

Bike-Index – um índice de acessibilidade velocípede recorrendo a programação em ambiente SIG

Nuno Sousa^{1,2} nuno.sousa@uab.pt

Eduardo Natividade-Jesus^{1,3} ednativi@isec.pt

João Coutinho-Rodrigues^{1,4} coutinho@dec.uc.pt

¹ Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra

² Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Aberta

³ Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra

Resumo

Um índice de acessibilidade velocípede – *Bike-Index* – é apresentado, baseado no esforço metabólico do ciclista como medida da impedância entre origens e destinos e nas limitações impostas por esse esforço. Adequado para estudar a acessibilidade velocípede em cidades declivosas, o *Bike-Index* requer um Sistema de Informação Geográfica e a programação de *scripts* nesse ambiente. A metodologia de cálculo é apresentada e aplicada a um caso-de-estudo, a cidade de Coimbra, Portugal, e os resultados revelam que a acessibilidade está dependente tanto da centralidade como do relevo, sendo que este penaliza zonas de encosta e planaltos mal servidos de equipamentos urbanos.

Palavras-chave: acessibilidade, modo de transporte velocípede, programação de *scripts*, sistemas de informação geográfica

Title: Bike-Index – a cycling accessibility index using GIS environment programming

Abstract

A cycling accessibility index – *Bike-Index* – is presented, based on the metabolic effort of the cyclist as measure of impedance between origins and destinations, and the limitations imposed by that effort. Adequate to study cycling accessibility in hilly cities, the *Bike-Index* requires a Geographical Information System and script programming in that environment. The calculation methodology is presented and applied to a case-study, the city of Coimbra, Portugal, results showing that accessibility depends both on centrality and topography, the latter penalizing hill-side zones and plateaus with few urban facilities.

Keywords: accessibility, cycling transport mode, scripting, geographical information systems

1. Introdução

A segunda metade do Séc. XX viu o modo de transporte automóvel atingir uma preponderância muito vincada nas viagens urbanas, potenciado pela abundância de combustíveis e comodidade de uso. No entanto, a evidência das últimas décadas veio por em causa a sustentabilidade deste *status-quo*, quer por razões ambientais, quer a nível energético, além do atingir de níveis críticos de congestionamento de tráfego e estacionamento. Conscientes da necessidade de reagir às imposições da realidade, muitos investigadores e decisores políticos têm-se virado para modos ativos de transporte, vendo neles uma forma promissora de mitigação dos problemas de mobilidade urbana (Forsyth e Krizek, 2010; Donovan, 2015; Tight, 2016).

Os modos ativos de transporte, definidos como modos que exigem atividade física por parte do utente e no qual se incluem os modos pedonal e velocípede, combinam a disponibilidade de uso com outras vantagens importantes: são não-poluentes e inclusivos, causam pouco congestionamento e trazem benefícios para a saúde. Além disso, são competitivos com o automóvel e transportes públicos para distâncias curtas, mas que podem ir até aos 5 km para o modo velocípede (IMT, 2012; p.32). Na verdade, os velocípedes, veículos movidos a pedal ou manivela, são veículos capazes de atingir altas velocidades (Parkin, 2018), o que o torna o modo velocípede o mais atrativo dos modos ativos e o que mais potencial tem para substituir o automóvel nas deslocações urbanas. Contudo, o fomento do modo velocípede traz requer um planeamento cuidado e investimentos avultados, dada não só a elevada complexidade do ambiente urbano contemporâneo como também a necessidade de satisfazer as exigências de desenho e engenharia que a prática consagrou como fundamentais para que os velocípedes conquistem um *share* modal significativo (Parkin, 2018).

O estudo da acessibilidade é dos principais instrumentos para o planeamento de uma rede para velocípedes, ou rede ciclável, eficaz. A acessibilidade é um conceito multifacetado que ainda hoje apresenta desafios a vários níveis, principalmente para os modos ativos (van Wee, 2016). Uma das formas clássicas de pensar a acessibilidade é como uma impedância, ou seja, como a dificuldade que a procura (p.ex. munícipes) tem em alcançar a oferta de oportunidades (p.ex. equipamentos urbanos). Quando o meio de transporte é o velocípede, a rede ciclável é o elemento que une estas origens e destinos. Sob esta visão, de acessibilidade como desutilidade, i.e. quanto menor, melhor, o estudo da acessibilidade requer calcular impedâncias entre a miríade de origens e destinos de uma cidade, medidas ao longo de uma rede também ela com milhares de arcos e nós. Tal tarefa requer, naturalmente, uma ferramenta de cálculo especializada.

Os sistemas de informação geográfica (SIG) são ambientes de trabalho que interligam bases de dados com informação georreferenciada. Usados para manipular, processar e representar essa informação, a sua importância tem vindo a crescer, fruto, entre outros, de avanços no poder de cálculo e disponibilidade dos computadores modernos. Indispensáveis quando se analisam grandes volumes de informação geográfica são, por conseguinte, a ferramenta natural para executar cálculos de acessibilidade em redes. São também munidos de

funcionalidades de *scripting*. Normalmente escritos em linguagens interpretadas como o VBA ou Python e agindo sobre as bases de dados, os *scripts* estendem vastamente as opções dos utilizadores para manipular e processar informação geográfica e dela obter praticamente tudo o que necessitam para os seus estudos.

Este artigo apresenta um instrumento, o *Bike-Index*, para analisar a acessibilidade velocípede de uma cidade, passo indispensável para a construção de um ambiente urbano sustentável. Baseado na acessibilidade como desutilidade e usando o esforço humano como impedância, o *Bike-Index* é um indicador local, obtido para cada ponto da cidade recorrendo a *scripting* em SIG. A sua forma de cálculo é também um exemplo de como as competências de programação são cada vez mais necessárias no mundo moderno. À medida que as abordagens programáticas vão aparecendo em praticamente todas as ciências, mecanizando processos analíticos, chegando por vezes a substituir o julgamento humano, torna-se cada vez mais evidente o crescimento da importância do ensino da Informática.

O *Bike-Index* é uma metodologia inovadora que contribui para o estado-da-arte em estudos de acessibilidade ativa ao introduzir o esforço metabólico como impedância, conceito avançado por Sousa et al. (2017) para o modo pedonal e que, de acordo com a recente revisão bibliográfica exaustiva sobre acessibilidade ativa de Vale et al. (2016), nunca antes foi considerado na literatura. Permite também a obtenção de mapas detalhados de acessibilidade de média/larga escala, com a precisão que o decisor desejar, apenas restringida pela capacidade do *hardware* utilizado.

2. Bike-Index: metodologia de cálculo

O *Bike-Index* destina-se essencialmente a responder à questão de quais seriam as oportunidades de interação que um utilizador do modo velocípede teria ao alcance da sua residência, e quanto valerá a importância social destas. Essa informação é subsequentemente usada para calcular um indicador numérico, cujo valor será o *Bike-Index* para o local de residência desse utilizador. A questão é formulada assumindo que o utilizador terá disponível uma rede ciclável adequada e que estará disposto a usar um velocípede até um máximo de esforço metabólico, i.e. até um certo ponto de cansaço físico. A partir desse ponto será mais plausível que o utilizador escolha um outro modo de transporte. O esforço metabólico, medido em joules (energia), toma, pois, o papel de impedância entre origens e destinos e foi escolhido para esse efeito por ser adequado a cidades declivosas (i.e. de relevo acidentado), uma vez que o esforço físico de pedalar é altamente dependente do declive dos percursos (Parkin e Rotherham, 2010). Note-se que muitas cidades europeias foram originalmente edificadas em zonas de encosta por razões históricas. Em cidades onde o relevo não tenha um papel preponderante poderão, sem perda de generalidade, ser usadas outras impedâncias como p.ex. a distância, o tempo de viagem ou até a distância ponderada pela adequabilidade da infraestrutura ciclável.

2.1. Princípios gerais

Na definição de origens e destinos toma-se em consideração que o *Bike-Index* é calculado para cada local da zona de estudo. Assim, define-se como origens os centros geométricos (centróides) de uma quadrícula construída sobre a malha urbana. Como destinos define-se os equipamentos urbanos dentro da zona de estudo, que providenciam as oportunidades de interação constantes nos diversos conceitos de acessibilidade. Na perspetiva de acessibilidade como desutilidade, a definição clássica (Hansen, 1959) é:

$$A_i = \sum_j I_{ij}w_j \quad (1)$$

Onde:

A_i : acessibilidade da origem i .

I_{ij}, w_j : impedância entre a origem i e o destino j ; importância (peso, *weight*) do destino j .

Para a implementação em SIG desta definição são necessárias três bases de dados de informação geográfica, as *feature classes* (FC) das origens, destinos e rede velocípede. Uma quarta peça é um mapa de vista aérea da área de estudo, essencial para a representação dos resultados. As FC das origens e destinos em geral dispensam programação de *scripts*. Já a rede velocípede tem de ser munida de informação respeitante ao esforço metabólico para cruzar os arcos e é precisamente neste passo que a programação de *scripts* SIG é necessária.

2.2. Preparação dos dados

A FC das origens é obtida gerando uma grelha quadrangular de 50 m × 50 m sobre a cidade, juntamente com os respetivos centróides. Em seguida, procede-se ao cálculo em SIG da distância dos centróides à rede velocípede e removem-se todos os elementos (polígonos e centróides) que se encontrem a mais de 100 m da rede, de modo a evitar que zonas despovoadas sejam mais tarde representadas nos mapas de acessibilidade e também para eliminar imprecisões devido a distâncias de *snapping* excessivas. A dimensão da grelha e da distância máxima para a remoção de quadrículas e centróides são arbitrários e ajustáveis conforme o grau de precisão desejado.

A FC dos destinos é obtida externamente, junto das entidades estatais responsáveis pelo ordenamento do território, em formato compatível (p.ex. *shapefile*). É também necessário definir os pesos dos tipos de equipamento (w_j), tendo em consideração a importância que cada tipo tem no quotidiano de uma pessoa. A Tabela 1 abaixo apresenta uma proposta de pesos, considerando 19 tipos de equipamentos.

Como veremos abaixo, o *Bike-Index* é definido em função da distância aos equipamentos mais próximos. No caso de viagens pendulares casa-emprego o ciclista não tem a opção de “ir ao emprego mais próximo”, razão pela qual nesta lista não é possível incluir os empregadores mais importantes da cidade.

Tabela 1. Peso dos diversos tipos de equipamento urbano

Grande Importância ($w_j = 3$)	Importância média ($w_j = 2$)	Menor Importância ($w_j = 1$)
Infantários e Escolas Primárias	Escolas de Ens. Secundário	Assoc. Culturais e Desportivas
Mercearias	Centros Comerciais	Câmara Municipal
Padarias e Pastelarias	Entretenimento	Correios
Escolas de 2º e 3º Ciclo	Acesso Primário de Saúde	Ensino Superior
	Farmácias	Equipamentos Desportivos
	Restaurantes	Forças de Segurança
		Igrejas
		Juntas de Freguesia
		Lares e Associações Sociais

A FC da rede velocípede, doravante designada por ‘rede’, pode ser obtida junto de entidades estatais. A sua forma primitiva é usualmente apenas um conjunto georreferenciado de linhas poligonais e nodos de junção. Regra geral a rede velocípede segue muito de perto a rede viária de uma cidade pelo que, na maioria dos casos, a última será suficiente, além de mais fácil obtenção. Poderá inclusive ser obtida da API *OpenStreetMap* ou *Google Earth*. A primeira operação a realizar sobre a rede é a colocação de informação altimétrica nas linhas poligonais que formam os arcos. Se a rede não tiver já esta informação de raiz, ela pode ser obtida p.ex. pelo cruzamento de um modelo digital de superfície com a rede. A informação altimétrica permite atribuir a cada secção da linha poligonal um declive e haverá de seguida que proceder, por meio de um *script*, ao cálculo dos declives médios a subir ou descer, ponderados ao comprimento de cada secção. O resultado deste cálculo é o seguinte conjunto de grandezas: L_{up} , L_{down} , L_0 , S_{up} , S_{down} , que indicam, para cada arco da rede, respetivamente o comprimento a subir, a descer, no plano, declive médio a subir e a descer. Estas grandezas são guardadas nas tabelas associadas da FC da rede, sendo os declives arredondados ao inteiro mais próximo, por razões que se tornarão claras mais adiante. Uma vez que a rede é orientada, estas grandezas são calculadas num sentido específico, o sentido *From-To*. Para efeitos de cálculos em rede, quando um arco é percorrido no sentido contrário (*To-From*), os valores *up* e *down* são trocados.

A preparação dos dados requer a programação da rede para inclusão do esforço metabólico que o ciclista faz para percorrer cada arco. Uma vez que a magnitude deste esforço depende do sujeito, considera-se para o efeito um ciclista de peso médio 80 kg e um velocípede do tipo bicicleta de 15 kg. A programação da rede deve atender às seguintes condições.

A. O ciclista realizará o seu percurso montado na bicicleta, desde que o declive a vencer não seja excessivo, tanto a subir como a descer. Assim, para valores de declives iguais ou inferiores a -13% e iguais ou superiores a 8%, considera-se que o ciclista desmontará da bicicleta e percorrerá todo esse arco a pé, no primeiro caso por razões de segurança e no segundo caso por os 8% serem o ponto a partir do qual a energia metabólica consumida por unidade de tempo a pedalar passa a ser superior à energia consumida a andar. Ou seja, 8% é

o ponto em que pedalar se torna mais cansativo do que andar. Nas ocasiões de desmonte, para o cálculo da energia a andar foi usada a fórmula de Minetti et al. (2002).

B. Para declives em que o ciclista segue a sua viagem montado na bicicleta (-12% a +7%), a energia metabólica foi calculada a partir dos valores da potência mecânica média passada às rodas da bicicleta, como função do declive (Parkin e Rotherham, 2010). Para declives entre -12% e -3% a energia metabólica é zero, uma vez que o ciclista rola apenas por efeito da gravidade. Para declives entre -2% e +7% a energia metabólica foi obtida de $E = \frac{PL}{\eta v}$, com P a potência mecânica passada às rodas, L o comprimento do segmento de arco, v a velocidade média para o declive em causa e η o rendimento metabólico, que para o pedalar se situa entre os 20 e 25%. É sabido que este rendimento diminui à medida que o esforço aumenta, razão pela qual se considerou um rendimento de 25% entre -2% e 2% de declive e uma diminuição de 1% no rendimento por cada 1% de declive positivo adicional. Todos estes valores são resumidos na Tabela 2.

Tabela 2. Velocidade média, potência mecânica e rendimento metabólico como funções do declive

Declive (%)	v (m/s)	P (W)	η (%)
-3	6,72	0	25
-2	6,49	54	25
-1	6,25	104	25
0	6,01	151	25
1	5,61	183	25
2	5,21	211	25
3	4,81	232	24
4	4,41	248	23
5	4,01	259	22
6	3,61	263	21
7	3,21	261	20

C. Para declives de 5 a 7% é sabido que o ciclista apenas está disposto a percorrer, em média, um comprimento máximo de 240 m (5-6%) e 120 m (7%) (AASHTO, 1999; p.39). Assim, para arcos que apresentem declives s_{up} nestes valores e que tenham L_{up} superiores aos limites AASHTO, considera-se que o ciclista percorre esses comprimentos montado e que desmonta da bicicleta para o comprimento a subir remanescente do arco.

Atendendo às condições das alíneas A, B e C, há então que obter e adicionar à FC da rede duas grandezas, as energias metabólicas E_{bike_FT} e E_{bike_TF} , que correspondem à energia necessária para o ciclista percorrer cada arco da rede nos sentidos respetivamente *From-To* e *To-from*, tendo em conta a divisão dos arcos em segmentos a subir, a descer e plano. O cálculo desta energia pode ser feito usando as ferramentas de *scripting* do ambiente SIG e o resultado deve ser colocado nas tabelas associadas da rede. Apresenta-se abaixo um exemplo de *script* Python para o caso *From-To*, adequado à ferramenta *field calculator* do ambiente ESRI ArcGIS. Neste *script*, os campos, `Len_Up_efe`,

Len_Down_e, L0, DeclUp_Int e DeclDown_I referem-se respetivamente a L_{up} , L_{down} , L_0 , S_{up} , S_{down} .

```
def metabolic_power(x):
    eff_base = 0.25
    eff_3 = 0.24
    eff_4 = 0.23
    eff_5 = 0.22
    eff_6 = 0.21
    eff_7 = 0.20
    if (x==0): return 151 * 1/eff_base
    elif (x==1): return 183 * 1/eff_base
    elif (x==2): return 211 * 1/eff_base
    elif (x==3): return 232 * 1/eff_3
    elif (x==4): return 248 * 1/eff_4
    elif (x==5): return 259 * 1/eff_5
    elif (x==6): return 263 * 1/eff_6
    elif (x==7): return 261 * 1/eff_7
    elif (x== -1): return 104 * 1/eff_base
    elif (x== -2): return 54 * 1/eff_base
    elif (x<= -3): return 0.0
    else: return 0.0

def v_bike(x):
    if (x==0): return 6.01
    elif (x==1): return 5.61
    elif (x==2): return 5.21
    elif (x==3): return 4.81
    elif (x==4): return 4.41
    elif (x==5): return 4.01
    elif (x==6): return 3.61
    elif (x==7): return 3.21
    elif (x== -1): return 6.25
    elif (x== -2): return 6.49
    elif (x<= -3): return 6.72
    else: return 0.0

def bike_power_to_energy_perUnitLength(x):
    if (x <= 7 and x >= -3): return metabolic_power(x)/v_bike(x)
    else: return 0.0

def minetti(x):
    y=x/100.0
    mass_human = 80.0
    mass_bike = 15.0
    athleteFactor = 1.0
    mass_tot = mass_human + mass_bike
    return mass_tot*athleteFactor*(280.5*y**5 - 58.7*y**4 - 76.8*y**3 +
51.9*y**2 + 19.6*y + 2.5)

def E_bike(x,len):
    max_len_7 = 120
    max_len_56= 240
    if (x <= -13): return minetti(x)*len
```

```
elif (x <=-3): return 0.0
elif (x >= 8): return minetti(x)*len
elif (x >= 7 and len >= max_len_7): return
bike_power_to_energy_perUnitLength(x)*max_len_7 + minetti(x)*(len-
max_len_7)
elif (x >= 5 and len >= max_len_56): return
bike_power_to_energy_perUnitLength(x)*max_len_56 + minetti(x)*(len-
max_len_56)
else: return bike_power_to_energy_perUnitLength(x)*len

__esri_field_calculator_splitter__

E_bike(!DeclUp_Int!,!Len_Up_efe!) + E_bike(!DeclDown_I!,!Len_Down_e!) +
E_bike(0,!L0!)
```

Para programar o caso *To-From* basta trocar a última expressão por

```
E_bike(!DeclUp_Int!,!Len_Up_efe!) + E_bike(!DeclDown_I!,!Len_Down_e!) +
E_bike(0,!L0!)
```

O último passo da programação da rede consiste na criação de um *Bike Network Dataset* a partir da rede. Este *Bike Network Dataset* é usado pelo SIG para cálculos de roteamento e deve ser embebido com a informação dos campos *Ebike_FT* e *Ebike_TF* e com os comprimentos 3D dos arcos da rede.

2.3. Obtenção dos Bike-Index

Programada a rede, o *Bike-Index* pode então ser calculado. Podemos definir este indicador de várias formas, sendo que neste trabalho se apresentam quatro possibilidades. A primeira avalia a acessibilidade absoluta de cada polígono da grelha em que a cidade foi dividida. Os outros três avaliam, de diferentes formas, a acessibilidade relativa, no sentido da fração de equipamentos ao alcance de cada polígono. Aqui “alcance” significa viagens origem-destino-origem (ida-e-volta) que impliquem um esforço máximo de 200 kJ, correspondente à energia metabólica tipicamente despendida numa viagem pedonal de ida-e-volta a um equipamento localizado a 500 m do centróide desse polígono (esforço total: 1000 m = 500 m ida + 500 m volta). Num dos índices esta distância não é fixa e depende da importância do equipamento. Mas vejamos as definições.

Bike-Index 0

Este indicador avalia o esforço metabólico médio necessário para aceder ao conjunto de todos os tipos de equipamento, pesado pela importância de cada tipo. O acesso dá-se desde o centróide *i* em consideração, até ao equipamento do tipo *j* mais próximo. A energia metabólica será, em joules, a energia despendida a ir e voltar em bicicleta do centróide ao equipamento, através do caminho mais curto, calculado pelos módulos de análise de redes do ambiente SIG usado (p.ex. *ArcGIS Network Analyst*, ferramenta *Closest Facility*). Note-se que não se minimiza a energia porque isto levaria a trajetos potencialmente mais longos, logo mais morosos, que não serão na prática a escolha do ciclista, cujo objetivo é minimizar o tempo de viagem e não o esforço a ela associado. Este procedimento, minimizar distância e acumular energia (impedância), foi seguido em todos os indicadores *Bike-Index*.

A implementação SIG deste indicador é agora apresentada e as grandezas obtidas nos cálculos intermédios serão depois usadas nos indicadores seguintes. Seja N o número de tipos de destinos (equipamentos). Recorrendo às ferramentas de análise de rede do SIG obter, para cada centróide i , o caminho mais curto entre i e o equipamento do tipo j mais próximo, usando a energia metabólica como variável de acumulação. Repetir o cálculo para o sentido equipamento-centróide, para cada tipo de equipamento e para o 2º e 3º equipamentos mais próximos (os dados para 2º e 3º equipamentos mais próximos são necessários para os *Bike-Index 2* e 3). Guardar os resultados na tabela associada da FC de centróides, que contará com $9N$ colunas suplementares. Adicionar mais uma coluna para cada tipo de equipamento, com a soma das energias nos dois trajetos (N colunas no total), designada por I_{ij}^{1st} . O *Bike-Index 0* é então calculado por um *script* que implemente, numa nova coluna, a fórmula $BI_i^0 = \frac{\sum_j I_{ij}^{1st} \omega_j}{\sum_j \omega_j}$.

Bike-Index 1 e 2

Estes são indicadores relativos, de certa forma mais humanos, dado que nos dão a fração de equipamentos ao alcance de uma viagem de bicicleta de dispêndio máximo de 200 kJ de energia, pesados pela sua importância. O valor destes indicadores oscila, pois, entre 0 e 1, com 0 a significar nenhum equipamento ao alcance de bicicleta e 1 que todos os tipos de equipamento estão ao alcance de bicicleta. Para o *Bike-index 1* um valor de, p.ex. $BI_i^1 = 0,75$, significará que 75% dos equipamentos estarão ao alcance do centróide i , valor pesados pela importância desses equipamentos. Já o *Bike-Index 2* permite avaliar a liberdade de escolha para cada tipo de equipamento ao alcance da bicicleta. Assim, se um centróide i tiver três equipamentos do mesmo tipo ao alcance, terá 100% de contribuição deste tipo de equipamento para o índice. Se tiver apenas dois, terá 90%. Se apenas um tiver ao alcance, 70%. Tal como o *Bike-Index 1*, este indicador oscilará entre 0 e 1, sendo que 1 indica que, para todos os tipos de equipamento, o centróide tem pelo menos três deles ao alcance de bicicleta.

Para o cálculo do *Bike-Index 1* é necessário criar N novas colunas na tabela associada da FC de centróides e preenchê-las com a variável binária X_{ij}^{1st} , 1 se a energia metabólica entre o centróide i e o equipamento mais próximo de tipo j (ida-e-volta) for igual ou inferior a 200 kJ, 0 se superior. Em seguida, usar um *script* para adicionar uma nova coluna com a fórmula $BI_i^1 = \frac{\sum_j X_{ij}^{1st} \omega_j}{\sum_j \omega_j}$. Para o *Bike-Index 2* haverá que adicionar mais $2N$ colunas, preenchidas com as variáveis binárias X_{ij}^{2nd} e X_{ij}^{3rd} , cuja definição é igual à de X_{ij}^{1st} , desta feita para o 2º e 3º equipamentos mais próximos. O índice é então obtido meio de um *script* que implemente, numa nova coluna, a fórmula $BI_i^2 = \frac{\sum_{jk} X_{ij}^k \omega_j l_k}{\sum_j \omega_j \sum_k l_k}$, com $k \in \{1st, 2nd, 3rd\}$ e $l_k = \{0,7; 0,2; 0,1\}$.

Bike-Index 3

Este último indicador reflete a frequência das deslocações. Considerou-se que os equipamentos mais importantes são visitados mais frequentemente, pelo que a disponibilidade do ciclista para realizar trajetos longos e mais cansativos é menor. Assim, os equipamentos de peso 3, mais importantes e portanto frequentados mais regularmente, só estarão ao alcance de um centróide se o esforço de ida-e-volta em bicicleta for inferior ao esforço pedonal de ida-e-volta no plano correspondente a 333 m (equipamento a 166,5 m ou 333 m no total ida-e-volta; energia 66,7 kJ). Idem para os equipamentos de peso 2, desta feita para 500 m (equipamento a 250 m; energia 100 kJ), e para os equipamentos de peso 1, mais raramente frequentados, para 1000 m (equipamento a 500 m e 200 kJ, como nos *Bike-Index 1* e 2). Este índice situa-se também entre 0 e 1, e considera, tal como o *Bike-Index 2*, os três equipamentos mais próximos, com $l_k = \{0,7; 0,2; 0,1\}$.

A implementação SIG do *Bike-Index 3* implica adicionar mais $3N$ colunas à tabela associada da FC dos centróides, com valores binários $X_{ij}^{k,\text{freq}}$, 1 se a energia metabólica entre o centróide i e o equipamento mais próximo de tipo j (ida-e-volta) for igual ou inferior a $(200 \text{ kJ})/\omega_k$, 0 se superior. Uma última coluna é por fim necessária, preenchida por um *script* que implemente a fórmula $BI_i^3 = \frac{\sum_{jk} X_{ij}^{k,\text{freq}} \omega_j l_k}{\sum_j \omega_j \sum_k l_k}$.

2.4. Representação dos resultados

Obtidos os *Bike-Index*, a sua representação é feita sob a forma de mapas de coloração graduada. É necessário fazer no SIG uma junção dos centróides com as quadrículas que os originaram, após o que se colora as quadrículas conforme o valor numérico dos índices.

3. Caso de estudo

A metodologia de obtenção dos *Bike-Index* foi implementada para a cidade de Coimbra. Coimbra é uma cidade declivosa situada no litoral-centro de Portugal, com cerca de 130 000 habitantes (censo 2011) e cujas principais atividades económicas são serviços de saúde, ensino superior e turismo. A Figura 1 abaixo mostra o relevo de Coimbra, juntamente com a identificação de algumas zonas que serão importantes para na análise de resultados.

A FC das origens (centróides) foi criada de acordo com o disposto na secção 2.2. A FC dos destinos (equipamentos) estava disponível de projetos anteriores e os pesos dos equipamentos usados foram os indicados na Tabela 2. Para a FC da rede velocípede usou-se uma rede viária disponível de projetos anteriores. Esta rede continha já informação dos valores de declives médios e comprimentos a subir, descer e no plano, pelo que não foi necessário correr nenhum *script* para obter estas grandezas. Na Figura 2 estão representadas as três FC para Coimbra.

3.1. Mapas dos índices

O procedimento descrito nas secções 2.3 e 2.4 foram aplicados e os mapas obtidos são apresentados abaixo. Na Figura 3 temos o mapa do *Bike-Index 0*. A unidade da legenda é o joule.

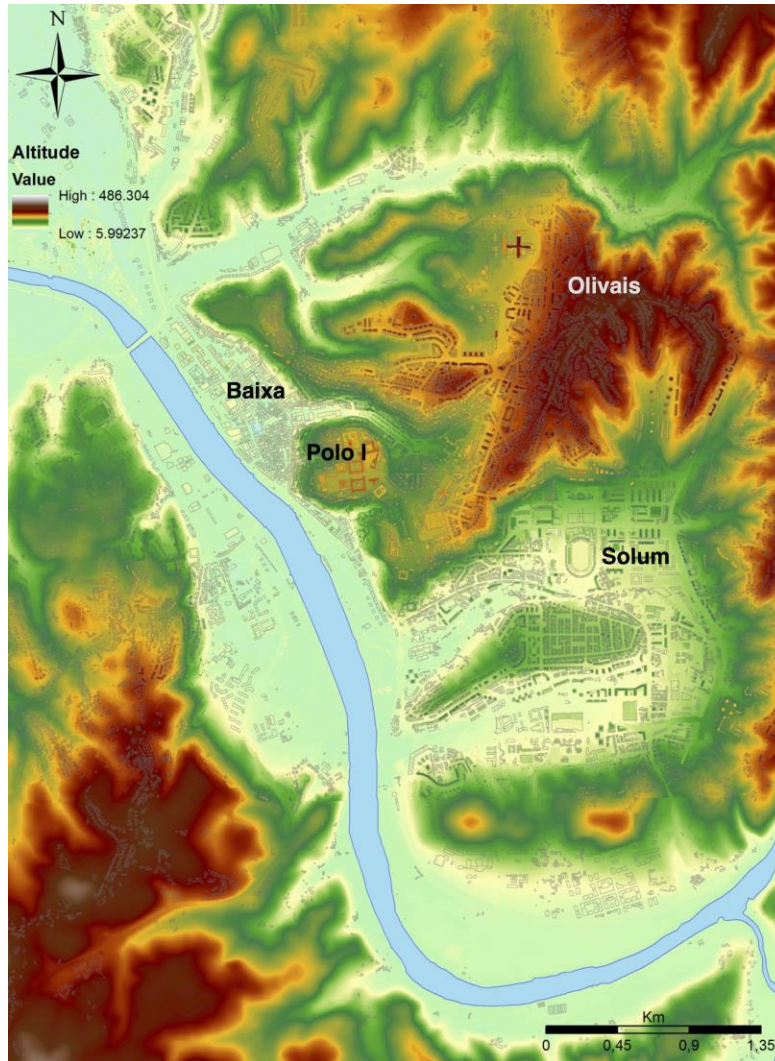


Figura 1. Relevo de Coimbra, Portugal

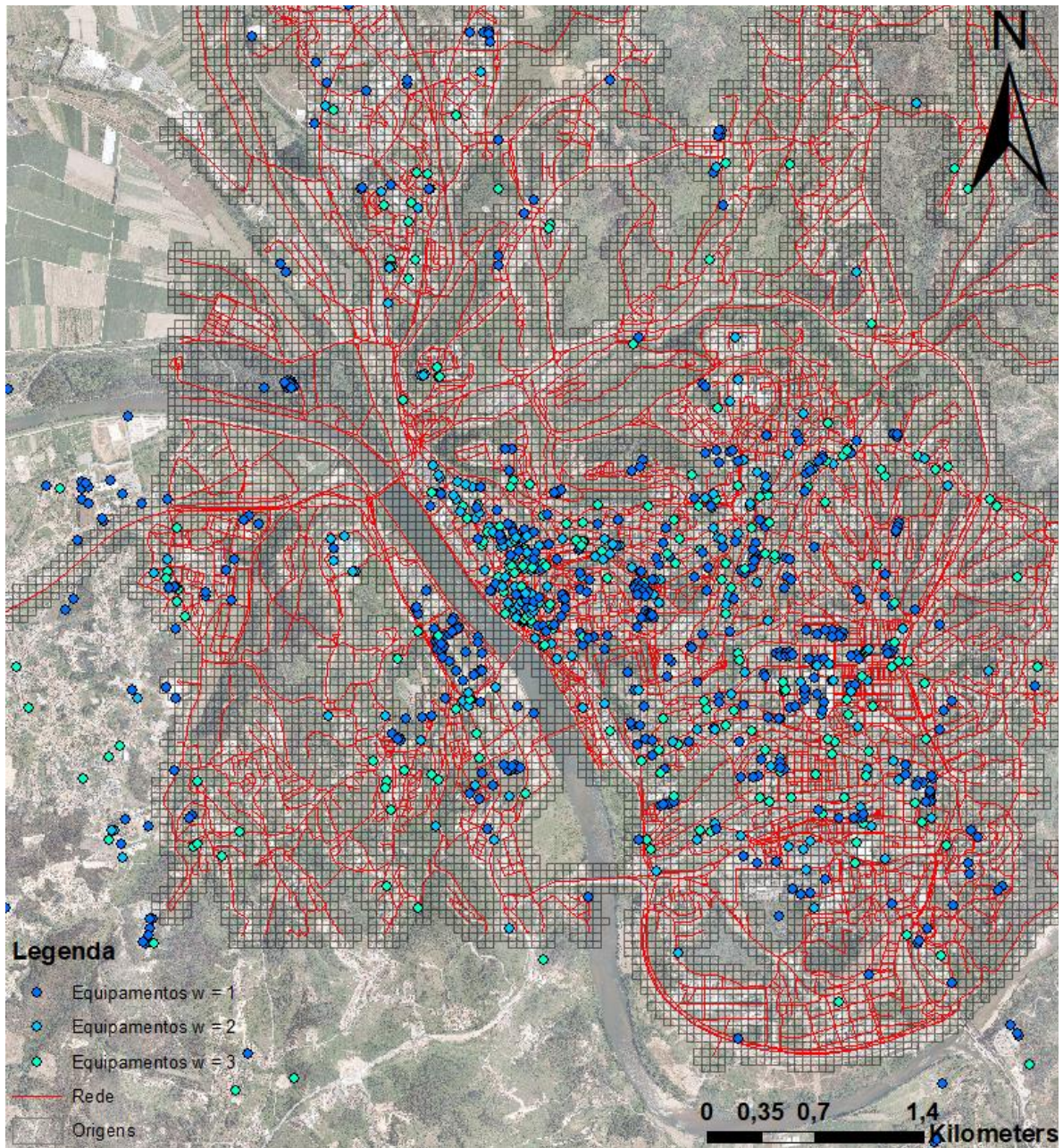


Figura 2. Equipamentos urbanos, quadrícula de origens e rede velocípede de Coimbra

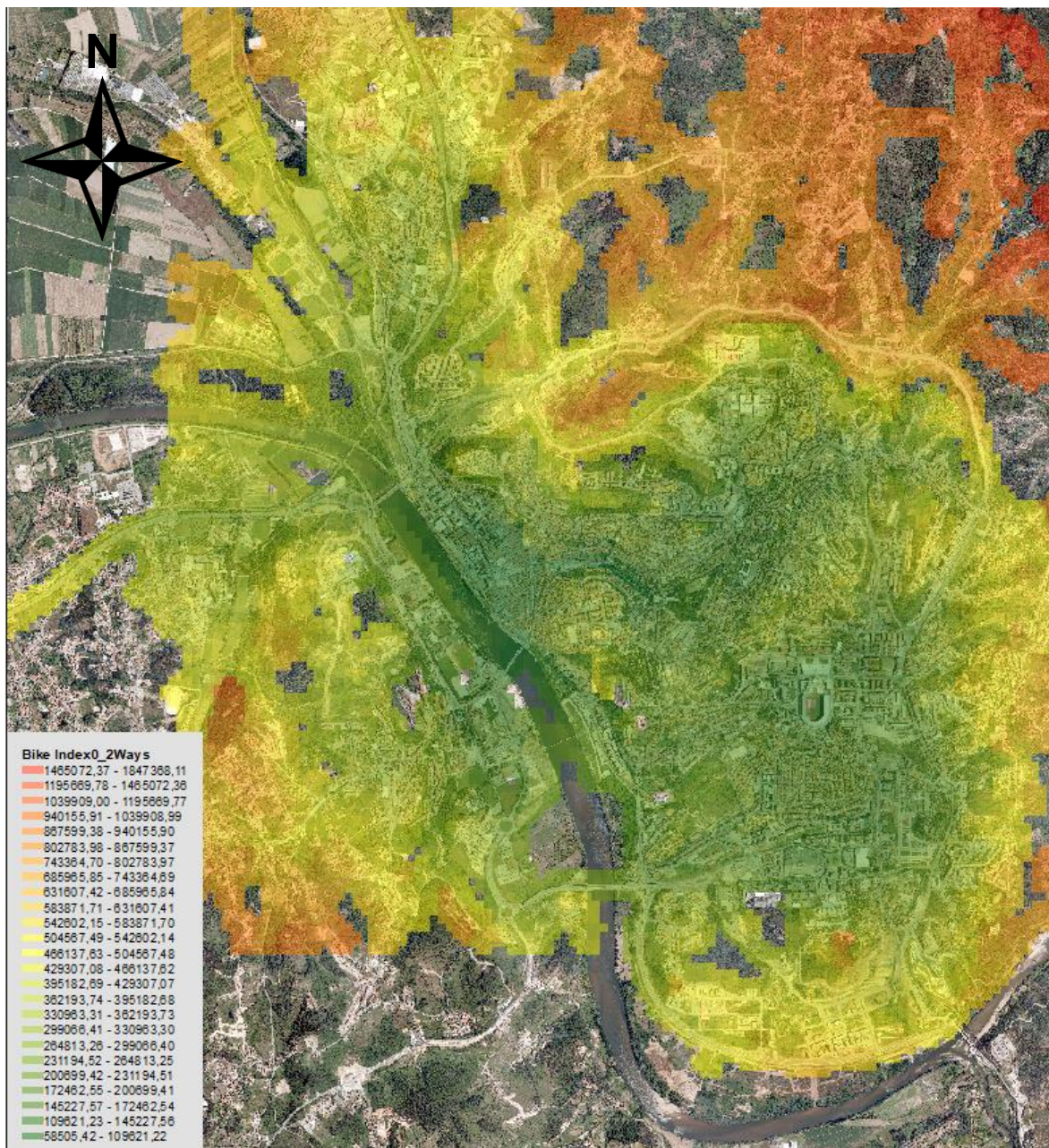


Figura 3. *Bike-Index 0* para Coimbra

A análise deste primeiro mapa revela que as zonas menos acessíveis são as zonas remotas da periferia da cidade, que apresentam valores de esforço médio entre 5 a 10 vezes maiores do que o esforço máximo admissível (recorde-se, 200 kJ). Os habitantes destas zonas, como não têm disponíveis equipamentos suficientes nas suas redondezas, têm de se deslocar ao centro da cidade. Ora, em modo velocípede estas deslocações exigem esforços muito além do que um ciclista está normalmente disposto a fazer. Nos locais mais centrais a situação é melhor embora existam, como esperado, algumas zonas de planalto e encostas com piores

índices comparativamente a zonas mais planas (Polo I da Universidade e encostas dos Olivais). Estas zonas apresentam valores de esforço médio aproximadamente duas vezes superior ao máximo admissível, o que significa que o uso da bicicleta só é uma opção plausível para algumas das deslocações a equipamentos mais próximos.

Passando ao *Bike-Index 1*, este está mapeado na Figura 4 abaixo. Este mapa confirma que as zonas com melhor acessibilidade são a Solum, a Baixa e o planalto dos Olivais comprovando, mais uma vez, que a centralidade é crucial para o acesso às várias oportunidades. O mapa confirma também duas conclusões que já se notavam no mapa do *Bike-Index 0*: as encostas saem prejudicadas (note-se os maus valores do índice nas encostas dos Olivais) e os planaltos, quando mal servidos de equipamentos, saem também prejudicados, mesmo estando em localizações centrais. Um exemplo deste fenómeno é a zona do Pólo I da Universidade. Já os planaltos bem servidos são menos afetados, com o comprova p.ex. o planalto dos Olivais, uma zona bem servida, que mantém bons índices de acessibilidade, apesar de ter altitudes médias bastante elevadas.

O *Bike-Index 2* está mapeado na Figura 5 abaixo. O mapa é muito semelhante ao da Figura 4, revelando que as conclusões do *Bike-Index 1* a respeito da centralidade e influência do declive na prática não são significativamente afetadas pela questão da liberdade de escolha. Há em todos os centróides uma ligeira diminuição no valor do índice e o que o *Bike-Index 2* nos diz é que esta diminuição é relativamente uniforme por toda a cidade.

Por último, no mapa da Figura 6 temos o *Bike-Index 3*. O *Bike-Index 3* realça a centralidade da Baixa. A Baixa mantém uma boa acessibilidade devido a ser uma zona com grande densidade e diversidade de todo o tipo de equipamentos. Já as outras duas zonas centrais da cidade, o planalto dos Olivais e a Solum, que nos mapas dos índices 0, 1 e 2 apresentavam bons valores de acessibilidade (Figuras 4 e 5), ficam neste mapa a perder, fruto essencialmente de uma menor disponibilidade de oferta dentro das distâncias máximas pré-estabelecidas.

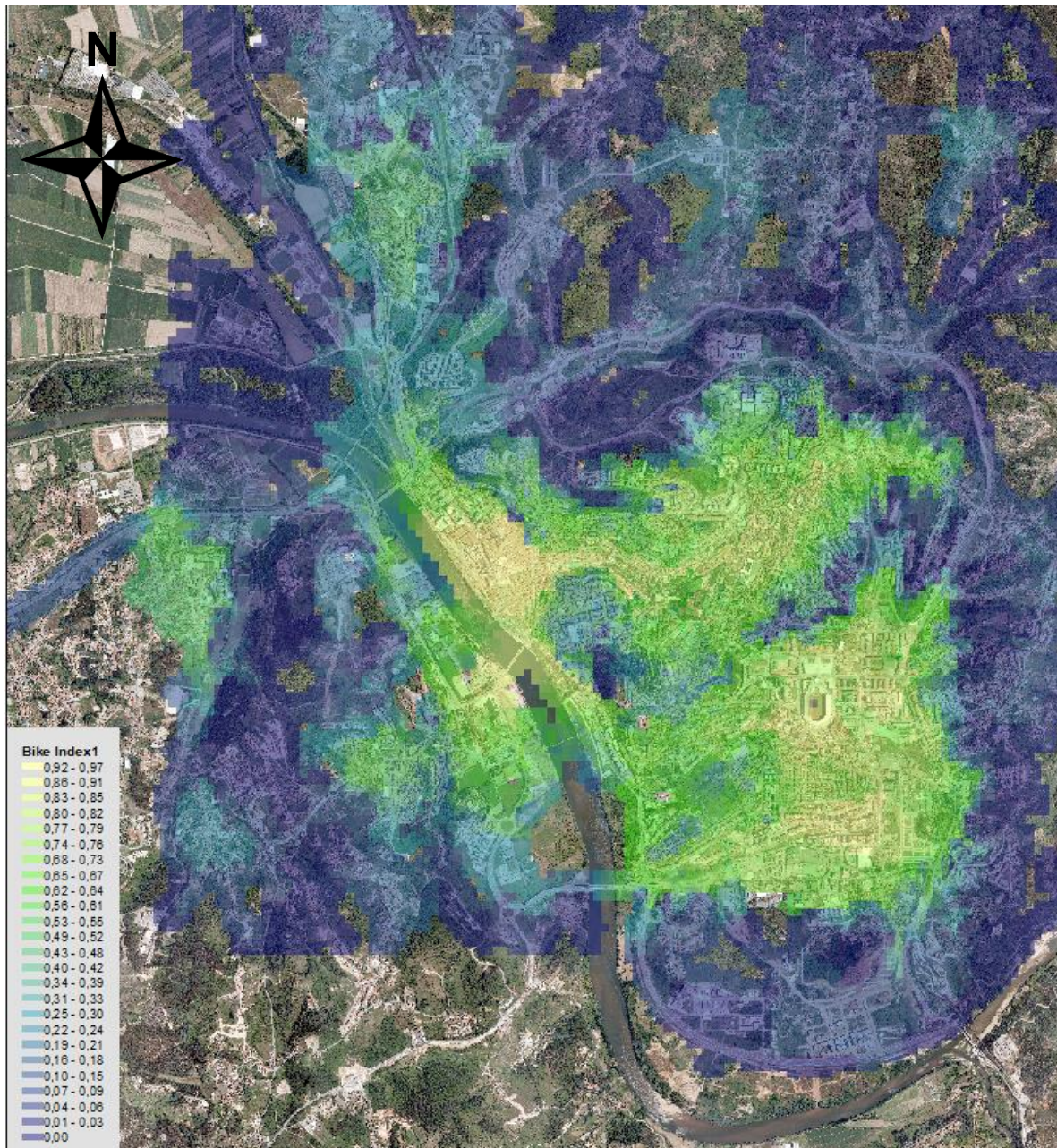


Figura 4. *Bike-Index 1* para Coimbra

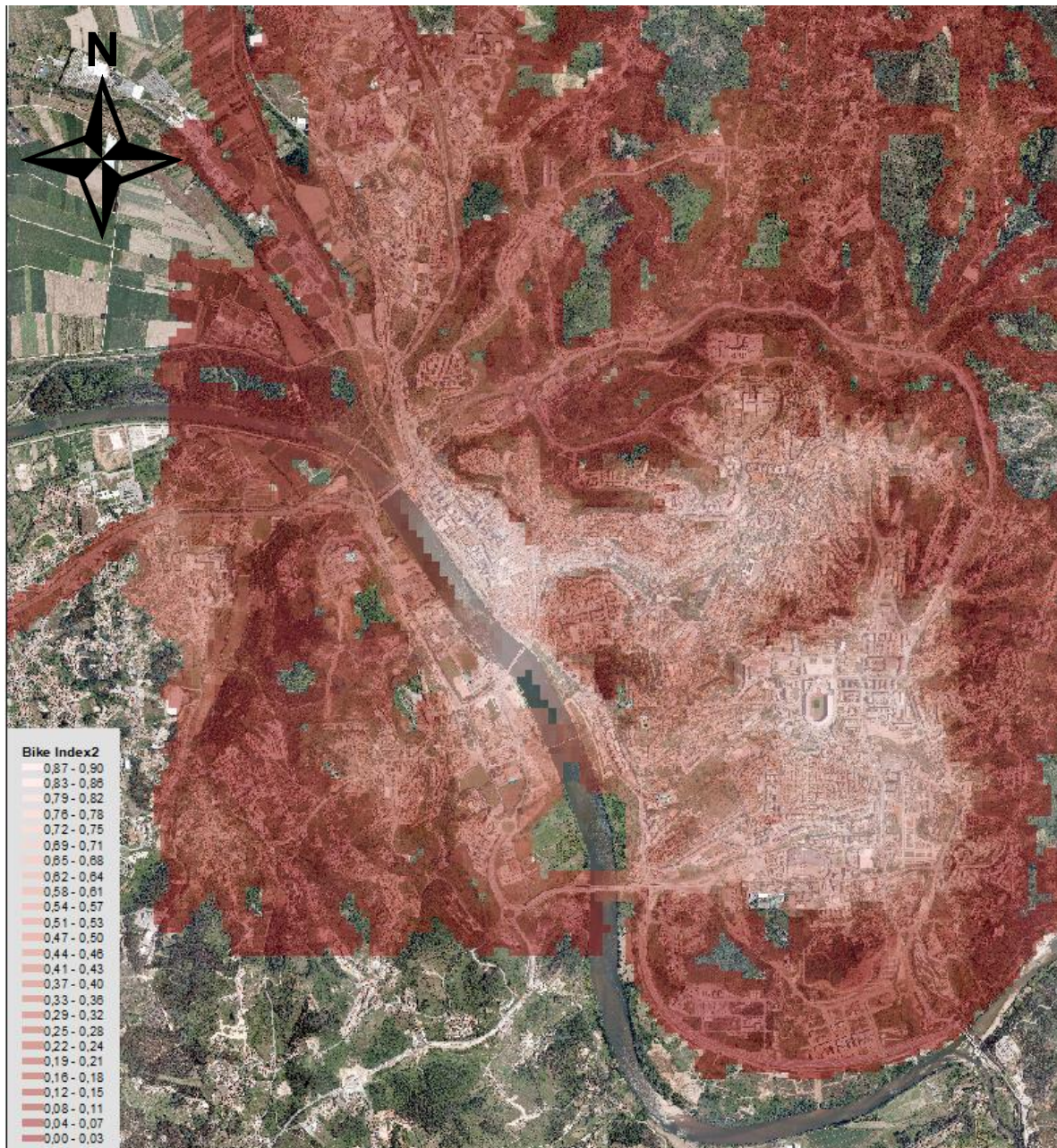


Figura 5. *Bike-Index 2* para Coimbra

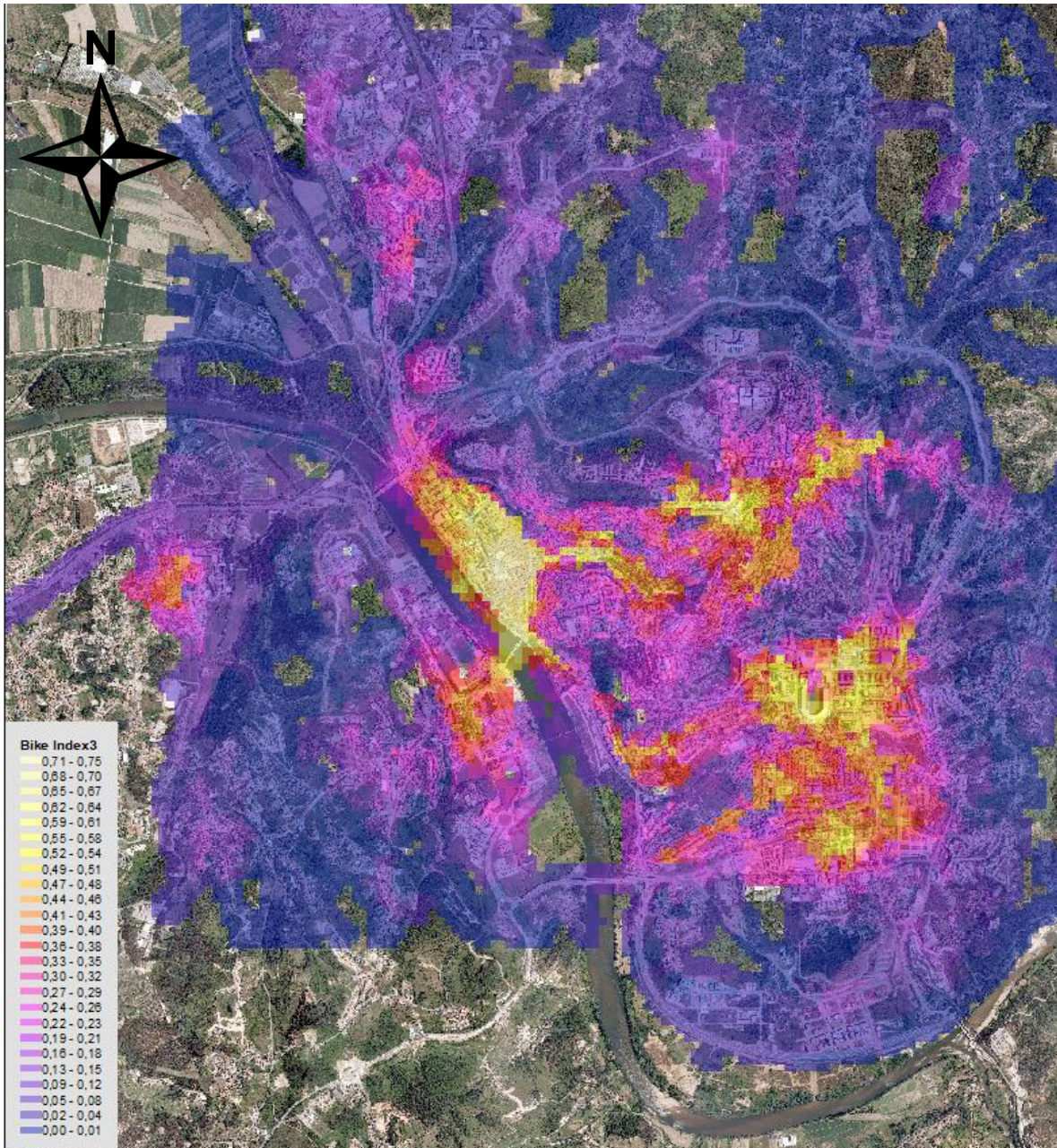


Figura 6. *Bike-Index 3* para Coimbra

3.2. Mapas diferenciais

Uma forma de compreender o impacto do relevo na acessibilidade é comparar os *Bike-Index* obtidos com os que se obteria caso a cidade fosse totalmente plana. A implementação SIG dos índices planos pode ser feita p.ex. adicionando ao *Bike Network Dataset* variáveis de acumulação *Ebike_FT_flat* e *Ebike_TF_flat* (valores iguais), obtidas do *script* da secção 2.2 com a alteração da linha final para

```
E_bike(0,!Len_Up_efe!) + E_bike(0,!Len_Down_e!) + E_bike(0,!L0!)
```


Bastará depois repetir os cálculos da secção 2.3 com esta variável de acumulação e no final adicionar colunas na FC dos centróides com os valores $BI_i^{\text{flat}} - BI_i$ para cada índice de que se queira o mapa diferencial. A título de exemplo de como interpretar mapas diferenciais, apresentam-se nas Figuras 7 e 8 estes mapas para os *Bike-Index 0 Diff* e *1 Diff* de Coimbra.

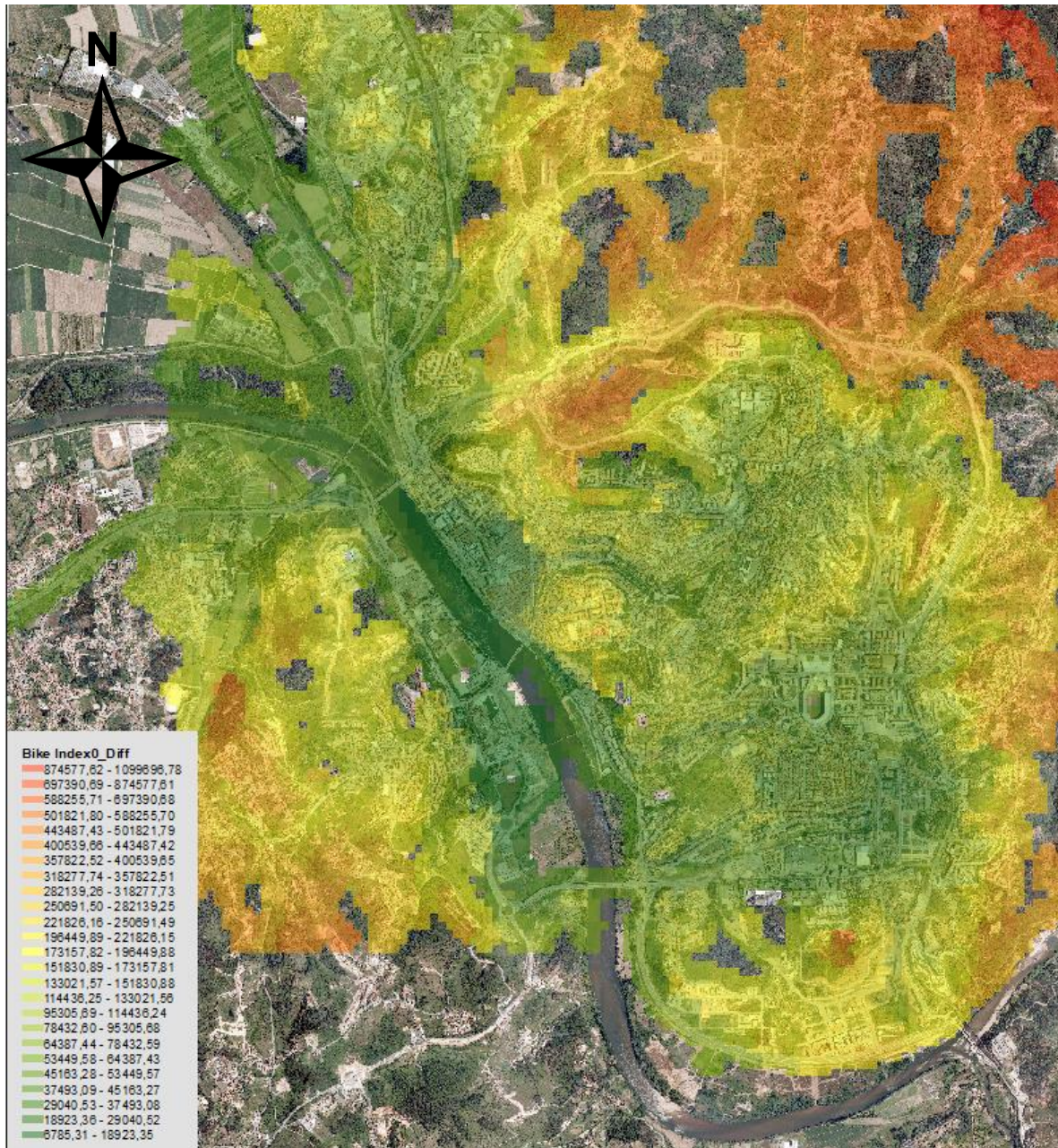


Figura 7. *Bike-Index 0 Diff* para Coimbra

Comparando as figuras 3 e 7, vemos que no caso da figura 3 as periferias têm má acessibilidade devido essencialmente à distância aos equipamentos. Na figura 7, se atendermos aos valores da legenda, vemos que o fator distância é agravado pelo facto dos ciclistas da periferia nordeste terem de vencer a (bastante escarpada) encosta norte dos Olivais para acederem aos equipamentos.

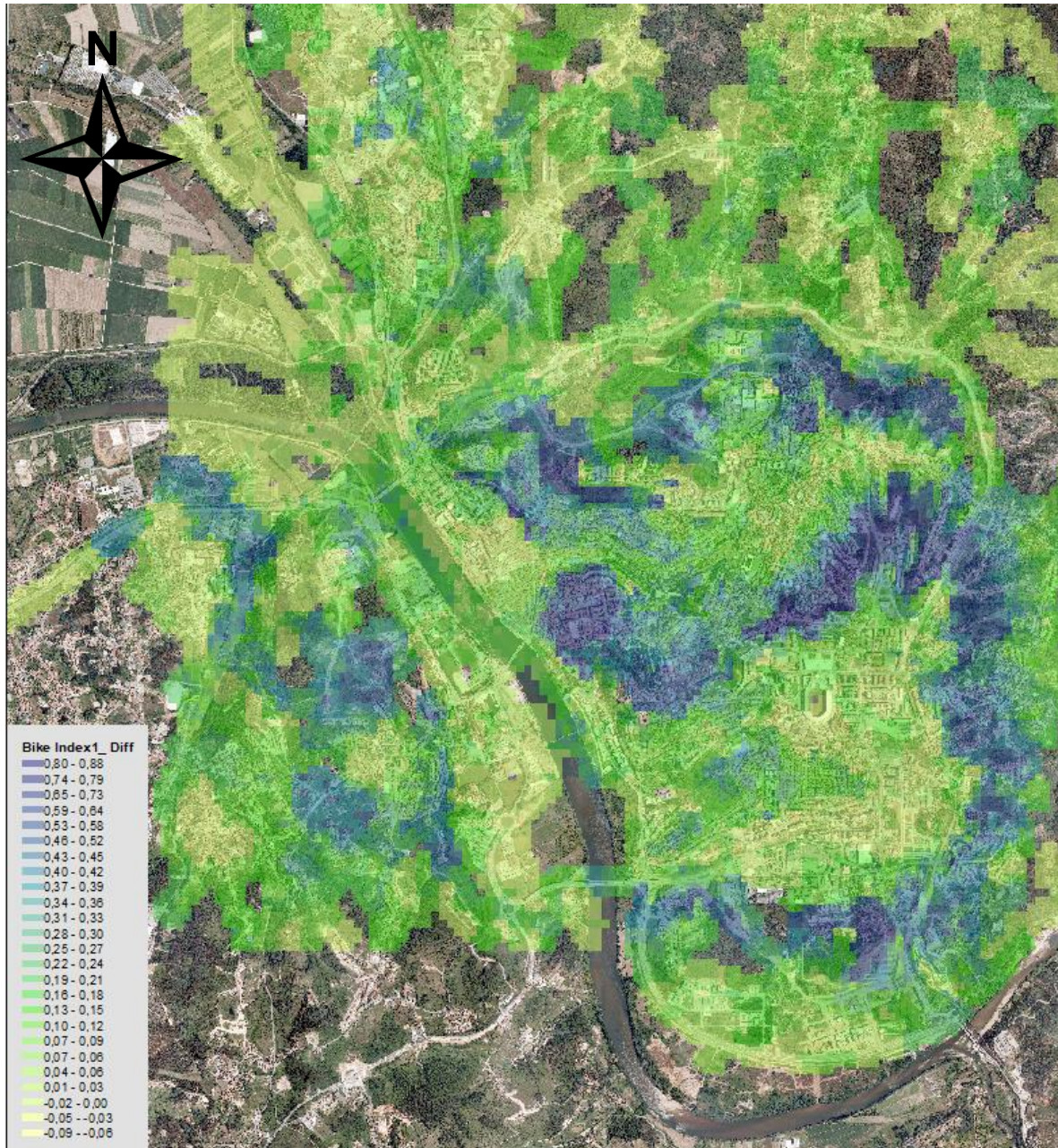


Figura 8. *Bike-Index 1 Diff* para Coimbra

Quanto ao centro da cidade, vemos que nas zonas de encosta o relevo provoca um agravamento da energia metabólica necessária em valores na ordem dos 150-200 kJ, limitando fortemente o uso da bicicleta para ciclistas residentes nestas zonas.

Comparando as Figuras 7 e 8 vemos que há uma disparidade entre elas: no caso do índice 1 as periferias deixam de estar tão penalizadas como eram no caso do índice 0. A origem desta discrepância é metodológica e radica no facto de que o *Bike-Index 1* é sempre baixo nas periferias. De facto, devido às distâncias grandes entre a periferia e o centro da cidade, a fração de equipamentos ao alcance pouco se altera mesmo que terreno passe a ser plano. Assim, o *Bike-Index 1* não tem muito por onde melhorar e as periferias acabam por ter valores diferenciais relativamente baixos. Olhando agora para o centro da cidade, a conclusão de que os planaltos mal servidos e as encostas são os mais penalizados torna-se bastante mais notória e essa é uma das principais conclusões deste artigo.

4. Resumo e conclusões

Neste artigo apresentou-se uma metodologia inovadora para o estudo da acessibilidade velocípede de uma cidade, baseado no conceito de acessibilidade como desutilidade e no esforço humano como impedância, sujeito a limites máximos. Especialmente adequado para cidades declivosas, e requerendo um ambiente SIG e bases de dados adequadas para a sua obtenção, quatro variantes do indicador *Bike-Index* foram calculadas para o caso-de-estudo da cidade de Coimbra, Portugal.

Os resultados trazem à luz duas conclusões sistemáticas: em primeiro lugar comprovam que a centralidade das localizações é um fator muito importante para uma boa acessibilidade, facto que não é alterado pelo relevo acidentado de uma cidade. De facto, as zonas remotas da periferia, por estarem desprovidas de equipamentos ao seu alcance são as que registam valores mais baixos de acessibilidade. Em segundo lugar, o relevo tem ainda assim um impacto considerável na acessibilidade velocípede. A análise dos mapas de *Bike-Index* permitiu concluir que mesmo locais mais centrais, quando localizados em planaltos mal servidos de equipamentos ou em encostas, acabam por ser também penalizados em termos de acessibilidade, por ser inevitável para estas zonas a transposição de arcos declivosos no acesso aos equipamentos. Essa transposição acarreta um aumento do esforço do ciclista, que de acordo com as premissas deste estudo o poderá levar a desistir desse modo de transporte para aceder a alguns equipamentos, penalizando os *Bike-Index*.

O *Bike-Index* é um instrumento que pode ser bastante útil para as entidades responsáveis pelo planeamento urbano e de transportes, dado que os mapas deste índice são uma ferramenta visualmente apelativa que permite identificar de uma forma expedita as zonas mais penalizadas em matéria de acessibilidade velocípede. Quando esta penalização advém de relevo acidentado, as ditas zonas são candidatas naturais à instalação de dispositivos de auxílio mecânico, complementando assim a análise de Tralhao et al. (2015).

Dada a necessidade de programação extensa de *scripts* em SIG para o cálculo do *Bike-Index*, este trabalho vem também mostrar a importância de se ter competências nesta área, independentemente da formação de base do indivíduo, ainda que esta se situe em ramos algo ortogonais à Informática, como é o caso da Geografia.

Agradecimentos

Trabalho parcialmente financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, sob a referência UID/Multi/00308/2019.

Referências

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials (1999). *Guide for the Development of Bicycle Facilities*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, EUA. www.industrializedcyclist.com/aashto.pdf (recuperado 23/nov/2018)

Donovan J (2015). Overcoming the tyranny of distance: making walking and cycling possible and preferable. *Municipal Engineer*, 168(2):115-124. <https://doi.org/10.1680/muen.14.00014>

Forsyth A, Krizek KJ (2010). Promoting walking and bicycling: assessing the evidence to assist planners. *Built Environment*, 36(4):429-446. <https://doi.org/10.2148/benv.36.4.429>

Hansen WG (1959). How accessibility shapes land use. *Journal of the American Institute of Planners*, 25(1):73-76. <https://doi.org/10.1080/01944365908978307>

IMT – Instituto da Mobilidade e dos Transportes (2012). *Ciclando: Plano da Promoção da Bicicleta e Outros Modos Suaves*. Lisboa, Portugal. http://www.imt-ip.pt/sites/IMTT/Portugues/Planeamento/DocumentosdeReferencia/PlanoNacionalBicicleta/Documents/PPBOMS_Final.pdf (recuperado 23/nov/2018)

Minetti AE, Moia C, Roi GS, Susta D, Ferretti G (2002). Energy Cost of Walking and Running at Extreme Uphill and Downhill Slopes. *Journal of Applied Physiology*, 93(3):1039-1046. <https://doi.org/10.1152/jappphysiol.01177.2001>

Parkin J (2018). *Designing for Cycle Traffic: International principles and practice*. ICE Publishing, Thomas Telford Lda., Londres, Reino Unido. ISBN: 978-0-7277-6349-5. <https://www.icevirtuallibrary.com/isbn/9780727763495>

Parkin J, Rotheram J (2010). Design Speeds and Acceleration Characteristics of Bicycle Traffic for use in Planning, Design and Appraisal, *Transport Policy*, 17(5):335-341. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2010.03.001>

Sousa N, Moreira FA, Coutinho-Rodrigues J (2017). An Energy-Based Pedestrian Accessibility Indicator. *Proceedings Energy for Sustainability International Conference –*

Designing Cities & Communities for the Future 2017, Funchal, Madeira, Portugal, 8-10 fevereiro 2017. <http://hdl.handle.net/10400.2/6200>

Tight M (2016). Sustainable urban transport - the role of walking and cycling. *Engineering Sustainability*, 169(3):87-91. <https://doi.org/10.1680/jensu.15.00065>

Tralhao L, Sousa N, Ribeiro N, Coutinho-Rodrigues J (2015). Design of bicycling suitability maps for hilly cities. *Municipal Engineer*, 168(2):96-105. <http://doi.org/10.1680/muen.14.00009>

Vale D, Saraiva M, Pereira M (2016). Active accessibility: A review of operational measures of walking and cycling accessibility. *Journal of Transport and Land Use*, 9(1):209-235. <http://dx.doi.org/10.5198/jtlu.2015.593>

van Wee B (2016). Accessible Accessibility Research Challenges. *Journal of Transport Geography*, 51:9-16. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2015.10.018>



Nuno Sousa, Professor Auxiliar convidado no Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Aberta. Licenciado e Mestre em Física pela Universidade de Coimbra (1995, 1998) e Doutor em Física, Matemática e Informática pela Radboud Universiteit Nijmegen (2003). Tem interesses de investigação diversos, nomeadamente em física, investigação operacional e otimização multiobjetivo em urbanismo e transportes. Entre as revistas em que publicou destacam-se *Physics Letters*, *Nuclear Physics B*, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* e *Engineering Optimization*.



Eduardo Natividade-Jesus, Professor Adjunto no Departamento de Eng.^a Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra. Licenciado, Mestre e Doutor em Eng.^a Civil pela Universidade de Coimbra (1995, 2002, 2014). Os seus interesses de investigação centram-se na regeneração urbana, cidades inteligentes e modos ativos de transporte. É também empresário consagrado, tendo fundado três empresas em vários ramos de atividade. Tem publicações nas revistas *Decision Support Systems*, *Journal of Infrastructure Systems* e *Municipal Engineer*.



João Coutinho-Rodrigues, Professor Catedrático no Departamento de Eng.^a Civil, Universidade de Coimbra. Licenciado em Eng.^a Civil, Mestre em Ciências da Computação e Doutor e Agregado em Eng.^a Civil, todos pela UC (1980, 1986, 1993, 2005). Possui uma vasta carreira de investigação em múltiplas áreas da eng.^a civil, com destaque para o urbanismo e transportes. Publicou em prestigiadas revistas como *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, *European Journal of Operational Research*, *Transportation Research - Part B: Methodological* e *Waste Management*, entre muitas outras.