-i-Mas, G., Martín Bautista, S., & Honey-Rosés, J. (2024). *A global survey of Bike Bus initiatives*. Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals de la Universitat Autònoma de Barcelona (ICTA-UAB), City Lab Barcelona. <https://ddd.uab.cat/record/283387>
- Smith, L., Norgate, S. H., Cherrett, T., Davies, N., Winstanley, C., & Harding, M. (2015). Walking School Buses as a Form of Active Transportation for Children—A Review of the Evidence. *The Journal of School Health, 85*(3), 197. <https://doi.org/10.1111/JOSH.12239>
- Stark, J., Meschik, M., Singleton, P. A., & Schützhöfer, B. (2018). Active school travel, attitudes and psychological well-being of children. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 56*, 453–465. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.05.007>
- Tori, S., Pappers, J., Martínez Ramírez, L., & Keseru, I. (2024). ‘There is a lot of traffic at the school gate in the morning which makes me nervous’: exploring children’s current and desired school commutes. *Children’s Geographies, 1*–18.
- UN. (2015a). *General Assembly. A/RES/70/1. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. United Nations. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf
- UN. (2015b). *Paris Agreement*. United Nations. https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- Unwin, N. C. (1995). Promoting the Public Health Benefits of Cycling. In *Public Health* (Vol. 109).
- Wild, K., & Woodward, A. (2019). Why are cyclists the happiest commuters? Health, pleasure and the e-bike. *Journal of Transport & Health, 14*, 100569. <https://doi.org/10.1016/J.JTH.2019.05.008>
- World Health Organization (WHO). (2010). *Global recommendations on physical activity for health*. WHO Press.

Anexos

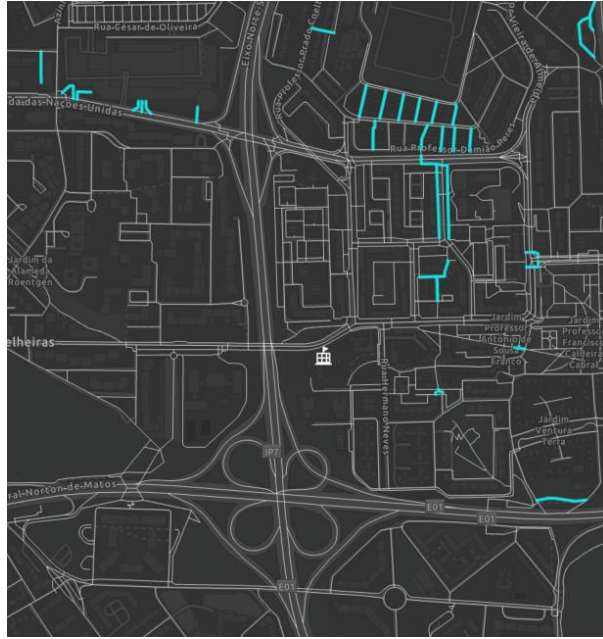
Anexo 1: Limpeza da rede: a rosa apresentam-se os segmentos desconectados



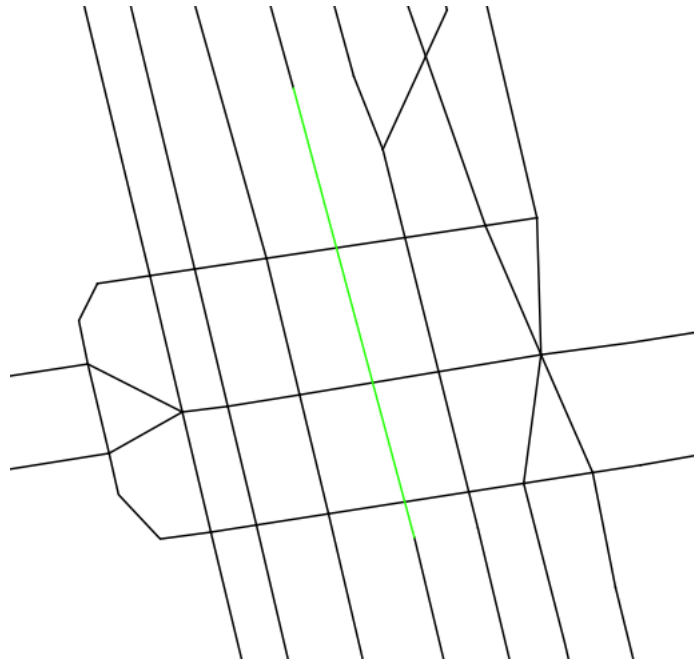
Anexo 2: Segmentos sem classificação hierárquica



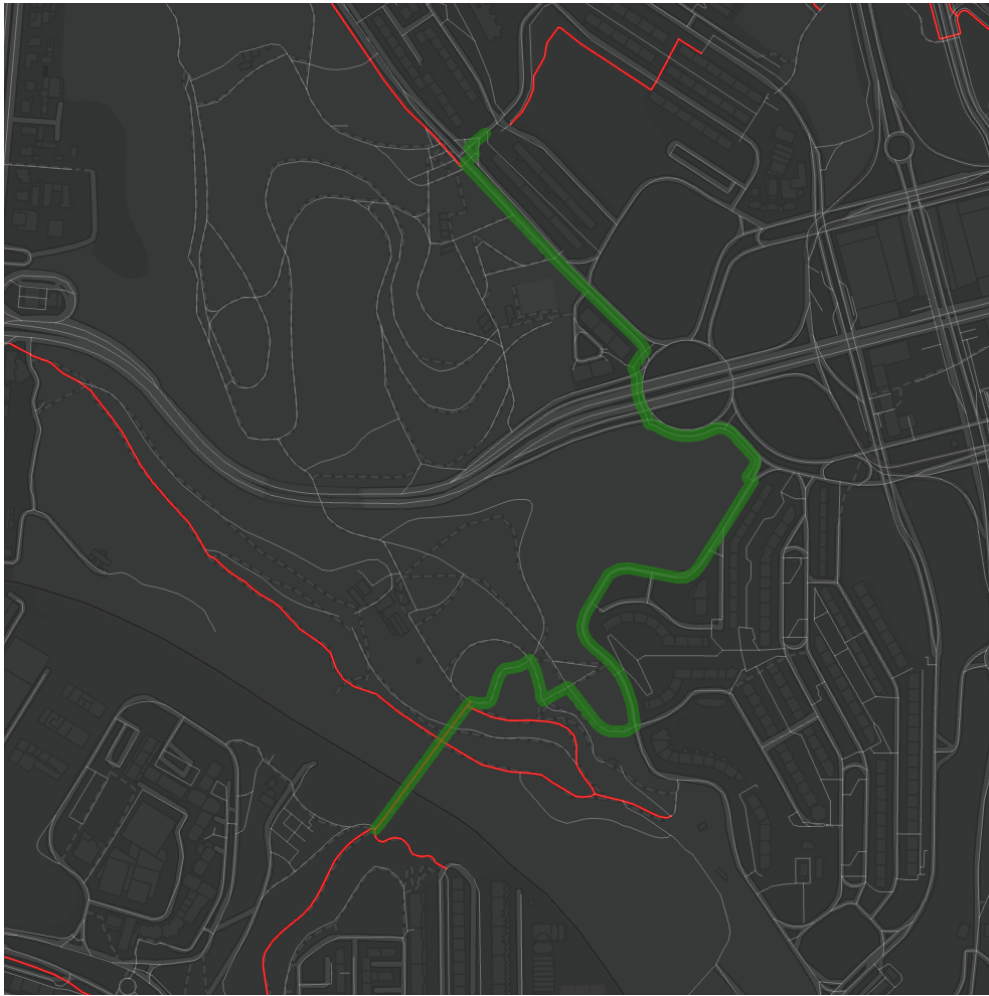
Anexo 3: Detalhe dos segmentos sem classificação hierárquica



Anexo 4: Quebra dos segmentos: a verde um segmento do túnel na Av. da República



Anexo 5: Rota criada pelo ComSIG para o parque da Bela Vista



Anexo 6: Script em R para importação da rede do OSM e limpeza da mesma

```
# #instalar packages
pkgs = c("sf", "raster", "slopes", "geodist", "tmap",
"igraph","tidyverse","rlang")
remotes::install_cran(pkgs, quiet = TRUE)
# # uncomment these lines if line 5 doesn't work...
remotes = c("stplanr", "osmextract")
install.packages(pkgs)
# install.packages("remotes", quiet = TRUE)
# remotes::install_github("ropensci/osmextract")
# remotes::install_github("ropensci/stplanr")
# remotes::install_github("ropensci/slopes")
#importar packages
install.packages("mapview")
library(tidyverse)
library(sf)
library(osmextract)
library(stplanr)
library(igraph)
library(raster)
library(geodist)
library(slopes)
library(tmap)
library(mapview)

#download da última versão da rede OpenStreetMaps
portugal_osm = oe_get("Portugal", provider = "geofabrik", stringsAsFactors =
FALSE, quiet = FALSE, force_download = TRUE, force_vectortranslate = TRUE) #218
MB!
portugal_osm = st_read("geofabrik_portugal-latest.gpkg", layer= "lines")

#filtrar pelas categorias que interessam
portugal_osm_filtered = portugal_osm %>%
  dplyr::filter(highway %in% c('primary', "primary_link",
'secondary',"secondary_link", 'tertiary', "tertiary_link", "trunk", "trunk_link",
'residential", "cycleway", "living_street", "unclassified", "motorway",
"motorway_link", "pedestrian", "steps", "service", "track","footway"))
  st_write(portugal_osm_filtered,"portugal_osm_comFOOTWAY.gpkg")
#saveRDS(portugal_osm_filtered, "portugal_osm_filtered.Rds")
portugal_osm_filtered = st_read("portugal_osm_comFOOTWAY.gpkg")
#portugal_osm_filtered = readRDS("portugal_osm_filtered.Rds")

#ir buscar os limites dos concelhos, segundo a CAOP 2019
Concelhos = st_read("shapefiles/ConcelhosPT.gpkg")
Concelhos$Concelho #Ver lista com os nomes dos concelhos disponíveis
ConcelhoLimite = Concelhos %>% filter(Concelho == "LISBOA") #aqui podemos
escolher outro qualquer

#Cortar a rede pelo concelho, com uma margenzinha
osm_lines_Concelho = st_crop(portugal_osm_filtered, ConcelhoLimite) #corta nos
bounding boxes, para não ficar tão pesado na operação seguinte
RedeOSM_Concelho = st_intersection(osm_lines_Concelho, geo_buffer(ConcelhoLimite,
dist=100)) #clip com um buffer de 100m, para as vias não ficarem cortadas

#limpar a rede dos segmentos que nao estão ligados à rede principal
RedeOSM_Concelho$group = stplanr::rnet_group(RedeOSM_Concelho)
table(RedeOSM_Concelho$group)
plot(RedeOSM_Concelho["group"])
RedeOSM_Concelho_clean = RedeOSM_Concelho %>% filter(group == 1) #o que tem mais
segmentos
mapview::mapview(RedeOSM_Concelho_clean) #verificar
```

```

#ir buscar à rede OSM Portugal apenas os segmentos com o mesmo id que os limpos
st_geometry(RedeOSM_Concelho_clean)
RedeViaria = portugal_osm_filtered %>% filter(osm_id %in%
RedeOSM_Concelho_clean$osm_id) #ficar apenas os segmentos da rede limpa
st_geometry(RedeViaria) #verificar se são LINESTRING

#partir os segmentos nos seus vértices internos, mas deixar os brunels ok
nrow(RedeViaria)
RedeViaria = stplanr::rnet_breakup_vertices(RedeViaria)
nrow(RedeViaria)
mapview::mapview(RedeViaria)
st_write(RedeViaria,"RedeViaria_breaks.gpkg")
getwd()
#importar o raster (modelo digital do terreno / digital elevation model)
DEM = raster("raster/LisboaIST_clip_rl_crs.tif") #mudar o raster dependendo do
município

res(DEM)#verificar a resolução, está em TM06, ETRS 89 (3763)

raster::plot(DEM)
RedeViaria = st_transform(RedeViaria,3763) #meter a rede na projectao do DEM

plot(sf::st_geometry(RedeViaria), add = TRUE) #verificar se coincidem

#calcular os declives de cada segmento (em absoluto)
RedeViaria$slope = slope_raster(RedeViaria, dem = DEM)
RedeViaria$declive = RedeViaria$slope*100 #em percentagem
summary(RedeViaria$declive)
RedeViaria$declive_class = RedeViaria$declive %>%
  cut(
    breaks = c(0, 3, 5, 8, 10, 20, Inf),
    labels = c("0-3: plano", "3-5: leve","5-8: médio", "8-10: exigente", "10-20:
terrível", ">20: impossível"),
    right = F
  )
round(prop.table(table(RedeViaria$declive_class))*100,1)

#transformar novamente em 4326
#RedeViaria = st_transform(RedeViaria, 4326) #meter na projectao do DEM

# exportar shapefile com os declives, em gpkg (QGIS)
st_write(RedeViaria, "RedeViariaLisboa_declivesIST.shp", append=F)
# st_write(RedeViaria, "shapefiles/RedeViariaBraga_declives.kml", append=F)

```

Anexo 7: Script em R para cálculo das ponderações dos fatores de custo

```

input_directory <- "C:/Users/Public/Documents/COMSIG/RREDE"
output_directory <- "C:/Users/Public/Documents/COMSIG/RREDE"

install.packages(c("sf", "sp", "igraph", "tidygraph", "dplyr"))

library(sf)
library(sp)
library(igraph)
library(tidygraph)
library(dplyr)

# ler a shapefile
Join <- st_read(file.path(input_directory, "Joined.shp"))

# mostrar as colunas
head(Join)

```

```

# Definir "Custo_car"
Join <- Join %>% mutate(Custo_car = if_else(car_speed_ < 50, 1, 10))
head(Join)

# Definir "custo_footway"

Join <- Join %>% mutate(cost_foot = if_else(highway == "footway", 1, 10))
head(Join)

# Criar um novo campo "Final_cost" com os valores calculados
Join <- Join %>% mutate(Final_cost = Custo_q * (1/2) + Custo_car * (1/8) +
speedfacto * (1/8) + cost_foot * (1/4))
head(Join) # Check

# Criar "Cost_dist" que é Final_cost multiplicado pelo Shape_len
Join <- Join %>% mutate(Cost_dist = Final_cost * Shape_len)
head(Join) # Check

output_shapefile_path <- file.path(output_directory,
"Joined_with_Cost_Dist4.shp")

# Exportar a shapefile
st_write(Join, output_shapefile_path, delete_layer = TRUE)

cat("Shapefile with 'Final_cost' and 'Cost_dist' fields saved to",
output_shapefile_path, "\n")

```

Anexo 8: Script em R para criação de pontos aleatórios

```

### Criação de pontos aleatórios ###

destination_shapefile <- file.path(input_directory, "Escola_telheiras.shp")
output_points_shapefile <- file.path(output_directory, "random_points.shp")

# ler a shapefile
destination <- st_read(destination_shapefile)
print("Shapefile de destino lida")

# extrair as coordenadas de destino
destination_point <- st_coordinates(destination)[1, ] # Assuming one point
destination_crs <- st_crs(destination) # Get the CRS of the destination
shapefile

# função para gerar pontos
generate_random_points <- function(destination_coords, crs, num_points = 604,
max_distance = 3000) {
  set.seed(123) # For reproducibility

  # criar uma dataframe
  points <- data.frame(x = numeric(0), y = numeric(0))

  for (i in 1:num_points) {
    # Gerar um ângulo aleatório entre 0 e 2π
    angle <- runif(1, 0, 2 * pi)

    # gerar uma distância aleatória com o inverso da distância
    distance <- rexp(1, rate = 1 / max_distance)

    # garantir que não é excedida a distância máxima
    while (distance > max_distance) {
      distance <- rexp(1, rate = 1 / max_distance)
    }
  }
}

```

```

    }

    # calcular novas coordenadas com base no ângulo e distância
    new_x <- destination_coords[1] + distance * cos(angle)
    new_y <- destination_coords[2] + distance * sin(angle)

    # adicionar os pontos à data frame
    points <- rbind(points, data.frame(x = new_x, y = new_y))
  }

  # converter para o sistema de coordenadas
  points_sf <- st_as_sf(points, coords = c("x", "y"), crs = crs)

  return(points_sf)
}

# Gerar pontos aleatórios
random_points <- generate_random_points(destination_point, destination_crs)

# Guardar numa shapefile
st_write(random_points, output_points_shapefile, delete_layer = TRUE)
print("Pontos aleatórios guardados")

```

Anexo 9: Script em R para a sobreposição de rotas para a escola

```

install.packages("sf")
install.packages("stplanr")
install.packages("dplyr")
library(sf)
library(stplanr)
library(dplyr)

#importar rotas
routes <- st_read("C:/Users/Public/Documents/COMSIG/RREDE/ComSIG2_EBSM.shp")
head(routes)

# Criar uma coluna de peso baseada no número de rotas
routes <- routes %>%
  mutate(weight = 1) # Here we simply use a weight of 1 for each route

# Usar a função overline
overlined_routes <- overline(routes, attrib = "weight")

#exportar
st_write(overlined_routes,
"C:/Users/Public/Documents/COMSIG/RREDE/overline_EBSM2.shp")

```