

COMO EVOLUEM AS REDES RODOVIÁRIAS, CICLÁVEIS E PEDONAIS AO LONGO DO TEMPO? UMA ANÁLISE DA RETILINEARIDADE EM LISBOA, PORTUGAL

Miguel Costa^{1,2}, Manuel Marques² e Filipe Moura¹

¹ Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, Lisboa, Portugal

email: mncosta@isr.tecnico.ulisboa.pt, manuel@isr.tecnico.ulisboa.pt, fmoura@tecnico.ulisboa.pt

² Institute for Systems and Robotics, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1, Lisboa, Portugal

Sumário

As redes de infraestruturas urbanas de transporte condicionam o uso do espaço urbano e a circulação de pessoas e bens. A retilinearidade corresponde ao rácio entre a distância percorrida pela rede e a distância euclidiana. Esta métrica é um indicador crítico da morfologia urbana e de eficiência das redes de transportes, na medida em que pode medir a atratividade de diferentes rotas para uma determinada viagem entre um par origem-destino (OD). Neste trabalho comparamos medidas de retilinearidade para as redes pedonal, ciclável e motorizada para analisar como estas evoluíram ao longo do tempo e se as mudanças no espaço urbano produziram mudanças significativas de retilinearidade. Desta forma, analisámos a cidade de Lisboa no período 2013-2020 e verificámos que é crucial analisar cada tipo de rede de forma separada no planeamento ou modelação urbana. Identificámos mudanças na retilinearidade para os diferentes modos, nomeadamente refletindo a mudança significativa da rede ciclável de Lisboa. O nosso trabalho demonstra que a retilinearidade é um indicador útil e que pode ser usado para modelar e projetar mudanças no espaço e redes urbanas e otimizar locais para intervenções de modo a melhorar a atratividade dos modos ativos e promover uma mobilidade mais sustentável.

Palavras-chave: Retilinearidade; Redes de infraestruturas urbanas de transportes; Rede ciclável; Lisboa (Portugal)

1 INTRODUÇÃO

A rede viária de uma cidade molda a forma como as pessoas utilizam o espaço tanto para a acessibilidade às atividades como para lá chegarem, ou seja, a mobilidade. Facilita ou dissuade o acesso às atividades socioeconómicas e determina a sustentabilidade ambiental em função dos modos utilizados. Por conseguinte, o desenho intrínseco da rede viária influencia a forma como as cidades crescem e as suas necessidades de transporte ao longo do tempo. Enquanto antigamente o planeamento da mobilidade urbana privilegiava os modos motorizados e, em particular, o carro privado, as políticas atuais avançam numa direção de sustentabilidade, orientando os sistemas de transporte para soluções mais eficientes, concentrando-se em proporcionar experiências seguras, confortáveis e positivas na utilização de transportes públicos e partilhados, nas distâncias mais longas, e para peões e ciclistas, nas distâncias mais curtas. Desta forma o ambiente construído tem um efeito notável nas decisões de viagem, e o contexto espacial é vital [1]. A análise da relação entre o espaço físico, forma urbana, a acessibilidade, e os transportes torna-se fundamental para compreender como os sistemas de transportes podem ser adaptados e melhorados para beneficiar todos.

A análise do desempenho das vias urbanas, tanto em termos de eficiência (para cumprir objetivos funcionais) como de utilização (para satisfazer a procura), pode ajudar a compreender como se pode promover tais experiências positivas. Baseamos o nosso trabalho neste pressuposto, utilizando a retilinearidade (uma medida de eficiência da rede urbana [2]), juntamente com dados e ferramentas abertas, promovendo, em última análise, a utilização de uma metodologia facilmente reproduzível para analisar como as cidades são diferentes para diferentes modos de transporte. A retilinearidade mede a relação entre as distâncias percorridas pela rede e as distâncias em linha reta.

Em suma, esta serve como base para medir a atratividade de rotas e pode servir como ponto de partida na comparação de diferentes zonas de uma cidade ou mesmo cidades inteiras, numa perspetiva de desempenho da rede. No nosso trabalho, medimos e comparamos a retilinearidade de três redes: rodoviária, ciclável e pedonal.

A ideia de tentar descrever e analisar como as redes de transporte têm impacto na vivência e perceção das cidades não é nova [3], [4]. A análise de redes de infraestruturas urbanas surge principalmente da teoria de grafos e de como a topologia das redes pode descrever tanto a sua estrutura como a sua eficiência [5]. As características da rede e respetivas métricas, tais como conectividade ou centralidade, ajudam a diferenciar desenhos de rede e, portanto, o potencial de procura de transportes [4], [6]. O crescente interesse em compreender a estrutura de redes urbanas levou à investigação de métricas como a *completeness* [4], conectividade [7], *treeness* [7], centralidade [8], densidade [4], entre outras. Para tentar quantificar a estrutura espacial das redes de transporte das cidades, estas métricas podem apoiar o planeamento urbano uma vez que são ferramentas para simular diferentes cenários e comparar diferentes sistemas de rede [3], [10]. Por sua vez, os planeadores e decisores podem acompanhar a evolução das redes através da avaliação do desempenho de transportes [11] e tomar decisões mais rápidas e precisas em áreas que podem necessitar de intervenção [5], [8], [11].

Neste trabalho, embora o planeamento urbano deva analisar e combinar diferentes métricas, concentramo-nos apenas na retilinearidade, uma vez que é um resultado direto da forma como as redes são planeadas e construídas [9], e, em comparação, as redes de transportes têm impacto na forma como as pessoas utilizam a rede viária tanto para a acessibilidade às atividades socioeconómicas como para a mobilidade que determina a intensidade de uso de um segmento da rede [12], [13]. A retilinearidade pode medir a atratividade dos locais porque as viagens mais retilíneas (ou mais diretas) implicam menos desvios e tornam-se mais atrativas para a distância a percorrer entre um par OD.

A retilinearidade já foi estudada para diferentes modos de transporte: carro [14]–[17], bicicleta [16], andar a pé [15], [16], [18], [19], e transporte público [20]. Diferentes modos de transporte utilizam diferentes tipos de redes. Por exemplo, os peões podem usar passeios, enquanto os carros não podem, e vice-versa, os carros podem usar autoestradas enquanto os peões não podem. A análise distinta da retilinearidade de cada rede de transporte é essencial uma vez que cada modo de transporte pode ser associado a uma rede diferente. Foram também estudadas comparações entre os diferentes modos de transporte em várias cidades dos E.U.A. [15] e na capital tailandesa [16] e foram encontradas diferenças estatísticas entre andar de carro, a pé e de bicicleta. Os resultados mostram que as viagens a pé são tipicamente mais retilíneas do que as de bicicleta ou de carro. No entanto, [16], [17] também notaram diferenças entre medidas de retilinearidade entre zonas (bairros, freguesias) de uma cidade, sugerindo que devemos analisar a retilinearidade ao nível destas unidade territoriais de uma cidade para uma melhor compreensão da rede.

Os principais objetivos deste trabalho são: i) apresentar uma metodologia baseada em dados abertos e ferramentas para analisar os diferentes modos de transporte em redes viárias urbanas; ii) analisar a evolução da retilinearidade ao longo do tempo e explorar se (e como) as mudanças infraestruturais influenciaram a retilinearidade destas redes.

Neste sentido, Lisboa, Portugal, é o nosso caso de estudo e analisamos a retilinearidade para três redes de infraestruturas de transportes: rodoviária, ciclável e pedonal. Lisboa mudou nos últimos anos, com o município a investir em infraestruturas tanto para andar de bicicleta como a pé. Utilizamos a metodologia apresentada para compreender se as intervenções do município produziram mudanças significativas na retilinearidade ao longo do tempo.

2 METODOLOGIA

Usámos a rede para cada modo de transporte e calculámos pontos origem-destino. De seguida, simulámos viagens entre cada par OD para cada tipo de rede e modo. Com isto, calculámos a distância percorrida através de cada rede e a distância euclidiana entre o ponto de origem e destino para, por último, calcular os valores de retilinearidade.

2.1 Dados e redes urbanas

Primeiro, começamos por extrair o ficheiro de rede correspondente ao nosso caso de estudo. Para isso, extraímos o ficheiro histórico do OpenStreetMaps de Portugal através do GeoFabrik¹. Os dados provenientes do OpenStreetMaps contêm informação geográfica resultante da contribuição voluntária de diferentes utilizadores. Estes dados contêm características sobre o ambiente e redes urbanas como a tipologia das estradas, a existência de lojas ou árvores, entre outros. Em suma, usamos estes dados para filtrar as diferentes tipologias de rede (rodoviária, ciclável e pedonal) de forma a simular diferentes viagens para os diferentes modos de transportes. Mais, estes dados têm informação histórica, servindo para analisar a evolução do espaço urbano ao longo do tempo.

Usando estes dados, filtramos a cidade de Lisboa dos dados nacionais de forma a capturar os limites urbanos do município lisboeta. De seguida, estes dados são filtrados de forma anual para extrair o estado das redes urbanas em cada ano. Assim, filtramos o ficheiro histórico ao dia 1 de janeiro de cada ano, entre o período 2013-2020, totalizando 8 redes diferentes, uma para cada ano.

2.2 Pontos origem-destino

Segundo, fazemos uma amostragem de pontos origem e pontos destino. Um total de 100 000 pares de pontos origem-destino (OD) são amostrados de forma a obter uma boa cobertura da cidade. Estes pontos são utilizados para simular as viagens entre cada origem e destino. Mais, este procedimento é efetuado com uma abordagem anisotrópica, onde os pontos amostrados dependem dos padrões de mobilidade que variam na cidade. Para isso fazemos uma amostragem que segue viagens efetuadas pelos cidadãos. O inquérito à mobilidade (IMob – Inquérito à Mobilidade) foi realizado em 2017 para caracterizar a mobilidade da população, os seus padrões diários, entre outras variáveis. Neste sentido, capturamos uma amostra anónima deste inquérito, incluindo pontos origem e destino. Em suma, este processo garante uma amostragem anisotrópica em que os pares OD seguem viagens feitas por diferentes indivíduos, o que permite uma melhor análise sobre a rede que é de fato usada pelas pessoas.

2.3 Simulação de viagens

Terceiro, fazemos simulação de viagens para os três modos de transporte (carro, bicicleta e andar a pé) usando o OpenRouteService². Este permite usar o serviço *Directions*, o qual faz a simulação de uma viagem entre dois pontos para um dado modo de transporte, tendo em conta a rede urbana fornecida. Assim, simulamos uma viagem para cada par OD amostrado (100 000 pares de pontos), para cada modo de transporte (carro, bicicleta e andar a pé), para cada rede anual extraída do OpenStreetMaps (8 anos para o período 2013-2020), totalizando 2.4 milhões de viagens simuladas.

Para simular cada tipo de transporte, utilizamos os perfis padrão do OpenRouteService: *driving-car* (carro), *cycling-regular* (bicicleta) e *walking-foot* (andar a pé). Os perfis podem ser customizados para que cada modo tenha diferentes restrições sobre que tipo de via ou atributos podem ser usados na simulação de viagem. Os perfis padrões foram utilizados devido à sua simplicidade e adequabilidade. Os detalhes sobre cada perfil podem ser encontrados em [21]. Em suma, as viagens de carro são efetuadas pelo caminho mais rápido entre a origem e destino. As viagens de bicicleta são simuladas restringindo a utilização de vias rápidas (p.e. autoestradas) pelas bicicletas e peões. É dada uma preferência à utilização de ciclovias pelas bicicletas sempre que possível. As viagens a pé são simuladas preferencialmente por passeios ou outras vias restritas a peões. No fim, são simuladas três viagens distintas para cada modo, como exemplificado na Figura 1.

2.4 Retilinearidade

A retilinearidade mede o rácio entre a distância percorrida pela rede e a distância euclidiana entre uma origem e um destino. A Figura 1 exemplifica estas duas distâncias para uma única viagem e pode ser definida por

$$C_{ik} = \frac{d_{ik}^n}{d_i^t} \quad (1)$$

¹ <https://download.geofabrik.de/europe/portugal.html>

² <https://openrouteservice.org/>

onde C_{ik} é o valor da retilinearidade entre a distância pela rede d_{ik}^n e a distância euclidiana d_i^l , para um par OD i e modo k . A distância euclidiana corresponde à ortodromia entre estes dois pontos, enquanto a distância pela rede equivale à distância simulada através do OpenRouteService para um par OD e modo $k \in \{\text{carro}, \text{bicicleta}, \text{andar a pé}\}$.

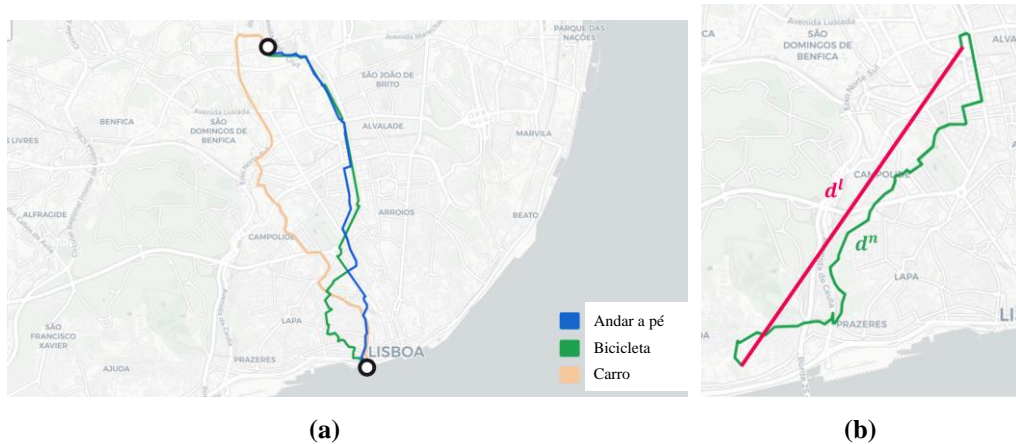


Fig.1. Viagens através da rede rodoviária (laranja), ciclável (verde) e pedonal (azul) para um dado par origem-destino (a) e a retilinearidade como rácio entre a distância percorrida pela rede e a distância euclidiana (b).

2.5 Caso de estudo: Lisboa

Abrangendo mais de 100 km², cerca de meio milhão de pessoas residem em Lisboa (quase 5% da população de Portugal). Lisboa compreende 24 freguesias com diferentes áreas, populações, e densidades residenciais e trabalho. As freguesias de Santa Maria Maior, Misericórdia, São Vicente e Santo António correspondem ao centro histórico da cidade, onde se encontram muitas atrações turísticas. Avenidas Novas e Parque das Nações são os *Central Business Districts* (CBD) de Lisboa, onde se encontram as principais empresas multinacionais e nacionais. Outras freguesias, tais como Lumiar e Benfica, são predominantemente residenciais. Na Figura 2 pode-se observar a localização de cada freguesia lisboeta que são muito diversas no que diz respeito ao acesso às redes de transporte, seja para utilizadores de carro, bicicleta ou viagens a pé.



Fig.2. Freguesias de Lisboa

O último inquérito sobre a mobilidade dos lisboetas foi realizado em 2017. O IMob (Inquérito à Mobilidade) mostrou que os residentes de Lisboa fazem um total de 935 253 viagens, diariamente. Estas têm um tempo médio de viagem de 23.1 minutos e uma distância média de viagem de 4.2 km [22]. Os veículos motorizados privados foram os mais utilizados com 46% de quota modal, os transportes públicos foram responsáveis por 22% de todas

as viagens, 29,8% foram viagens a pé, e apenas 0,6% usaram a bicicleta [22]. A quota modal da bicicleta permanece baixa devido à forte fragmentação da rede ciclável, falta de locais para guardar ou trancar as bicicletas em segurança e uma perceção geral de um ambiente urbano pouco ciclável por parte da população [23].

A partir de 2008, o centro histórico da cidade tem sofrido muitas transformações. Alguns dos 18 km de margens do rio foram reabilitados para melhorar a acessibilidade dos peões, e programas como “Uma Praça em Cada Bairro” aumentaram a acessibilidade pedonal ao comércio e empregos locais. Estas mudanças também promovem os transportes públicos e os modos ativos, ao mesmo tempo que dissuadem a utilização do automóvel, impondo restrições de estacionamento. O município de Lisboa remodelou também o CBD desde 2016, reduzindo a capacidade e limites de velocidade das avenidas arteriais. Simultaneamente, foi criada uma rede de ciclovias mais interligada, principalmente no CBD e na zona ribeirinha do Tejo. A quota modal de bicicletas subiu de 0.2% em 2011 [24] para 0.6% em 2018 [22], e a expansão das infraestruturas cicláveis e a implementação de um sistema partilhado de bicicletas têm sido vitais para o crescimento da maturidade ciclável de Lisboa [25].

3 RESULTADOS

Depois de simular 100 000 viagens na cidade de Lisboa, apresentamos os valores de retilinearidade para os três modos de transporte entre 2013 e 2020. Em primeiro, mostramos a evolução da retilinearidade média ao longo do tempo em Lisboa. Detalhamos os três modos e para diferentes distâncias de viagens. Depois, olhamos com mais detalhe as diferentes freguesias de Lisboa, identificando variações e, em particular, como a expansão da infraestrutura para o modo ciclável teve um impacto notável na retilinearidade deste modo.

3.1 Retilinearidade média

A Figura 3 mostra a média da retilinearidade para os diferentes tipos rede (rodoviária, ciclável e pedonal) entre 2013 e 2020. Nota-se uma tendência decrescente nos valores da retilinearidade para o modo ciclável e pedonal, ao passo que tal tendência não é evidente para as viagens de carro. Em particular, 2016 parece ser um ponto de viragem para os modos ativos, correspondendo à maior expansão da rede de ciclovias de Lisboa (ver Figura 4). Por outro lado, as viagens de carro são mais distantes do que as viagens de bicicleta que, por sua vez, são mais distantes do que as viagens a pé.

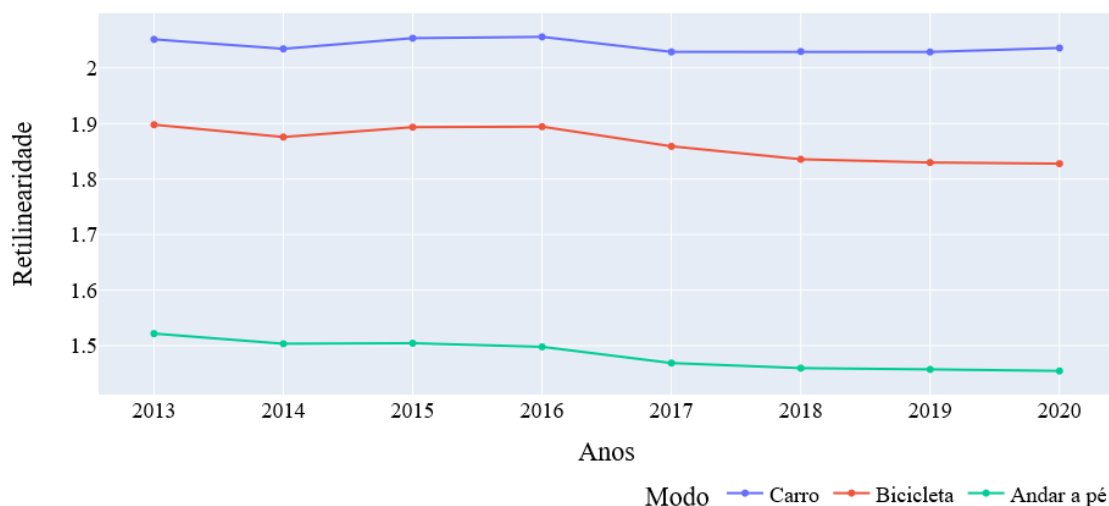


Fig.3. Retilinearidade média para os diferentes modos de transporte.

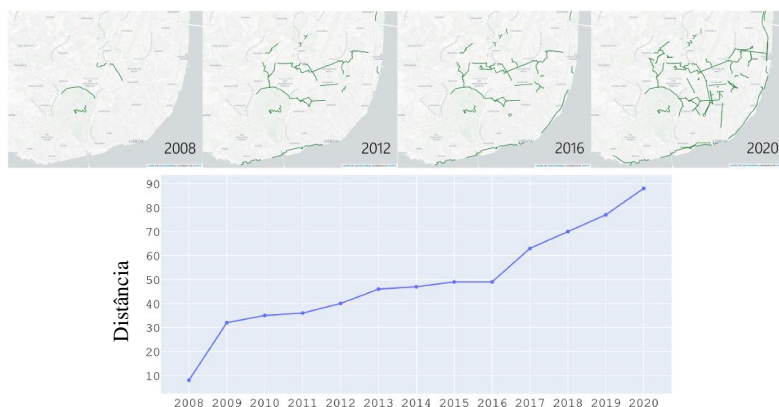


Fig. 4. Evolução das ciclovias existentes em Lisboa e a sua distância total em km [26].

Se, por um lado, a retilinearidade média ajuda numa análise mais generalizada, uma análise mais detalhada pode ser benéfica se as viagens forem categorizadas de acordo com a distância percorrida. Neste sentido a Figura 5 mostra as viagens simuladas divididas em quatro intervalos de distância: 0 – 1 km, 1 – 2 km, 2 – 8 km, e 8 – 12 km. Mais uma vez, a retilinearidade diminui à medida que a distância de viagem aumenta, sendo que as viagens até um quilómetro são muito menos retilíneas para carros e bicicletas. Entre 2 e 8 km, para 2013 e 2014, as viagens de carro são tão retilíneas como as viagens de bicicleta. A partir de 2015, estas tornam-se ligeiramente menos retilíneas que as de bicicleta. Para maiores distâncias de viagem, os ciclistas irão percorrer percursos mais distantes, aumentando os níveis de retilinearidade. Isto mostra que existe uma falta de conectividade de infraestrutura ciclável entre regiões mais distantes em Lisboa.

Finalmente, analisamos a variação da média de ciclovias com as mudanças no comprimento total da rede ciclável. De 2013 a 2020, foram construídos 55,4 km de ciclovias em Lisboa, nos quais se verificou uma redução da retilinearidade média para o modo ciclável de cerca de 0,09. Entre 2016 e 2017, foram construídos 23,15 km de ciclovias, coincidindo com a maior diminuição da retilinearidade durante o mesmo período, como se vê na Figura 4, que representa cerca de 50% da diminuição total para o período 2013 – 2020.

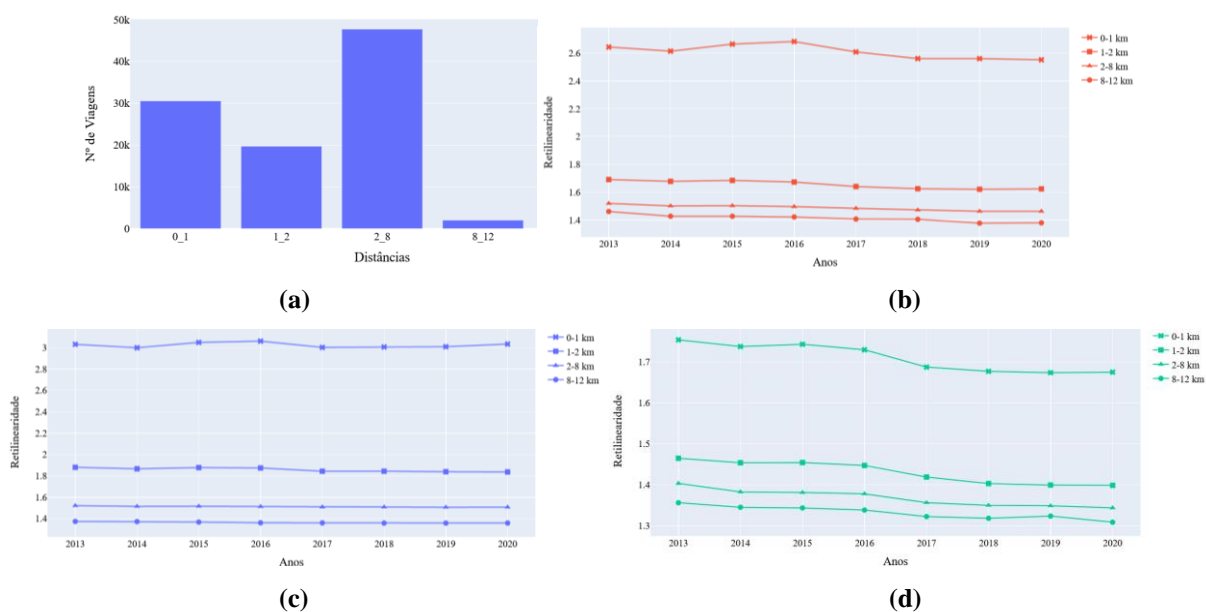


Fig.5. Número de viagens por categoria de distância percorrida (a) e retilinearidade média diferentes categorias de distâncias de viagens para os diferentes modos: (b) Carro, (c) Bicicleta e (d) Andar a pé.

3.2 Retilinearidade em diferentes freguesias

A Figura 6 ilustra a retilinearidade mediana para viagens que começam e terminam na mesma freguesia para diferentes distâncias de viagem para o ano 2020 de forma a verificar o desempenho da rede atual. Como podemos ver, existem diferenças significativas nas 24 freguesias de Lisboa. Em geral, para deslocações mais curtas (<2 km), conduzir é menos retilíneo que andar de bicicleta que, por sua vez, é menos retilíneo que andar a pé. Para viagens entre 2 e 8 km, as viagens de carro são tão retilíneas como as de bicicleta, exceto para a freguesia da Ajuda. Por último, para percursos superiores a 8 km, o carro parece ser a melhor opção comparativamente às viagens de bicicleta e a pé. Considerando que a distância média de viagem dos lisboetas é 4.2 km, verifica-se que para esta categoria de distâncias (2 – 8 km), o carro parece tão atrativo como a bicicleta quando se trata da distância percorrida, o que pode ajudar a explicar o domínio do carro de Lisboa, mas que também sugere a existência de um potencial para a utilização da bicicleta em vez do carro.

Por outro lado, se considerarmos todo o período da nossa análise, notamos algumas particularidades de como a retilinearidade alterou-se ao longo do tempo. As Figuras 7 e 8 ilustram a evolução da retilinearidade média entre 2013 e 2020 para viagens entre 2 e 8 km para duas freguesias em Lisboa: Parque das Nações e Carnide. Ambas as freguesias tiveram múltiplas intervenções na infraestrutura de transportes com, entre outras, a construção de ciclovias. No Parque das Nações, verifica-se o crescimento da infraestrutura ciclável no período 2015 – 2019. Igualmente, neste período existe uma evolução no decréscimo da retilinearidade do modo ciclável que acompanha este crescimento do número de ciclovias. O mesmo acontece na freguesia de Carnide, onde observamos uma diminuição da retilinearidade ciclável coincidente com a construção de ciclovias nesta freguesia.

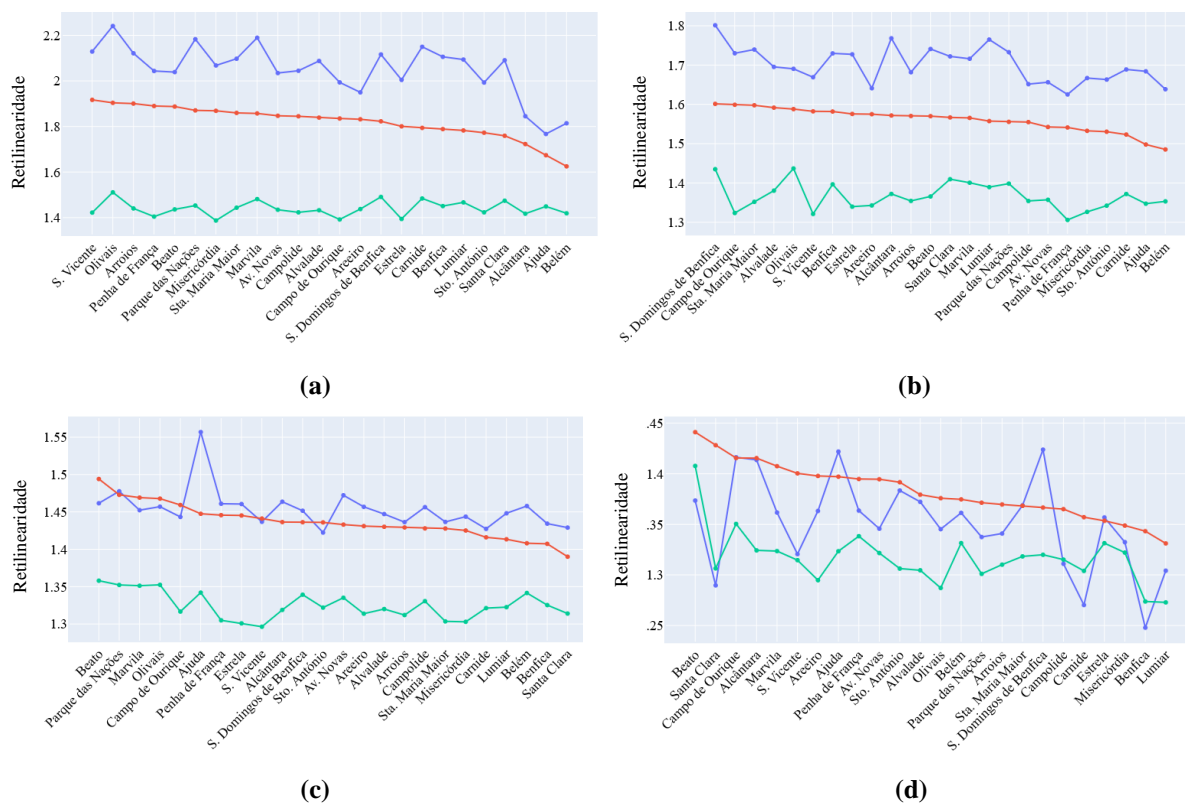


Fig. 6. Retilinearidade por freguesia lisboeta para os modos de carro (azul), bicicleta (vermelho) e andar a pé (verde) para as distâncias de viagem entre 0 – 1 km (a), 1 – 2 km (b), 2 – 8 km (c) e 8 – 12 km (d)

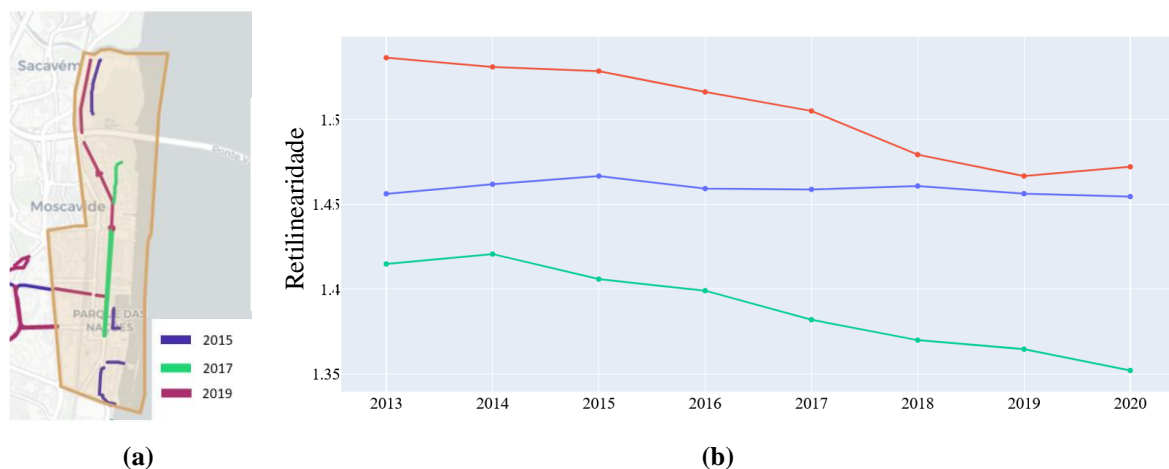


Fig.7. Evolução da infraestrutura ciclável na freguesia do Parque das Nações (a) e a evolução da retilinearidade média na mesma freguesia para viagens entre 2 e 8 km (b) para viagens de carro (azul), bicicleta (vermelho) e a pé (verde).

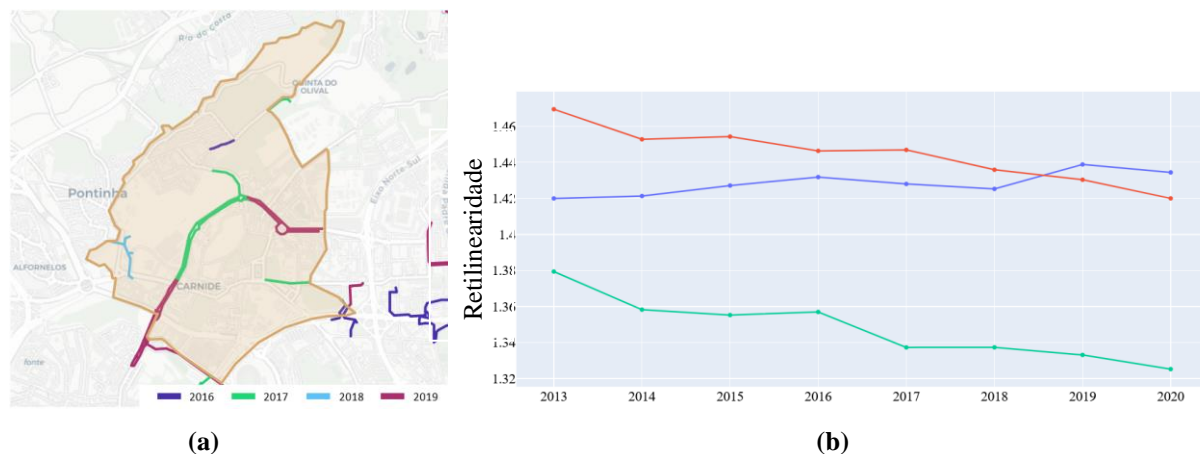


Fig.8. Evolução da infraestrutura ciclável na freguesia de Carnide (a) e a evolução da retilinearidade média na mesma freguesia para viagens entre 2 e 8 km (b) para viagens de carro (azul), bicicleta (vermelho) e a pé (verde).

3.3 Discussão

A retilinearidade serve como métrica para medir a atratividade de viagens para diferentes modos e pode ser usada para analisar e comparar diferentes zonas de uma cidade ou mesmo comparar cidades. Os nossos resultados mostram que a retilinearidade está a diminuir, especialmente para viagens de bicicleta e a pé, consistentemente com as mudanças infraestruturais ocorridas em Lisboa.

As freguesias lisboetas têm tendências diferentes a este respeito. Algumas apresentam padrões semelhantes de retilinearidade para quem conduz, anda de bicicleta ou caminha, enquanto outras variavam substancialmente entre modos. No seu conjunto, os nossos resultados confirmam a investigação de [16], [17] de que a retilinearidade deve ser analisada a escalas inferiores e não à escala da cidade. A categorização das viagens com base na distância da viagem também permitiu uma análise mais refinada. Notamos que à medida que a distância da viagem aumenta, a retilinearidade tende a diminuir. Tal análise pode ser utilizada no estudo do impacto de diferentes intervenções no espaço urbano. Para percursos de 2 a 8 km (que incluem a distância média de viagem em Lisboa [22]), notamos que a retilinearidade para o carro é, em alguns casos, inferior à retilinearidade da bicicleta e da andar a pé. Assim sendo, os carros particulares podem ser vistos como os mais atrativos quando se analisa a distância percorrida. Se o objetivo do município é promover modos mais sustentáveis, substituindo os modos motorizados privados [27], então deve ser colocada uma ênfase clara no aumento na atratividade destes modos sustentáveis.

Olhando para a evolução da retilinearidade ao longo dos anos para as freguesias de Lisboa, notamos também como a retilinearidade mudou em particular para as viagens de bicicleta, a par das melhorias e da extensão da rede de ciclovias. No entanto, em alguns casos, a construção de tais infraestruturas não mostra qualquer impacto aparente nos níveis de retilinearidade, sugerindo que ou não são atrativas em termos de distância percorrida ou que não são apropriadas para as viagens em estudo. Outro facto interessante relaciona-se com a extensão das pistas cicláveis existentes, e a sua utilização para viagens dentro da mesma freguesia. Por exemplo, 16.31% das viagens nas Avenidas Novas recorrem a ciclovias, com 16.65 km de ciclovias existentes. No Beato, que tem apenas 1.26 km de ciclovias, 23.72% das viagens são feitas em ciclovias. A freguesia das Avenidas Novas é fortemente servida pela ciclovia do eixo central que é a espinha dorsal da rede cicloviária de Lisboa. No entanto, não é utilizada para viagens intra-freguesia, servindo mais para se ligar a outras partes da cidade. No caso do Beato, a infraestrutura que existe é pequena, mas significativa para acomodar as viagens locais de bicicleta.

Este estudo apresentou uma metodologia capaz de calcular e comparar de forma eficiente os valores da retilinearidade para diferentes modos de transporte e diferentes níveis de escala. No entanto, se por um lado se baseia em dados geográficos abertos e voluntários, por outro lado, baseia-se largamente na qualidade de tais dados. A nossa análise evidencia a influência da qualidade dos dados. Por exemplo, as viagens a pé não utilizam passeadeiras ou passeios, o que aponta para a inexistência e falta de qualidade dos dados relativos às infraestruturas pedonais. Em Lisboa, a grande maioria das ruas tem passeios, sendo que o impacto de tal representação defeituosa da rede pedonal não é relevante. No entanto, pode não ser o caso de outras cidades onde são feitas análises semelhantes.

4 CONCLUSÕES

A retilinearidade serve como métrica para medir a atratividade de viagens para diferentes modos, com base na distância percorrida. Esta pode ser usada para analisar e comparar regiões, cidades, ou até diferentes freguesias numa dada cidade. Neste trabalho usamos a retilinearidade para comparar viagens de carro, bicicleta e a pé em Lisboa, de 2013 a 2020, recorrendo a uma metodologia facilmente reproduzível.

Os resultados mostram uma diminuição da retilinearidade nos modos ativos, de forma consistente com as mudanças infraestruturais ocorridas em Lisboa. Comparamos ainda freguesias de Lisboa e identificamos várias diferenças entre elas, quer a desigualdade entre os três modos de transporte, quer para diferentes distâncias de viagens. Este método de análise pode contribuir para um melhor planeamento das infraestruturas de transportes ou identificar locais que necessitem de alterações mais prementes. Assim, a retilinearidade serve como métrica objetiva para comparar modos e redes de transportes.

Para trabalhos futuros, identificamos novas oportunidades de investigação. Em primeiro lugar, foi colocada uma ênfase particular na análise da retilinearidade ciclável de Lisboa. Lisboa, uma cidade com baixa maturidade ciclável, deve ser comparada com outras cidades cujo foco e partilha modal são distintos, tais como Copenhaga ou Amesterdão, para identificar se podem ser encontradas diferenças significativas entre as tipologias de diferentes cidades. Em segundo lugar, poderia ser desenvolvida uma ferramenta de otimização para identificar quais as infraestruturas urbanas que poderiam mudar para atingir objetivos específicos de retilinearidade e acessibilidade. Finalmente, os transportes públicos e as viagens multimodais também poderão ser considerados também para efeitos comparativos com os restantes modos, nomeadamente o carro privado.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia via bolsa [PD/BD/142948/2018] e os autores agradecem também à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo financiamento [UIDB/04625/2020] do centro de investigação CERIS e [UIDB/50009/2020] do dentro de investigação LARSyS.

6 REFERÊNCIAS

- [1] M. Winters, M. Brauer, E. M. Setton, and K. Teschke, “Built environment influences on healthy transportation choices: bicycling versus driving,” *J. urban Heal.*, vol. 87, no. 6, pp. 969–993, 2010.
- [2] J. Huang and D. M. Levinson, “Circuitry in urban transit networks,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 48, pp. 145–

- 153, 2015.
- [3] S. Derrible and C. Kennedy, “Characterizing metro networks: state, form, and structure,” *Transportation (Amst)*, vol. 37, no. 2, pp. 275–297, 2010.
- [4] P. Parthasarathi, “Network structure and metropolitan mobility,” *J. Transp. Land Use*, vol. 7, no. 2, pp. 153–170, 2014.
- [5] F. Ahmadzai, K. M. L. Rao, and S. Ulfat, “Assessment and modelling of urban road networks using Integrated Graph of Natural Road Network (a GIS-based approach),” *J. Urban Manag.*, vol. 8, no. 1, pp. 109–125, 2019.
- [6] D. M. Levinson and A. M. El-Geneidy, “Network Circuitry and the Location of Home and Work,” *Network*, pp. 1–23, 2007.
- [7] D. Levinson, “Network structure and city size,” *PLoS One*, vol. 7, no. 1, 2012.
- [8] P. Crucitti, V. Latora, and S. Porta, “Centrality in networks of urban streets,” *Chaos an Interdiscip. J. nonlinear Sci.*, vol. 16, no. 1, p. 15113, 2006.
- [9] G. Boeing, “Urban spatial order: Street network orientation, configuration, and entropy,” *Appl. Netw. Sci.*, vol. 4, no. 1, p. 67, 2019.
- [10] J. Carpio-Pinedo, J. A. Martínez-Conde, and F. L. Daudén, “Mobility and Urban Planning Integration at City-regional Level in the Design of Urban Transport Interchanges (EC FP7 NODES Project–Task 3.2.1.),” *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 160, pp. 224–233, 2014.
- [11] A. E. Dingil, F. Rupi, and Z. Stasiskiene, “A macroscopic analysis of transport networks: the influence of network design on urban transportation performance,” *Int. J. Transp. Dev. Integr.*, vol. 3, no. 4, pp. 331–343, 2019.
- [12] D. Levinson and A. El-Geneidy, “Network Circuitry and the Location of Home and Work,” in *University Transport Study Group Conference, Harrowgate, England, 2007*.
- [13] D. Levinson and A. El-Geneidy, “The minimum circuitry frontier and the journey to work,” *Reg. Sci. Urban Econ.*, vol. 39, no. 6, pp. 732–738, 2009.
- [14] D. J. Giacomini and D. M. Levinson, “Road network circuitry in metropolitan areas,” *Environ. Plan. B Plan. Des.*, vol. 42, no. 6, pp. 1040–1053, 2015.
- [15] G. Boeing, “The morphology and circuitry of walkable and drivable street networks,” in *The mathematics of urban morphology*, Springer, 2019, pp. 271–287.
- [16] Y. Yen, P. Zhao, and M. T. Sohail, “The morphology and circuitry of walkable, bikeable, and drivable street networks in Phnom Penh, Cambodia,” *Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci.*, p. 2399808319857726, 2019.
- [17] K. M. Cubukcu, “Using circuitry as a network efficiency measure: the example of Paris,” *Spat. Inf. Res.*, pp. 1–10, 2020.
- [18] S. O’Sullivan and J. Morrall, “Walking distances to and from light-rail transit stations,” *Transp. Res. Rec.*, vol. 1538, no. 1, pp. 19–26, 1996.
- [19] J. Dill, “Measuring network connectivity for bicycling and walking,” in *83rd annual meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC, 2004*, pp. 11–15.
- [20] J. Huang and D. M. Levinson, “Circuitry in urban transit networks,” *J. Transp. Geogr.*, vol. 48, pp. 145–153, 2015.
- [21] Heidelberg Institute for Geoinformation Technology (HeiGIT), “OpenRouSteService,” *GitHub repository*. GitHub, 2020.
- [22] INE, I. P., “Mobilidade e funcionalidade do território nas Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa 2017.” 2018.
- [23] F. Moura, J. Silva, and L. Picado Santos, “Growing from incipient to potentially large cycle networks: Screening the road network of the consolidated urban area of Lisbon,” *Eur. J. Transp. Infrastruct. Res.*, vol. 17, pp. 170–190, 2017.
- [24] I. P. INE, “Censos 2011 resultados definitivos-Portugal,” *Lisboa-Portugal Inst. Nac. Estatística, IP*, 2012.
- [25] R. Félix, P. Cambra, and F. Moura, “Build it and give ‘em bikes, and they will come: The effects of cycling infrastructure and bike-sharing system in Lisbon,” *Case Stud. Transp. Policy*, vol. 8, no. 2, pp. 672–682, 2020.
- [26] GISLisboa, “Rede Ciclável,” 2020.
- [27] C. M. de Lisboa, “MOVE LISBOA Visão Estratégica para a Mobilidade 2030,” 2020.