



Rita Alexandra Costa Rêgo

INDICADORES DE ACESSIBILIDADE CICLÁVEL: ESTUDO EM COIMBRA

CYCLING ACCESSIBILITY INDICATORS: A CASE STUDY IN COIMBRA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pelo Professor Doutor João Manuel Coutinho Rodrigues e pelo Professor Doutor Nuno Miguel Marques de Sousa.

Coimbra, 7 de Fevereiro de 2018



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Rita Alexandra Costa Rêgo

Indicadores de Acessibilidade Ciclável: Estudo em Coimbra

Cycling Accessibility Indicators: A Case Study in Coimbra

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação, orientada pelo Professor Doutor João Manuel Coutinho Rodrigues e pelo Professor Doutor Nuno Miguel Marques de Sousa.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 7 de Fevereiro de 2018

“Todos temos momentos brilhantes, e a maioria deles são graças ao estímulo de outra pessoa.”

George Adams

Obrigada Mãe.

AGRADECIMENTOS

A elaboração desta dissertação representa o fim de uma etapa rica em conquistas e conhecimentos. Para que esta fosse possível, tive a sorte de poder contar com várias pessoas que sempre me apoiaram ao longo de todo caminho, e por essas tenho o maior apreço.

Em primeiro lugar, queria agradecer ao Professor Doutor João Manuel Coutinho Rodrigues, pela orientação, disponibilidade e ensinamentos transmitidos durante a realização desta tese de mestrado.

De seguida, gostaria de agradecer ao Professor Doutor Nuno M. Marques Sousa, pelo apoio, disponibilidade, paciência e pelos vastos conhecimentos transmitidos, pois sem eles não teria sido possível cumprir esta etapa.

Ao Filipe deixo aqui o meu agradecimento, pela dedicação e tempo desperdiçado a orientar-me no *ArcGIS* durante todo o trabalho.

Um especial agradecimento aos meus pais, por todo o amor, dedicação e apoio dados, porque sem eles não teria sido possível chegar até aqui. À minha mãe por toda a força dada ao longo de todo o curso. Ao meu pai pela ajuda, incentivo e paciência durante a realização do trabalho. À minha irmã, pelo papel fundamental que teve no meu crescimento, e por ser o meu orgulho e o meu exemplo a seguir. À restante família deixo um grande obrigado, especialmente ao meu tio Aires pela ajuda na formatação do texto.

Queria agradecer ao meu namorado Francisco, por toda a paciência e apoio dados, pois a sua calma ajudou-me nos momentos mais difíceis.

Por fim, mas não menos importante, queria agradecer às minhas amigas de infância, às minhas amigas e amigos do curso, e à minha tuna (“As Mondeguinas”), por todos os momentos de apoio, de confiança, de amizade e descontração que, sem dúvida, foram essenciais durante todo o meu percurso académico.

RESUMO

O estudo da acessibilidade em meio urbano é um fator importante no planeamento urbano e dos transportes, que pode ser usado como instrumento de políticas públicas. Este conceito envolve a interação de um ponto de origem com múltiplos pontos de destino, referentes aos vários tipos de equipamentos, sendo necessária toda a informação pertinente da distribuição espacial dos últimos (equipamentos de saúde, educação, entretenimento etc.).

A presente dissertação estuda a acessibilidade ciclável na cidade de Coimbra. Dada a conhecida importância de um desenvolvimento sustentável, potenciada por preocupações ecológicas e de sustentabilidade, juntamente com os problemas de saúde pública e qualidade de vida urbana em geral, é essencial fomentar o uso deste e de outros modos de transportes suaves (ou ativos), dadas as suas vantagens sociais, ambientais e económicas. Assim, de forma a conseguir avaliar o potencial de Coimbra para uso destes modos suaves, procedeu-se à construção de quatro indicadores de acessibilidade. Estes indicadores foram calculados com base na visão da acessibilidade como desutilidade, usando o esforço humano como impedância aos vários tipos de equipamentos, e tendo em conta o facto de esta ser uma cidade declivosa. Na análise considerou-se a rede viária e a localização dos equipamentos, tendo sido efetuada toda a gestão da informação espacial, bem como os cálculos num ambiente SIG, o *ArcGIS*.

Os resultados obtidos foram apresentados em formato de mapas coloridos, conforme a acessibilidade de cada localização na cidade. A análise desses mapas revela que tanto a centralidade como a declividade da cidade têm influência sobre a acessibilidade ciclável. Foi também possível perceber as razões pelas quais existem zonas relativamente centrais com menores (piores) valores de acessibilidade. Por fim, são feitas algumas sugestões que podem fomentar o uso da bicicleta.

Palavras-Chave: Acessibilidade Ciclável, Indicadores de Acessibilidade, Modos de Transportes Suaves.

ABSTRACT

The study of urban accessibility is an important factor in urban and transportation planning, which can be used as an instrument of public policies. This concept involves the interaction of a point of origin with multiple destinations, namely various types of equipment, and requires all pertinent information on the spatial distribution of the later (health equipment, education, entertainment, etc.).

The present dissertation studies cycling accessibility in the city of Coimbra. Given the well-known importance of sustainable development, triggered by ecological and sustainability concerns, together with public health problems and urban quality of life in general, it is essential to encourage this and other soft (or active) modes of transports given their social, environmental and economic advantages. In order to assess the potential of Coimbra for the use of soft modes of transportation, four accessibility indicators were constructed. These indicators were calculated based on the vision of accessibility as disutility, using human effort as impedance to the various types of equipment, and taking into account that Coimbra is a hilly city. In the analysis, the location of urban facilities in Coimbra and its streets network were considered, and calculations were carried out in the *ArcGIS* GIS environment.

The results were presented in colored map format, according to the accessibility of each location in the city. The analysis of the maps reveals that both centrality and hilliness influence the cycling accessibility of Coimbra. It was also possible to understand the reasons why there exist relatively central zones with lower (worst) values of accessibility. Finally, some suggestions are made to encourage the use of the bicycle.

Key words: Cycling Accessibility, Accessibility Indicators, Soft Modes of Transports.

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Enquadramento do Tema	1
1.2.	Medidas de promoção de uma mobilidade ciclável confortável e segura	5
1.3.	Estrutura da Dissertação	8
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1.	A bicicleta como modo de transporte urbano	10
2.2.	Acessibilidade e respetivos Indicadores: Definições	12
2.3.	A tecnologia SIG	16
2.4.	Estudos anteriormente realizados sobre o tema	18
3.	METODOLOGIA.....	23
3.1.	Recolha de Dados	23
3.2.	Programação da Rede	24
3.3.	Indicadores de Acessibilidade	27
3.4.	Mapas	31
4.	ESTUDO DE CASO - COIMBRA	32
4.1.	Discussão dos Resultados Finais	33
4.1.1.	<i>Bike Index 0</i>	34
4.1.2.	<i>Bike Index 1</i>	37
4.1.3.	<i>Bike Index 2</i>	40
4.1.4.	<i>Bike Index 3</i>	43
5.	CONCLUSÃO.....	46
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
	ANEXOS	A

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1- Declives da rede viária da cidade de Coimbra (Fonte: Ribeiro, 2013)	3
Figura 1.2 - Mapa altimétrico da Cidade de Coimbra	4
Figura 1.3- Elevadores de bicicleta - " <i>Trampe</i> "	5
Figura 1.4 - Autocarro com transporte de bicicletas	6
Figura 1.5 - <i>Bike-Sharing</i>	6
Figura 2.1- Comparação de tempos de viagem em ambiente urbano (Dekoster e Schollaert, 2000).	10
Figura 2.2- Extensões do <i>ArcGIS</i> interligadas à análise de acessibilidade (Fonte: Liu e Zhu, 2004)	18
Figura 2.3 - Custos de energia metabólica pedonal (Cw) (Fonte: Minetti et al, 2002)	20
Figura 3.1 – Etapas da Metodologia do Trabalho	23
Figura 4.1 - Rede de Coimbra e os equipamentos existentes	33
Figura 4.2 - Indicador de Acessibilidade 0 (BIKEINDEX0_2Way), em Joules metabólicos	34
Figura 4.3 - Indicador de Acessibilidade 0_Diferencial (BIKEINDEX0_DIFF), em Joules metabólicos	35
Figura 4.4 - Indicador de Acessibilidade 1_1000 m (BIKEINDEX1_1000)	37
Figura 4.5 - Indicador de Acessibilidade 1_1000m_Diferencial (BIKEINDEX1_1000_DIFF)	38
Figura 4.6 - Indicador de Acessibilidade 2_1000m (BIKEINDEX2_1000)	40
Figura 4.7 - Indicador de Acessibilidade 2_1000m_Diferencial	41
Figura 4.8 - Indicador de Acessibilidade 3 (BIKEINDEX3)	43
Figura 4.9 - Indicador de Acessibilidade 3_Diferencial (BIKEINDEX3_DIFF)	44
Figura A.1 - Indicador de Acessibilidade 0_Plano (BIKEINDEX0_FLAT), em Joules metabólicos	A-1
Figura A.2 - Indicador de Acessibilidade 1_1000_Plano (BIKEINDEX1_1000FLAT)	A-2
Figura A.3 - Indicador de Acessibilidade 2_1000m_Plano (BIKEINDEX2_1000FLAT)	A-3
Figura A.4 - Indicador de Acessibilidade 3_Plano (BIKEINDEX3_FLAT)	A-4

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 – Políticas de promoção de uma mobilidade ciclável segura e conveniente, implementadas em cidades da Alemanha, da Dinamarca e da Holanda (Fonte: Pucher e Buehler, 2008)	7
Quadro 2.1 - Comparação, do ponto de vista ecológico, dos impactes ambientais referentes aos vários modos de transporte. Base = 100 (carro sem conversor catalítico) (Fonte: UPI Report, Heidelberg, 1989, citado por Dekosster e Schollaert, 2000)	11
Quadro 2.2- Resumo de fatores que influenciam a acessibilidade (Fonte: Litman, 2008)	15
Quadro 3.1 – Peso dado aos vários tipos de equipamento (Citado em Moreira, 2016)	24
Quadro 3.2 - Valores da Velocidade, Aceleração e Potência consoante os declives usando a bicicleta. (Adaptada de Parkin e Rotheram, 2010)	26
Quadro 3.3 - Indicador de Acessibilidade 0	29
Quadro 3.4- Indicador de Acessibilidade 1	30
Quadro 3.5- Indicador de Acessibilidade 2	30
Quadro 3.6- Indicador de Acessibilidade 3	31

SIMBOLOGIA

a – Aceleração da bicicleta (m^2/s)

g – Aceleração da gravidade (m/s^2)

A_i – Acessibilidade na zona i

A – Área frontal da máquina e do condutor (m^2)

L_{down} – Comprimento da via a descer (m)

L_{up} – Comprimento da via a subir (m)

L_0 – Comprimento da via sem declive (m)

L – Comprimento do segmento

C_w – Custo metabólico a caminhar (J/kg.m)

C_r – Custo metabólico a correr (J/kg.m)

S – Declive do segmento

S_{down} – Declive médio a descer (%)

S_{up} – Declive médio a subir (%)

ρ – Densidade do ar (kg/m^3)

L_k – Fator de ponderação pela liberdade de escolha ao k -ésimo equipamento mais próximo

i – Gradiente (%)

s – Gradiente (%)

I_{ij}^k – Impedância de desde o centróide i ao k -ésimo equipamento mais próximo de tipo j

$I_{ij}^{k,flat}$ – Impedância no plano (todos arcos com declive 0) de desde o centróide i ao k -ésimo equipamento mais próximo de tipo j

m_v – Massa rotacional efetiva das rodas e dos pneus (kg)

n_{mech} – Peso do condutor e da bicicleta (kg)

w_j – Peso dos equipamentos de tipo j

$P_{\text{útil}}$ – Potência à velocidade média

W – Potência total (W)

η – Rendimento

a_j – Representa as atividades na zona j C_r – Representa o coeficiente da distância percorrida

C_d – Representa o coeficiente de arrasto aerodinâmico

C_v – Velocidade da bicicleta (m/s)

v – Velocidade média nesse segmento

$X_{ij}^{k,1000}$ – 1 se a impedância I_{ij}^k é inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer 1000 m em modo pedonal no plano (500 m ida + 500 m volta), 0 caso contrário

$X_{ij}^{k,freq}$ – 1 se a impedância I_{ij}^k é inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ em modo pedonal no plano para um equipamento de peso k , 0 caso contrário

$Y_{ij}^{k,1000}$ – 1 se a impedância $I_{ij}^{k,flat}$ é inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer 1000 m em modo pedonal no plano, 0 caso contrário

$Y_{ij}^{k,freq}$ – 1 se a impedância $I_{ij}^{k,flat}$ é inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ em modo pedonal no plano para um equipamento de peso k , 0 caso contrário

ABREVIATURAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

Ebike_FT – Energia metabólica afeta de cada arco no sentido *From-To*

Ebike_TF – Energia metabólica afeta de cada arco no sentido *To-From*

FT – Sentido de direção *From-To*

GIS – Geographic Information Systems

GPS – Global Positioning Systems

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

Para que haja um bom planeamento urbano das cidades é importante que seja dada resposta às necessidades de procura dos meios de transporte da população residente. O funcionamento destes centros urbanos encontra-se ligado a dois conceitos diferentes que devem ser estudados como independentes e como um todo. Os dois conceitos são a Mobilidade e a Acessibilidade (Morais, 2013).

A mobilidade pode ser definida como a capacidade de deslocação humana entre dois pontos, usando vários tipos de transporte (Costa, 2007, citado em Morais, 2013). Este conceito é muitas vezes ligado ao fenómeno da urbanização, segundo muitos autores está intrinsecamente interligado com a democratização da mobilidade.

O termo acessibilidade é um conceito-chave em todo o mundo quando se fala de políticas dos transportes. Como tal, é importante que as entidades responsáveis pela organização dos transportes de cada país tenham isso em conta nas suas prioridades. Devido à sua crescente importância na sociedade atual, a localização dos transportes e outras áreas de pesquisa têm vindo a estudar a acessibilidade de várias maneiras, apresentando diversas definições para o conceito e diferentes métodos de cálculo de indicadores capazes de serem aplicados no mundo real (Van Wee, 2016).

O uso do modo de transporte ciclável varia de cidade para cidade, sendo que essa variação depende de vários fatores, tais como a economia, a cultura, o clima, a topografia e a política de cada país (OCDE, 2004). Esta organização defende que estes fatores, e outros a seguir apresentados, podem ser considerados barreiras no desenvolvimento e promoção deste transporte ativo.

- Segurança – Os ciclistas são vulneráveis ao tráfego de automóveis, devido às infraestruturas e às altas velocidades que este tipo de veículos motorizados pratica. Estes também estão mais susceptíveis a crimes de furto, tanto em andamento, como parado, o que desfavorece o uso da bicicleta.
- Distâncias – À medida que existe uma expansão urbana, as distâncias entre as várias partes da cidade têm tendência a aumentar. Isto deve-se à existência de uma maior

amplitude de espaço na distribuição espacial das diversas funções da cidade, que provoca uma menor aderência ao uso dos transportes suaves.

- Saúde – Aquando do uso da bicicleta, existe uma maior propensão para a inalação de gases nocivos libertados pelos veículos motorizados e por outras fontes industriais e comerciais.
- Estatuto Social – O ciclismo pode ser visto como uma atividade praticada pelas pessoas menos ricas, que não tenham a possibilidade de comprar um automóvel.
- Clima – O clima é um fator bastante importante que pode favorecer ou condicionar o uso da bicicleta de um dia para o outro. Quando as temperaturas baixam com ocorrência de precipitações frequentes ou quando as temperaturas são muito elevadas, as pessoas não têm condições adequadas para usar este meio de transporte.
- Topografia – Zonas montanhosas condicionam este tipo de transporte.

Este último fator, a topografia (relevo) de uma cidade, é uma das características essenciais do nosso estudo em Coimbra. Segundo a AASHTO, 1999, os declives influenciam a capacidade de escolha de uma rota no ciclismo, visto que é considerado bastante desconfortável a mobilidade numa via que tem o declive superior a 5%, sendo esta inclinação aceitável em excertos de vias consideravelmente curtos (difícil a mobilidade no sentido ascendente e vertiginosa a mobilidade no sentido descendente). Através da Figura 1.1 pode-se verificar que na cidade em análise, cidade do centro de Portugal – Coimbra, existem várias zonas com declives superiores a 5%. Por causa disso, tiveram de ser implantadas restrições para a mobilidade ciclável, de modo a que fossem obtidos resultados neste estudo, pois sem elas, sabendo da existência de zonas excessivamente declivosas, a maioria das zonas da cidade estariam inacessíveis usando a bicicleta. No capítulo da metodologia vai ser explicado todo o processo.

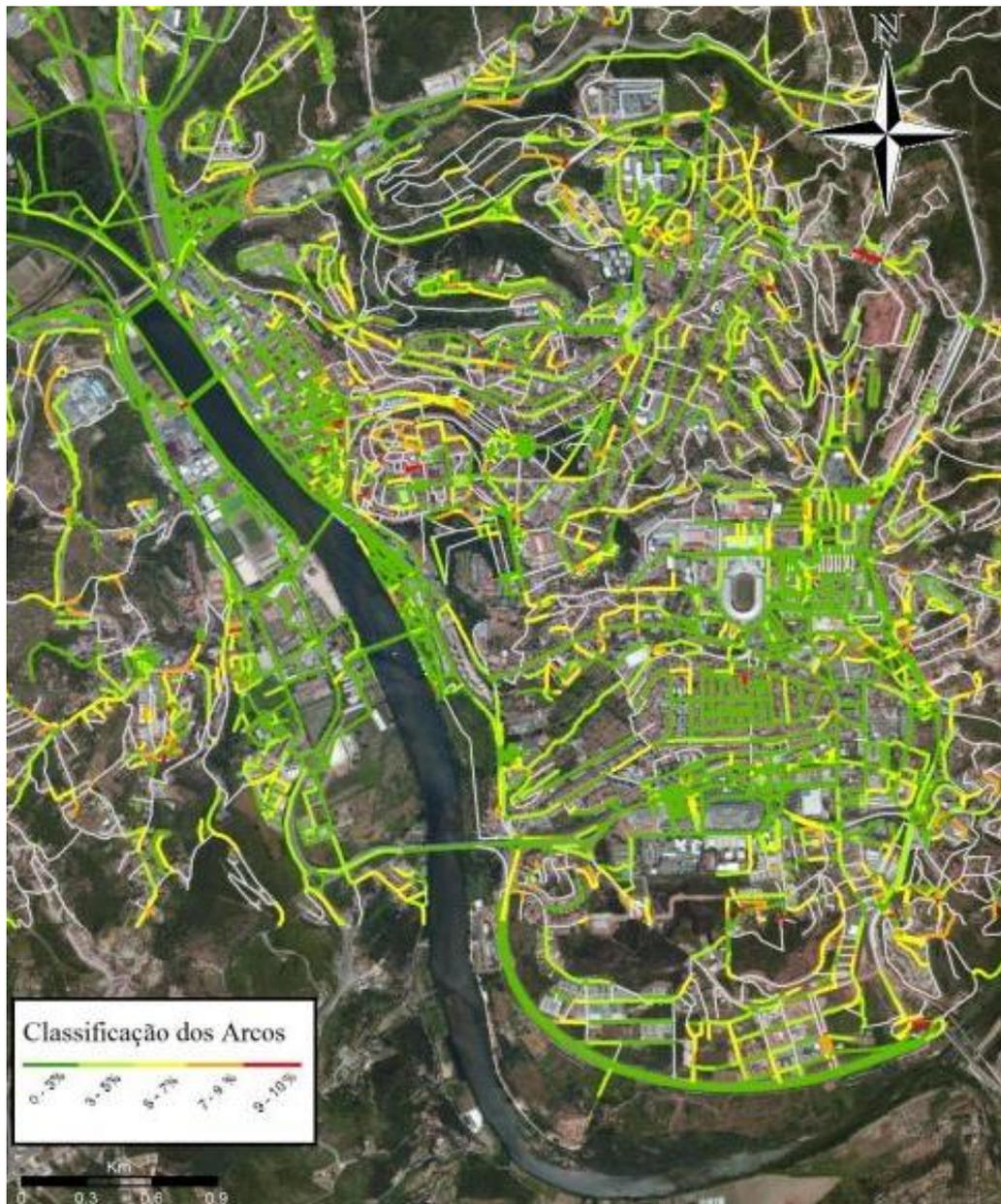


Figura 1.1- Declives da rede viária da cidade de Coimbra (Fonte: Ribeiro, 2013)

Na legenda da figura acima, encontram-se identificados, através de diferentes cores, os níveis de declives existentes nos arcos da cidade. O verde mais escuro indica os declives entre 0 e 3%, a verde claro estão representados os arcos com declives entre 3 e 5%, os arcos amarelos têm 7% de declive, a cor de laranja estão os arcos com declives entre 7 e 9% e a vermelho estão representados arcos com declives entre 9 e 11%. Nota-se que existe uma diversidade de declives em toda a área urbana, com predominância da cor verde e amarela.

Para completar a informação da figura anterior, apresenta-se na Figura 1.2 o mapa altimétrico da cidade em análise, que mostra a sua orografia complexa, com bastantes variações de altitudes, o que torna difícil os cruzamentos entre as várias partes do centro urbano sem usar um transporte motorizado.

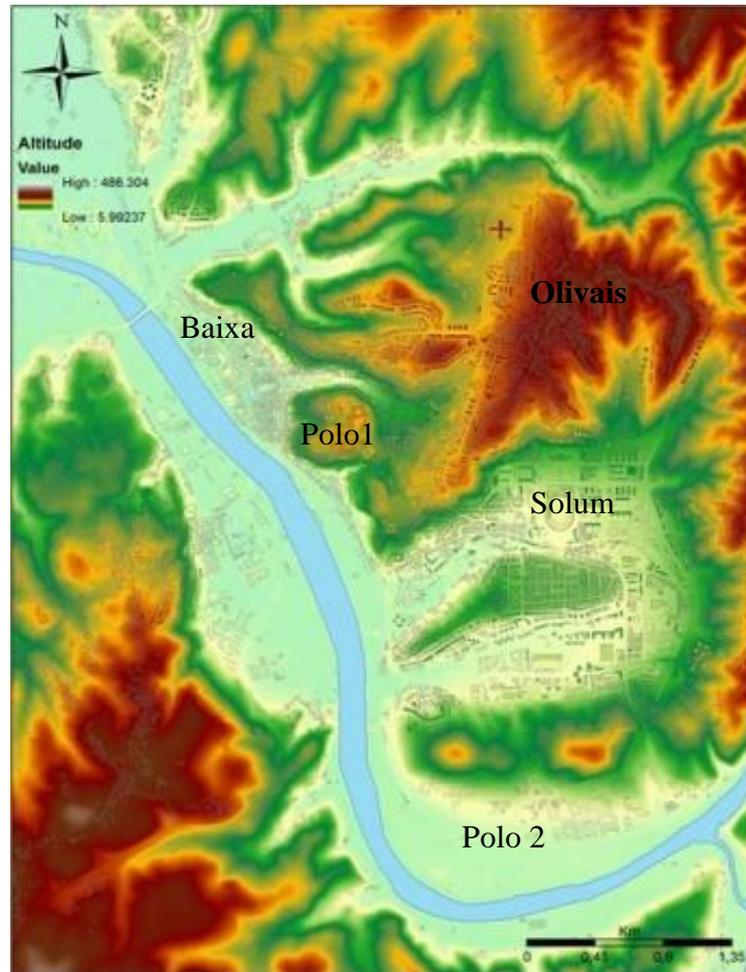


Figura 1.2 - Mapa altimétrico da Cidade de Coimbra

Através da observação do mapa altimétrico nota-se a existência de variadas encostas à volta das principais zonas da cidade, como é o caso da zona dos Olivais, da Baixa ou da Solum que, isoladamente, apresentam uma orografia que permite a circulação usando a bicicleta sem grandes dificuldades. Contudo, essas zonas têm cada uma a sua altitude que difere bastante entre si, o que condiciona a ligação ciclável entre as várias partes da cidade.

Para que uma cidade como Coimbra esteja apta ao uso de transportes ativos é importante estudar medidas capazes de solucionar os problemas que a cidade tem. Como foi referido anteriormente, Coimbra é uma cidade com uma vasta variação de declives (Figura 1.1), que

torna condicionante a mobilidade através de transportes em que a única fonte de energia é a do próprio condutor.

1.2. Medidas de promoção de uma mobilidade ciclável confortável e segura

Para além dos problemas de declive, esta cidade não está preparada para que exista uma prática segura e conveniente deste tipo de mobilidade. De modo a contrariar isto, foram criadas medidas para contrariar estas condicionantes, que irão ser citadas e explicadas de seguida.

Atualmente existem algumas soluções estudadas para solucionar problemas de cidades declivosas como Coimbra. Uma delas, eficaz no problema dos desníveis excessivos, é um sistema mecânico para bicicletas ("*Trampe Cyclocable*"), criado na Noruega (Trampe@2013). Estes dispositivos dão impulsos ao pé, permitindo que um ciclista alcance as zonas altimétricas mais altas sem esforço nem perigo, mantendo-se em cima da bicicleta (Figura 1.3).



Figura 1.3- Elevadores de bicicleta - "*Trampe*" (Fonte:Trampe@2013)

A adaptação dos transportes públicos para suportar o transporte de bicicletas é uma solução que permite combinar os modos de transportes suaves com os transportes coletivos (Figura 1.4). Embora a nível ecológico a solução apresentada não seja a mais favorável, esta permite que seja possível percorrer maiores distâncias e permite combinar as vantagens de ambos os tipos de transportes.



Figura 1.4 - Autocarro com transporte de bicicletas
(Fonte: <http://daraopedal.blogs.sapo.pt/25058.html>)

Existe ainda o serviço *Bike-Sharing*, que consiste num serviço de aluguer de bicicleta. Este aluguer é feito no momento que se pretende deslocar e permite que o local de devolução da bicicleta adquirida seja num outro posto que exista na cidade. Estes postos existem, normalmente, em diferentes zonas de uma cidade, permitindo que possa haver coordenação de uso de outros modos de transporte. Isto também é vantajoso, pois há menor probabilidade de roubo da bicicleta devido à segurança destes dispositivos de estacionamento (Figura 1.5).



Figura 1.5 - *Bike-Sharing* (Fonte: http://old.aproximaviagem.pt/n6/04_berlim.html)

Ribeiro (2013) refere ainda outras soluções mecânicas encontradas por vários países, que são aplicadas dependendo da orografia da zona. Algumas cidades de Espanha (p.ex. San Sebastian) instalaram um conjunto de elevadores e rampas rolantes distribuídas pela cidade. Nos EUA concluíram que existe segurança no transporte de bicicletas em escadas rolantes, o que permite que já seja possível em alguns países transportar a bicicleta para os acessos ao metro, porque a maioria deles são acessíveis através de escadas rolantes (Madrid e Roterdão). Os acessos ao metro podem também ser feitos através de canaletas automatizadas laterais às escadas, soluções estas já existentes em Tóquio e Kyoto.

Para além destas soluções mecânicas, existe ainda a possibilidade de substituir o uso da bicicleta convencional por uma bicicleta elétrica, capaz de ultrapassar as zonas mais declivosas, apesar de não ser considerada 100% eficaz (Ribeiro, 2013). Contudo, esta já não é uma solução que dá continuidade ao uso da bicicleta convencional, por isso, não vai ser assunto de discussão.

Para além de solucionar os problemas relacionados com os declives de uma cidade, também é essencial assegurar segurança, conforto e conveniência para que seja viável o uso da bicicleta por parte de toda a população (Pucher e Buehler, 2008). Cabe às entidades responsáveis pelo planeamento dos transportes aplicar medidas para que sejam cumpridas todos os parâmetros fundamentais para esta prática. De maneira a assegurar todos estes fatores, Pucher e Buehler (2008) citam 7 políticas adaptadas por alguns países (Alemanha, Dinamarca e Holanda), que poderiam ser aplicadas por todos os interessados. No quadro abaixo estão indicadas essas políticas e as respectivas medidas para cada uma delas (Quadro 1.1).

Quadro 1.1 – Políticas de promoção de uma mobilidade ciclável segura e conveniente, implementadas em cidades da Alemanha, da Dinamarca e da Holanda (Fonte: Pucher e Buehler, 2008)

Políticas	Medidas
Construção de Ciclovias	Ciclovias bem conservadas e totalmente integradas na cidade; Sistema direcional de cores para ciclistas; Atalhos e caminhos sem acesso a automóveis;
Acalmia de Tráfego	Redução do limite de velocidade em zonas residenciais; Infraestruturas de redução de velocidade (p.ex. lombas); Vias prioritárias para os ciclistas; Áreas residenciais que dão prioridade aos pedestres e aos ciclistas (“home zones”);
Modificações dos cruzamentos	Luz verde antecipada para os ciclistas, na maioria dos cruzamentos; Local de espera próprio mais avançado para os ciclistas; Atalhos prévios de cruzamentos; Sincronização dos tempos de semaforização com a velocidade dos ciclistas;
Estacionamento	Bons estacionamentos para bicicletas, espalhados pela cidade; Estacionamentos iluminados e com segurança;
Coordenação entre a bicicleta e os transportes públicos	Estacionamento de bicicletas em todos os metros e comboios urbanos e suburbanos; Programa “Call-a-Bike”, que permite o aluguer de bicicletas em qualquer lugar e a qualquer hora, através de uma chamada telefónica. O pagamento do aluguer é feito por minuto de utilização. Bancas de aluguer de bicicleta em todas as estações de comboio;
Educação e Treino	Cursos virtuais de ciclismo para as crianças; Treino dos condutores de modo a respeitarem os ciclistas e os pedestres e evitarem acidentes;
Código da estrada	Lei de proteção legal para ciclistas idosos e menores de idade; Defesa dos ciclistas aquando de acidentes com veículos motorizados.

Em suma, pretende-se determinar a capacidade de uma pessoa, em termos de esforço físico, de atravessar vários percursos urbanos, tendo em conta a importância da topografia da cidade em análise. Sendo assim, a presente tese incidiu no estudo da acessibilidade e na capacidade de acesso às várias partes em Coimbra, usando o modo de transporte suave ciclável. Foi construída uma rede a partir dos mapas da cidade e, a partir dessa rede, foi calculada a impedância medida em esforço humano (energia metabólica em Joules). Os resultados obtidos foram usados para a determinação de índices representativos da acessibilidade aos diversos equipamentos e serviços disponíveis na zona urbana em estudo, tendo em conta fatores como a importância que uma destas oportunidades representa no quotidiano da população. O estudo foi realizado com base em tecnologia SIG (Sistemas de Informação Geográfica) por ser uma ferramenta essencial para este tipo de investigação que envolve fundamentalmente informação espacial da cidade.

1.3. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos.

O primeiro capítulo é referente a um enquadramento geral do tema, a importância do conceito na sociedade, algumas medidas de promoção do modo de transporte ciclável em zonas urbanas e os principais objectivos da realização deste trabalho.

De seguida é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o tema, mais especificamente, definições e explicações sobre o conceito acessibilidade, a tecnologia SIG, o programa informático usado (*ArcGIS*) e ainda uma sucinta referência a estudos realizados anteriormente sobre os diversos aspetos em estudo. Neste capítulo é feita também referência às vantagens e outros aspetos importantes aquando do uso da bicicleta.

No terceiro capítulo é feita uma caracterização exaustiva da metodologia utilizada. São enumerados os passos de todo o processo, juntamente com a respetiva explicação sobre cada um. Neste capítulo estão referidos todos os cálculos, fórmulas necessárias e dados essenciais para a obtenção dos resultados. Para além disto, é apresentada uma explicação sobre os vários indicadores de acessibilidade, qual o seu significado e a fórmula utilizada no cálculo de cada um.

De seguida é apresentado o estudo do caso, com uma análise aprofundada dos resultados obtidos. Baseada na apresentação de mapas representativos dos indicadores de acessibilidade

usando o modo de transporte ciclável, é feita uma análise comparativa dos diferentes mapas com uma explicação sobre o que os resultados representam.

Por fim, é apresentado um resumo final do trabalho realizado, com os aspetos positivos e todos os fatores que tiveram de alguma forma influência nos resultados. Realizou-se uma conclusão sobre as vantagens do estudo, e em que setores este pode ser benéfico no planeamento urbano e no planeamento dos transportes de uma cidade. Para concluir adiantam-se algumas propostas de solução para melhorar as zonas da cidade de Coimbra que apresentam uma fraca acessibilidade, e ainda sugestões de possíveis trabalhos futuros, relacionados com o tema, para que possa haver uma continuação deste estudo sobre a acessibilidade ciclável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A bicicleta como modo de transporte urbano

Atualmente, com um aumento da dimensão dos espaços urbanos e da população mundial que neles habita, é essencial que quem gere e vive nessas cidades tenha conhecimento de como se adaptar aos novos desafios que podem surgir. Este desenvolvimento dos espaços urbanos conduz a que haja um aumento do congestionamento automóvel e da poluição atmosférica, assim como uma desvalorização dos espaços públicos (Nunes da Silva, 2008, citado por Morais, 2013). Em virtude destas consequências, é essencial que as entidades responsáveis pelo planeamento urbano promovam um desenvolvimento da mobilidade sustentável através do uso de transportes mais económicos e menos poluentes.

Desde muito cedo que a bicicleta é considerada um meio de transporte popular para pessoas de todas as idades e é cada vez mais frequente a promoção deste transporte suave devido a uma extrema imprescindibilidade de providenciar uma mobilidade sustentável (Vlastos et al, 2005, citado por Lourontzi e Petacht, 2017). Este tipo de mobilidade é um termo usado regularmente para promover um desenvolvimento sustentável dos centros urbanos. Esse desenvolvimento é promovido através da utilização de modos de transporte suaves/ativos. Esta medida é benéfica devido ao facto de se tratar de transportes não motorizados, mais ecológicos e mais saudáveis. São considerados modos de transportes suaves as deslocações de bicicleta e as deslocações pedestres, sendo que estes modos de deslocação são mais aptos para deslocações de curtas e médias distâncias, enquanto para percursos mais longos é mais adequado utilizar um veículo motorizado. Este facto pode ser comprovado através da análise da Figura 2.1. Nesta verifica-se que a bicicleta, para curtas distâncias, até aproximadamente 5 km, consegue ser mais rápida do que o automóvel.

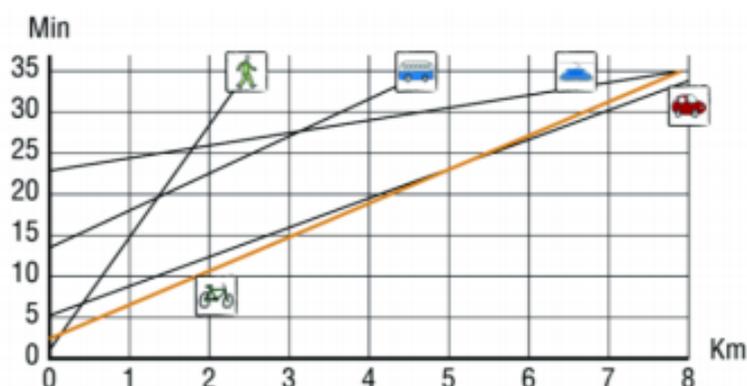


Figura 2.1- Comparação de tempos de viagem em ambiente urbano (Dekoster e Schollaert, 2000).

Como foi referido anteriormente, a promoção de uma mobilidade sustentável é conduzida pela introdução de modos de transporte não-motorizados. No Quadro 2.1 apresenta-se uma comparação dos impactos ecológicos que diferentes tipos de transportes provocam no ambiente. Este foi feito comparando os consumos dos diversos tipos de transporte com os de um automóvel privado, considerando que este usou o mesmo itinerário, com o mesmo número de pessoas transportadas por km.

Quadro 2.1 - Comparação, do ponto de vista ecológico, dos impactes ambientais referentes aos vários modos de transporte. Base = 100 (carro sem conversor catalítico) (Fonte: UPI Report, Heidelberg, 1989, citado por Dekosster e Schollaert, 2000)

	Carro	Carro*	Autocarro	Bicicleta	Avião	Comboio
Ocupação de espaço	100	100	10	8	1	6
Consumo de energia primária	100	100	30	0	405	34
CO ₂ (Dióxido de Carbono)	100	100	29	0	420	30
Óxidos de Nitrogénio	100	15	9	0	290	4
Hidrocarbonetos	100	15	8	0	140	2
CO (Monóxido de Carbono)	100	15	2	0	93	1
Poluição atmosférica	100	15	9	0	250	3
Riscos de Acidentes	100	100	9	2	12	3

Carro*- carro com conversor catalítico

Os resultados do quadro acima apresentado permitem-nos realçar a importância referida sobre medidas de promoção de uso de transportes ativos (também conhecidos por transportes suaves). Com base nestes, a bicicleta é, claramente, um meio de transporte ativo favorável do ponto ecológico.

Para além da promoção de uma mobilidade sustentável, a incorporação da bicicleta num meio de transporte diário traz bastantes vantagens para a sociedade e para o meio ambiente, tais como (Pucher e Buehler, 2008):

- Diminuição da poluição sonora, da poluição atmosférica e menor consumo de recursos não renováveis comparativamente aos transportes motorizados;
- Redução dos espaços públicos e privados necessários para estacionamento;
- Redução de custos de construção de infraestruturas públicas e privadas para os transportes, assim como nos custos de compra do próprio transporte;

- Mais acessível de ser adquirido por todas as classes sociais;
- A única fonte de energia é o próprio condutor, sendo que para além das vantagens ecológicas que fornece, também traz benefícios de saúde;
- Sustentabilidade ambiental, económica e social.

Contrariamente a todos os benefícios que o uso da bicicleta pode trazer, existem alguns fatores que condicionam o seu uso diário. Parkin et al (2008) e Menghini et al (2010) apresentam algumas questões naturais como inconvenientes, tais como o relevo e as condições climáticas desfavoráveis. Estes dois fatores condicionam o uso deste meio de transporte, de modo que o esforço físico necessário para percorrer certas encostas íngremes e condições climáticas, como chuva intensa e neve, não permitem que este seja a primeira escolha do condutor. Para além destes fatores, Kemperman e Timmermans (2009) defendem que o desenho urbano e a forma de uma cidade podem ser condicionantes para o uso deste meio de transporte, sendo que quanto mais densas são as interações e equipamentos dentro de uma cidade, mais favoráveis são os acessos a estes, usando a bicicleta. Em concordância com estes fatores está AASHTO (1999), referindo um aumento do tráfego de bicicletas nas áreas residenciais aquando da existência de destinos acessíveis. Isto significa que quanto maior for a oferta de serviços e equipamentos junto das zonas residenciais, maior será a afluência ao uso da bicicleta como meio de transporte.

2.2. Acessibilidade e respetivos Indicadores: Definições

A acessibilidade é um conceito multifacetado que tem vindo a atrair novos investigadores a criarem novos modelos e novas formas de visualizar o conceito. Contudo, este facto conduz a que sejam criadas demasiadas definições e abordagens ao conceito, e ainda resultados da modelação com altas resoluções (Geurs et al, 2015).

Um fator importante, na definição da acessibilidade aos empregos, é referente ao facto que a maioria das pessoas não pretende que a distância entre o local de trabalho e o local de residência seja curto. Posto isto, é frequente que a população tenha preferência por ter uma distância mínima entre os dois sítios (Redmond e Mokhtarian 2001; Mokhtarian e Salomon, 2001; Ory et al, 2004; citado por Van Wee, 2016).

Segundo Cascetta et al (2013), a acessibilidade é considerada um conceito que relaciona a as várias oportunidades de interação de uma área territorial e um sistema de transportes existente capaz de servi-las. Portanto, o cálculo de indicadores relativos a este conceito tem sido abordado de variadas maneiras, tais como:

- i. Modelação e compreensão de interações entre os transportes e o uso do solo;
- ii. Modelação e compreensão na procura de viagens;
- iii. Análise da eficácia dos projetos de transportes relativamente aos objetivos de planeamento;
- iv. Resolução de problemas de localização ótima para serviços públicos.

Os mesmos autores defendem ainda que a acessibilidade pode ser vista como um conceito especializado em acessibilidade ativa e passiva. A ativa (ou pessoa) refere-se à destreza que existe para a realização de atividade (entretenimento, trabalho, entre outros), localizada numa certa zona. Sob outra perspectiva, a acessibilidade passiva (ou local) diz respeito à destreza de ser alcançada por possíveis interessados (clientes ou trabalhadores) para uma determinada atividade numa certa zona.

Para o cálculo da acessibilidade podem ser utilizados indicadores. Um indicador de acessibilidade, em termos de unidade espacial para a análise, pode ser o próprio, os grupos socioeconómicos, os quais vão ser analisados para o cálculo do indicador, o tipo de oportunidades, o meio de transporte, as origens e destinos, a atratividade dos destinos e a impedância. Para a análise da acessibilidade, a unidade espacial usada pode ser o próprio indivíduo, uma zona ou a sua residência. Os grupos socioeconómicos diferem devido a variados fatores de acordo com a sua situação social, como o género, o tipo de emprego, o rendimento familiar, entre outros. Para estes grupos, e dependendo do grupo em que se inserem, vai ser criado um indicador com base nas condicionantes acima referidas. O meio de transporte entre as origens e os destinos, ou seja, locais a partir dos quais a acessibilidade será estimada, pode ser o veículo automóvel particular, os transportes coletivos ou o modo pedonal. Este meio de transporte pode ser utilizado para alcançar diversas oportunidades como os empregos, escolas, instituições de saúde, áreas de entretenimento, entre outros. A escolha do destino baseia-se na oferta que existe desse tipo de equipamento e na dimensão física e económica que este apresenta. A impedância, como indicador de acessibilidade, simboliza o afastamento espacial entre a origem e o destino e pode ser medida em termos de tempo, custo económico ou distância de viagem (Liu e Zhu, 2004, citado por Gama et al, 2011).

Geurs e van Wee (2004) defendem que podem ser identificadas quatro perspetivas essenciais no cálculo da acessibilidade:

- Indicador de acessibilidade baseada nas infraestruturas;
- Indicador de acessibilidade baseada na localização;
- Indicador de acessibilidade baseada na pessoa;
- Indicador de acessibilidade baseada na utilidade.

Baseado nas infraestruturas, este indicador analisa o nível de serviço das infraestruturas de transportes, como por exemplo, os níveis de congestionamento e as velocidades médias de viagem na rede de transportes. Para além disto, este tipo de indicador é normalmente indicado para o planeamento de transportes. Os indicadores de acessibilidade baseados na localização são importantes no planeamento urbano e em outros estudos, sendo que estes podem ser divididos em quatro grupos diferentes: indicadores de distância, indicadores de contorno, indicadores de potência e fatores de equilíbrio. Destes vários grupos, os de distância são referenciados como os mais simples, de fácil compreensão e revelam a melhor combinação da localização com o sistema de transporte, sempre que seja conhecido destino pretendido. Relativamente aos indicadores baseados na pessoa, estes estudam a acessibilidade a nível individual, incorporando restrições espaciais e temporais, como por exemplo, as atividades em que uma pessoa pode participar numa determinada altura. Os indicadores baseados na utilidade analisam os benefícios económicos que um acesso espacial de distribuição de atividades fornece às pessoas. Este indicador foi criado em estudos económicos.

O conceito de acessibilidade tem vindo a ser bastante discutido por cada vez mais investigadores que tentam descobrir o verdadeiro significado do conceito. Como se trata da palavra-chave do estudo a ser feito, apresentamos de seguida algumas definições importantes de acessibilidade no âmbito do planeamento dos transportes.

- O potencial de oportunidades de interação (Hansen, 1959);
- A medida em que o sistema de transporte terrestre permite (grupos de) pessoas ou mercadorias chegar a destinos ou atividades, por meio de um modo de transporte ou combinação destes (Geurs et al, 2001);
- Facilidade de alcançar as oportunidades de interação a partir de um certo lugar usando um modelo de viagem particular (Liu e Zhu, 2004).
- Capacidade e habilidade de uma pessoa para usufruir das oportunidades e dos serviços disponíveis, no âmbito do planeamento social (Litman, 2008);
- O conceito de acessibilidade pode ser apresentado em termos de atividade ou potencial, que corresponde às oportunidades que são alcançadas e as que poderão ser alcançadas, respetivamente (Litman, 2008);
- Normalmente, a acessibilidade refere-se ao acesso a serviços e destinos, que é comum ser referido aos transportes (Litman, 2008);
- A acessibilidade é uma maneira de medir a extensão e a qualidade da relação entre os padrões de desenvolvimento da terra de uma certa área e os sistemas de transporte que a servem (Cascetta, 2009);

- “Capacidade do meio de proporcionar a todas as pessoas uma igual oportunidade de uso, de uma forma direta, imediata, permanente e a mais autónoma possível” (CML, 2013, citado por Morais, 2013).

Para a realização da presente dissertação foi utilizada uma definição de acessibilidade baseada em Geurs e Ritsema Van Eck (2001), mas adaptada ao enquadramento do presente estudo. Foi então considerada a definição de acessibilidade de uma forma clássica, como função de “desutilidade”, considerada através da soma das impedâncias às oportunidades.

A acessibilidade é melhor ou pior dependendo de diversos fatores. O quadro seguinte (Quadro 2.2) apresenta um resumo destas características, como elas são consideradas atualmente e potenciais melhorias para um planeamento mais abrangente.

Quadro 2.2- Resumo de fatores que influenciam a acessibilidade (Fonte: Litman, 2008)

Nome	Descrição	Considerações Atuais	Melhorias
Procura de Transporte	A quantidade de mobilidade e de acessos que uma pessoa ou empresa podem escolher.	A procura de veículos motorizados é bem medida, mas nos veículos não motorizados não.	Pesquisas estatísticas mais abrangentes de procura de viagem
Mobilidade	Distância e Velocidade de Viagem	Avalia principalmente as velocidades de tráfego de veículos motorizados e distâncias percorridas.	Avaliação mais abrangente da mobilidade usando outros modos de transporte.
Modos de Transporte	A qualidade (de velocidade, conveniência, conforto, segurança, etc.) das várias opções de transporte, incluindo a andar, de bicicleta, de transporte público, etc.	A velocidade e segurança de viagem usando um veículo motorizado são geralmente consideradas, mas outros modos e fatores de viagem são frequentemente ignorados.	Mais avaliação multimodal (velocidade, conveniência, conforto, segurança, etc. de andar, de andar de bicicleta, de viagem, etc.).
Informação do Utilizador	Avaliação de informação fidedigna nas opções de mobilidade e de acessibilidade.	Às vezes considerado para certos modos ou locais, mas raramente são compreensivos.	Informações mais abrangentes e integradas para ajudar os utilizadores a navegar nos sistemas de transporte.

Integração	O grau de integração entre os <i>links</i> do sistema de transporte e os modos.	O transporte através de veículos automóveis geralmente está bem integrado, mas as ligações entre outros modos de transporte não está.	Melhorar a capacidade de ligação dos viajantes às várias componentes do sistema.
Acessibilidade	O custo para os utilizadores relativamente aos seus rendimentos.	Os custos operacionais do automóvel e as tarifas de viagem são, geralmente, considerados.	Avaliação mais compreensiva dos custos de transporte relativamente aos rendimentos dos utilizadores.
Fatores de Uso do Solo	Densidade e Mistura do Solo.	Normalmente considerado no planeamento do uso do solo, mas menos no planeamento de transportes.	Medir como os fatores de uso do solo afetam as distâncias e custos de viagem.
Ligações na rede de transportes	Densidade de ligações de estradas e caminhos rodoviários, e a direção da viagem	O planeamento dos transportes começa a considerar os impactos da conectividade das estradas na acessibilidade.	Medir como a conectividade das estradas afeta as distâncias e custos de viagem.
Gestão de Transportes	Saber como a gestão de transportes afeta a acessibilidade.	Considerações limitadas.	Considerar como várias estratégias de gestão de transportes afetam o acesso.
Priorização	Estratégias que permitem que as viagens sejam mais eficazes.	Considerações limitadas.	Considerar estratégias de priorização de transportes
Inacessibilidade	O valor da inacessibilidade e do isolamento.	Nem sempre é considerado no planeamento de transportes.	Reconhece, às vezes, o valor do acesso limitado.

2.3. A tecnologia SIG

A tecnologia SIG é uma ferramenta importante na modelação de sistemas da mais variada índole, como por exemplo nos sistemas de transporte. Os ambientes computacionais destinados à construção destes sistemas tornam acessível a gestão, análise e manipulação da informação necessária. Por ser uma ferramenta tão diversificada, esta tecnologia é um

instrumento de eleição para a gestão e planeamento do território e da cidade (Gama et al, 2011).

Para que seja possível ter acesso a Sistemas de Informação Geográfica que funcionem de forma objetiva e assertiva é necessário que todas as suas componentes trabalhem em conformidade. Estes sistemas contêm cinco componentes imprescindíveis: o *hardware*, o *software*, os dados, os métodos e a componente humana através dos utilizadores. (González et al, 2012, citado por Morais, 2013).

Os SIG combinam mapas digitais com bases de dados tradicionais e têm a possibilidade de apresentar representações visuais de informação. Para além disso, fornecem opções de modelagem espacial que explicam a influência de vários fatores (Abousaeidi et al, 2016). As suas bases estão fortemente baseadas em mapas e, mesmo hoje, é comum apresentar os SIG através das ideias de representação dos conteúdos (Nayati, 2008, citado por Abousaeidi et al, 2016). A tecnologia SIG é capaz de produzir mapas e representar uma rede de rotas reais que permitem aceder aos mercados no menor tempo possível. Para além disso, este modelo possui uma interface fácil de manobrar que permite utilizadores comunicarem e interagirem facilmente com outras aplicações (Abousaeidi et al, 2016).

Este é um sistema concebido para capturar, armazenar, manipular, analisar, gerir e apresentar todos os tipos de dados geográficos e espaciais, de modo a ajudar a visualizar, questionar e até interpretar dados para entender relacionamentos, padrões e tendências (Clarke, 1986 citado por Izadikhah e Saen, 2016). Esta tecnologia torna ainda a tomada de decisões mais fácil relativamente à localização.

Estes sistemas são a ciência emergente que cria uma vertente completa após o agrupamento de diferentes áreas de investigação, tais como geografia, informática, matemática, estatística, gestão, pesquisa e mapeamento de ciência. Baseados em dados geoespaciais, o sistema recolhe, insere, administra, edita, consulta, apresenta modelos e revela no fim os dados espaciais. O método de estudo do modelo espacial permite obter diversas informações espaciais e dinâmicas, que proporciona uma configuração do sistema de tecnologia do computador para poder investigar e tomar decisões no setor da Geografia. É cada vez maior a utilização destas ferramentas no planeamento urbano, na gestão do território, no setor imobiliário e na prevenção e mitigação de desastres. Isto deve-se à elevada eficiência na análise espacial, na gestão de dados, na análise multi-fator e em capacidades de controlo dinâmico (Wei, 2012). O termo espacial é devido ao facto de este analisar os dados em qualquer espaço, não se limitando apenas ao espaço geográfico (Goodchild et al, 2005, citado por Morais, 2013).

Quando se processa a análise de acessibilidade usando o *ArcGIS* pode-se recorrer a um conjunto de extensões que permitem gerir, colecionar, manipular e localizar todos os dados necessários para essa análise. As principais ferramentas que contribuem para esse cálculo são: *Spatial Analyst*, *Network Analyst*, *3D Analyst* e o *Patch Analyst* (Liu e Zhu, 2004) (Figura 2.2).

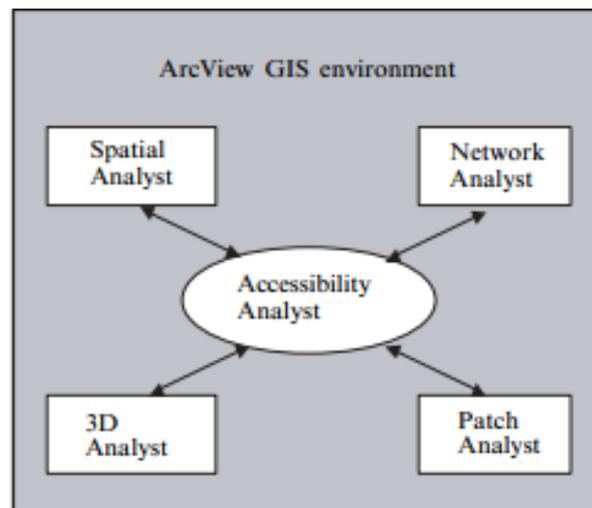


Figura 2.2- Extensões do *ArcGIS* interligadas à análise de acessibilidade (Fonte: Liu e Zhu, 2004)

A componente *Spatial Analyst* fornece ferramentas de modelação e análise espaciais, incluindo análise de proximidade, análise de vizinhança, álgebra de mapas e modelagem do terreno. O *Network Analyst* auxilia na medição da impedância através de funções de análise básica da rede, isto é, permite calcular a distância de percurso em linha reta e/ou o caminho mais curto, e permite determinar o equipamento mais próximo (*closest facility*). O *3D Analyst* é usado para criar modelos de superfície e para visualizar dados em três dimensões. O *Patch Analyst* é usado para gerar a pavimentação de polígonos no plano, que normalmente são usados como unidade espacial. A análise de acessibilidade dispõe de quatro grupos de funções: a preparação de dados, a medição da impedância de viagem, o cálculo da acessibilidade e a visualização dos resultados (Liu e Zhu, 2004). Como se verá no capítulo da metodologia, estes quatro grupos de funções foram a base de trabalho da nossa análise de acessibilidade ciclável realizados na presente trabalho.

2.4. Estudos anteriormente realizados sobre o tema

A transformação de um conceito de acessibilidade para o cálculo dos seus princípios envolve cálculos matemáticos e ferramentas em tecnologia SIG (Cervero, 2005). Segundo este autor,

existem várias abordagens comuns para a medição da acessibilidade, sendo duas das mais frequentes: a medição com base na gravidade (modelo de distribuição de viagens com restrições individuais) e a medição de isócronas (através de uma contagem cumulativa de oportunidades alcançáveis dentro de um determinado tempo ou distância de viagem). Tal como o autor anteriormente citado, Lacono et al, (2010) refere o modelo de gravidade como uma função de t_{ij} , que representa a impedância de viagem entre duas zonas (i e j), podendo esta ser expressa em tempo, distância ou custo (1).

$$A_i = \sum_j a_j f(t_{ij}) \quad (1)$$

Este modelo representa a acessibilidade numa zona i (A_i), com a_j referente às atividades na zona j .

Enquanto nas viagens de veículos motorizados os tempos de viagem e o nível de tráfego tendem a ser fatores decisivos, as opções de rotas para os não motorizados tendem a incluir aspetos que podem ser mais qualitativos, experienciais e operacionais (Page, 2005; citado em Lacono et al,2010).

No âmbito das investigações realizadas com base em cálculos matemáticos e na tecnologia SIG, foi dada uma especial atenção a um estudo realizado em Inglaterra por Parkin e Rotheram (2010). Esta análise permitiu determinar características médias de velocidade e de aceleração de um ciclista relativamente à inclinação e outros fatores, através de informações de mapeamento diárias de GPS e dois modelos de regressão linear de velocidade e aceleração. Foi calculada a potência mecânica útil utilizada pelo ciclista considerando a soma das potências do atrito (P_{at}), a potência relativa à gravidade (P_g) e a potência relativa à resistência do ar (P_{ar}), como mostra na equação a seguir demonstrada.

$$W = \frac{C_v}{n_{mech}} \left\{ \sum m g \left[C_r + \frac{s}{100} + \frac{a}{g} \left(1 + \frac{mv}{\sum m} \right) \right] + \frac{1}{2} C_d A \rho C_v^2 \right\} \quad (2)$$

Em que W é a Potência total (W), C_v a velocidade da bicicleta (m/s), n_{mech} o peso do condutor e da bicicleta (kg), g a aceleração da gravidade (m/s^2), C_r o coeficiente da distância percorrida, s o gradiente (%), a é a aceleração da bicicleta (m^2/s), m_v é a massa rotacional efetiva das rodas e dos pneus (kg), C_d é o coeficiente de arrasto aerodinâmico, A é a área frontal da bicicleta e do ciclista (m^2), ρ é a densidade do ar (kg/m^3). Os resultados obtidos por Parkin e Rotheram foram usados para a programação dos scripts usados na presente dissertação e serão apresentados num quadro no capítulo da metodologia (Quadro 3.2).

Outra das investigações base na dissertação foi a do artigo de Minetti et al (2002). Este artigo analisa o custo de energia metabólica (em Joules) associado à atividade física de caminhar e correr em subidas e descidas íngremes com declives extremos. Para estas atividades físicas são definidos valores de C_w e de C_r , como os custos de energia metabólica a caminhar e a correr, respetivamente. O estudo foi realizado com base numa experiência feita com 10 homens a correrem numa passadeira, com inclinações a variar entre os -45% e os 45%, em diferentes velocidades. É definido que para o cálculo dos custos energéticos em modo pedonal são relevantes as características do terreno e a velocidade de circulação. O gráfico a seguir representado (Figura 2.3) mostra os resultados dos custos de energia metabólica e compará-los com valores obtidos em trabalhos anteriores.

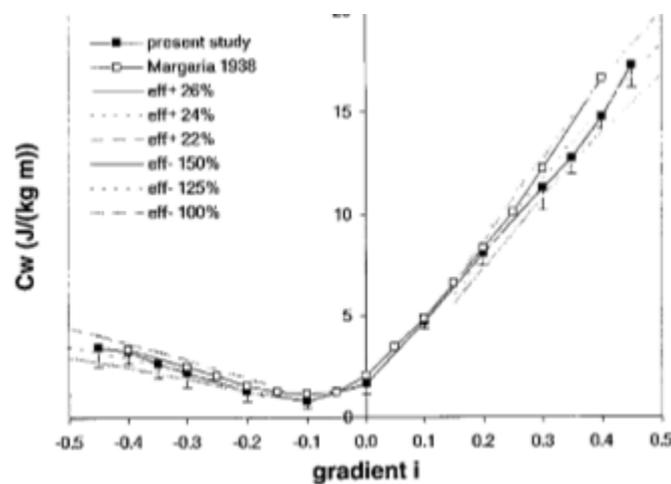


Figura 2.3 - Custos de energia metabólica pedonal (C_w) (Fonte: Minetti et al, 2002)

Como se pode ver no gráfico, o esforço é claramente superior quando os declives são positivos, isto significa que os custos metabólicos são maiores numa subida do que numa descida. Foram calculadas a partir dos dados regressões polinomiais de 5ª ordem para descrever com exatidão a relação média entre C_w e o gradiente i , respeitando o intervalo de valores considerado no estudo (3).

$$C_{w_i} = 280.5 i^5 - 58.7 i^4 - 76.8 i^3 + 51.9 i^2 + 19.6 i + 2.5 \quad (3)$$

O cálculo de medidas de acessibilidade exige vários conjuntos de dados relacionados com o comportamento de viagem e com o uso do solo, cada um dos quais apresenta desafios únicos para investigadores que lidam com estudos de veículos não motorizados. Por exemplo, medidas de acessibilidade robustas são construídas em torno de modelos que representam o comportamento humano (onde comparam o quão longe estes estão dispostos a ir).

Infelizmente os dados necessários para construir esses modelos de forma confiável são geralmente escassos para os tipos de mobilidade pedonal e ciclável. As características dos utilizadores e das viagens usando este tipo de transportes são, normalmente, agregadas no mesmo nível que as viagens motorizadas. Um exemplo comum de estudo é uma análise de empréstimos de valores de impedância, através de um modelo de viagem localmente regulado (Lacono et al, 2010). Os resultados obtidos desses dados podem estar alterados devido ao meio ambiente do local, mais especificamente, os resultados dos veículos não motorizados. Idealmente, os dados da pesquisa das viagens seriam recolhidos todos os anos e deveriam cobrir todas as estações do ano. Como não é possível, esta recolha é feita durante um período de vários meses, com certas condições climáticas e em locais onde existem variações climáticas sazonais significativas, que conduzem a importantes informações no caso de veículos não motorizados. Por exemplo, se os dados da pesquisa forem recolhidos durante os meses mais quentes e mais secos, é possível que as mudanças no comportamento de viagem com o clima frio e húmido possam passar despercebidas. Estas mudanças podem sobrevalorizar os valores obtidos relativamente ao número de pedestres e ciclistas durante os períodos de inverno, e podem ainda alterar o comprimento e a distância de percurso. Consequentemente, os valores de impedância relevantes iriam ser alterados. A estimativa de funções de impedância especializadas utilizadas, especificamente em veículos não motorizados, requer então dados de viagem adequados, que permitam capturar o comportamento de pedestres e de ciclistas. Idealmente, isso incluiria uma pesquisa focada e projetada essencialmente para superar esses tipos de comportamento ou recolha de dados, usando Sistemas de Posicionamento Global (GPS) - uma alternativa que é relativamente mais dispendiosa. Na ausência de tais dados, pode ser usada uma pesquisa regional de viagens domésticas, na medida em que inclui, especificamente, viagens de veículos não motorizados (Lacono et al, 2010).

A escolha da melhor rota (sendo veículo motorizado ou não) é um assunto que é bastante debatido por vários autores, sendo que o método de análise e os fatores decisivos são os elementos de diferenciação entre as diferentes investigações. O estudo realizado por Abousaeidi et al (2016) teve a intenção de determinar o caminho mais curto em termos de tempo, usando diferentes rotas no transporte de produtos agrícolas. Neste foi usado o *software ArcGIS*, especificamente a extensão *Network Analyst*. A razão mais importante para o uso do *Network Analyst* é que esta ferramenta permite o cálculo e o planeamento de rotas com a possibilidade de restringir qualquer ação a certas condições, nomeadamente em casos de minimização de custos em distância e/ou tempo de percurso entre as origens e destinos previamente definidos (Memon, 2005 citado por Abousaeidi et al, 2016).

Gohari (2010) criou um modelo para analisar quais os equipamentos mais próximos e os caminhos mais curtos para alcançá-los com base em tecnologia SIG, considerando um

conjunto de diversos fatores relevantes para o sucesso do modelo. Já existem vários estudos realizados sobre a escolha da melhor rota aquando do uso da bicicleta (Stinson e Bhat, 2003; Menghini et al, 2010). Segundo Stinson e Bhat (2003), o tempo de viagem é o fator mais importante na escolha de uma rota. Estes autores têm preferência por um percurso em terrenos com colinas moderadas quando comparado com os mesmos terrenos planos. Menghini et al (2010) defende que os ciclistas tentam ao máximo evitar zonas em que tenham gradientes de declives elevados.

Gama et al (2011) desenvolveram um estudo na cidade de Coimbra (cidade em estudo) para a modelação de uma rede de transportes usando a tecnologia SIG, tendo sido criadas duas técnicas para o cálculo da acessibilidade a certas zonas da cidade, mais especificamente, zonas com espaços verdes. A partir dessas duas técnicas, o uso de matrizes origem-destino do edificado para pontos interiores de interesse nesses espaços e o uso de zonas de influência jardim a jardim considerando as suas múltiplas entradas, obtiveram alguns valores de indicadores de acessibilidade a espaços verdes, considerando diferentes meios de transporte (rede multi-modal) para atingir os mesmos. O uso dos SIG neste estudo, especificamente a extensão do *ArcGIS - Network Analyst*, permitiu a modelação dos elementos pertinentes e a determinação dos indicadores. Os resultados obtidos neste estudo foram diversificados e apresentados em mapas e quadros, devido às várias configurações possíveis da rede relativamente à diversificação dos meios de transporte existentes e da variedade de horas de um dia e de dias da semana.

No capítulo seguinte, irá ser explicado todos os passos executados para a obtenção dos indicadores de acessibilidade criados, tendo como base a distância de percurso e a energia metabólica de percurso. Posteriormente, serão ilustrados, em formato de mapas, os valores obtidos desses indicadores. O estudo realizado foi semelhante ao referido anteriormente (Gama et al, 2011), pretendendo-se, contudo, que este seja mais completo e que apresente resultados sobre a acessibilidade aos diversos equipamentos, usando apenas o meio de transporte suave ciclável. Tal como no trabalho feito por Gama et al (2011), também aqui foi usado o *ArcGIS* e a sua extensão *Network Analyst*.

3. METODOLOGIA

O objetivo deste estudo foi fazer uma análise da acessibilidade na cidade de Coimbra usando como modo específico de transporte um modo ativo, a bicicleta convencional. A acessibilidade foi estudada usando como definição principal a medida clássica de acessibilidade como uma desutilidade (quanto maior a distância mais desfavorável é a acessibilidade). Posto isto, e a partir desta medida, a acessibilidade foi calculada de forma absoluta e relativa, dando origem a 4 indicadores globais para a cidade, conforme será descrito neste capítulo. Todos os cálculos referentes à análise da acessibilidade foram efetuados recorrendo a um SIG, contendo, entre outros, a rede viária de Coimbra e a localização de equipamentos urbanos. O presente estudo foi desenvolvido em 4 fases que estão indicadas na Figura 3.1 abaixo apresentada.



Figura 3.1 – Etapas da Metodologia do Trabalho

3.1. Recolha de Dados

Numa primeira fase foi feita uma recolha e preparação dos dados no ambiente SIG, *ArcGIS*. Foram introduzidas as *shapefiles* da rede de Coimbra e o respetivo mapa satélite.

Seguidamente utilizou-se a ferramenta de georreferenciação (*Georeferencing*) do *ArcGIS* para unificar os Sistemas de Coordenadas. Para além da rede e do mapa satélite, foram introduzidas as *shapefiles* relativas aos equipamentos existentes e relevantes na cidade (*facilities*), disponíveis de projetos anteriores. A última fase da recolha de dados foi a construção de uma grelha poligonal de 50 m × 50 m e respetivos centróides. Estes polígonos tomaram o papel das grandezas A_i da fórmula (1). Em seguida, procedeu-se ao cálculo da distância dos centróides à rede e foram removidos todos os elementos (polígonos e centróides) que se encontrassem a mais de 100 m da rede, de modo a evitar que zonas despovoadas fossem representadas nos mapas de acessibilidade.

Foram também definidos os pesos dos tipos de equipamento (w_j), ou seja, foi definida qual a importância que cada tipo tem no quotidiano de uma pessoa. Para tal, utilizou-se um quadro (Quadro 3.1), que já tinha sido considerado num trabalho realizado anteriormente relacionado com a impedância pedonal (Moreira, 2016).

Quadro 3.1 – Peso dado aos vários tipos de equipamento (Citado em Moreira, 2016)

Equipamentos de 1 ^a Importância ($w_j = 3$)	Equipamentos de 2 ^a Importância ($w_j = 2$)	Equipamentos de 3 ^a Importância ($w_j = 1$)
Equipamentos Escolares 1 (Infantários e Escolas Primárias)	Equipamentos Escolares 3 (Ensino Secundário)	Associações Culturais e Desportivas
Mercearias	Centros Comerciais	Câmara Municipal
Padarias e Pastelarias	Entretenimento	Correios
Equipamentos Escolares 2 (Escolas de 2 ^o e 3 ^o Ciclo)	Acesso Primário de Saúde	Equipamentos Escolares 4 (Ensino Superior)
	Farmácias	Equipamentos Desportivos
	Restaurantes	Forças de Segurança
		Igreja
		Juntas de Freguesia

3.2. Programação da Rede

A programação da rede foi feita a partir de elementos já existentes de projetos anteriores. Estavam já disponíveis cinco grandezas fundamentais na *feature class* da rede viária do SIG de Coimbra, nomeadamente os comprimentos a subir, a descer e no plano de cada arco da rede (respetivamente L_{up} , L_{down} , L_0), e os declives médios (ponderados ao comprimento) dos

segmentos ascendentes e descendentes de cada arco (S_{up}, S_{down}). Todas estas grandezas são relativas ao sentido *From-To* dos arcos, tal como inscrito na rede viária, e arredondadas ao inteiro mais próximo, por razões que se tornarão claras mais adiante.

As supracitadas grandezas foram em seguida usadas para o cálculo da energia metabólica necessária para cruzar cada arco da rede, em ambos os sentidos. Este cálculo foi executado atendendo as seguintes premissas:

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 (inteiros) de declives inferiores a -13% ou superiores a 8%, considera-se que o ciclista desmontará da bicicleta, 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 começa a ser superior à energia consumida a caminhar. Para declives de desmonte foi, portanto, usada a fórmula de Minetti (3), multiplicada pelo peso médio dos sujeitos de estudo de Parkin (80 kg) mais o peso da bicicleta (15 kg) e pelo comprimento a subir/descer:

$$E_{Bike}^{FT/TF} = C_w L \times (95 \text{ kg}) \quad (4)$$

Com C_w a energia metabólica por kg.m para o declive a subir/descer de Minetti, L o comprimento a subir/descer e 95 kg o peso médio do ciclista mais bicicleta.

O resultado de (4) foi subsequentemente colocado em dois campos da tabela associada da rede viária, de nomes respetivamente Ebike_FT e Ebike_TF (correspondendo à energia necessária num sentido e no sentido oposto).

B. Para declives, em que o ciclista segue a sua viagem montado na bicicleta (-12% a +7%), foi usada a tabela de Parkin (Quadro 3.2, abaixo). Para declives entre -12% e -3% o esforço metabólico é zero uma vez que o ciclista rola apenas por efeito da gravidade. Para declives entre -2% e +7% o esforço metabólico foi calculado dividindo a potência correspondente indicada no Quadro 3.2, que é uma potência útil às rodas, pelo rendimento muscular (η), que para o pedalar se situa entre 20 e 25%. É sabido que este rendimento diminui à medida que o esforço aumenta. Por esta razão, considerou-se um rendimento de 25% entre -2% e 2% de declive e uma diminuição de 1% no rendimento por cada 1% de declive positivo adicional, terminando nos 20% quando o ciclista sobe um declive de 7%. (Nota para o leitor: atenção que as percentagens referem-se por vezes a grandezas diferentes.) Seguidamente, a energia metabólica para cada segmento ascendente, descendente ou plano foi calculada através da fórmula $E_{bike}(S, L) = P_{\text{útil}} \frac{L}{\eta v}$, com L o comprimento do segmento, $P_{\text{útil}}$

a potência indicada no Quadro 3.2 para o declive do segmento (S) e v a velocidade média nesse segmento (c.f. Quadro 3.2). A energia metabólica afeta a cada arco foi finalmente calculada, nos sentidos *From-To* e *To-From*, recorrendo à ferramenta *Field Calculator* do *ArcGIS* usando as fórmulas:

$$E_{\text{bike}}^{FT} = E_{\text{bike}}(S_{\text{up}}, L_{\text{up}}) + E_{\text{bike}}(-S_{\text{down}}, L_{\text{down}}) + E_{\text{bike}}(0, L_0) \quad (5)$$

$$E_{\text{bike}}^{TF} = E_{\text{bike}}(-S_{\text{up}}, L_{\text{up}}) + E_{\text{bike}}(S_{\text{down}}, L_{\text{down}}) + E_{\text{bike}}(0, L_0) \quad (6)$$

Sendo o resultado colocado nos campos da tabela associada da rede viária $E_{\text{bike_FT}}$ e $E_{\text{bike_TF}}$. Quando o sentido de direção FT é ascendente, no sentido contrário (TF) é descendente, daí o sinal negativo existente nas equações (5) e (6).

Quadro 3.2 - Valores da Velocidade, Aceleração e Potência consoante os declives usando a bicicleta. (Adaptada de Parkin e Rotheram, 2010)

Gradiente (%)	Velocidade Média (m/s)	Potência à Velocidade Média (W)	Rendimento metabólico (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 6 e 7% é conhecido (AASHTO, 1999) que o ciclista apenas está disposto a percorrer, em média, um comprimento máximo de 240 m e 120 m, respetivamente. Assim, para arcos que apresentem declives a subir nestes valores e que sejam maiores que os mencionados comprimentos máximos, considera-se que o ciclista percorre esses comprimentos montado e que desmonta da bicicleta para o comprimento a subir remanescente do arco. A fórmula no *Field Calculator* para $E_{\text{bike_FT}}$ e $E_{\text{bike_TF}}$ é então uma combinação das apresentadas nas alíneas A. e B. acima.

Preenchidos $E_{\text{bike_FT}}$ e $E_{\text{bike_TF}}$, o último passo na programação da rede consistiu na criação de um *Network Dataset* no *ArcGIS*, entidade que é usada pelo SIG para uma gama

variada de cálculos de roteamento. Este *Bike Network Dataset* foi embebido com a informação dos campos Ebike_FT e Ebike_TF e comprimentos 3D dos arcos da rede.

3.3. Indicadores de Acessibilidade

A programação da rede, que originou o *Bike Network Dataset*, definiu a impedância ao modo ciclável arco-a-arco. Esta informação foi então utilizada para definir e calcular os indicadores de acessibilidade em tecnologia SIG. Foram definidos quatro destes indicadores, o primeiro dos quais avalia a acessibilidade absoluta de cada polígono da grelha, em que a cidade foi dividida, e os outros três avaliam a acessibilidade relativa, no sentido da fração de oportunidades ao alcance de cada polígono, de várias formas. O alcance é definido como o esforço metabólico pedonal correspondente a uma viagem de ida e volta a um equipamento localizado a 1000 m do centróide desse polígono (embora num dos índices varie consoante a importância do equipamento). Vejamos agora a definição destes quatro indicadores.

Bike Index 0

Este indicador dá-nos o esforço metabólico médio necessário para aceder a cada tipo de equipamento, pesado pela importância deste. Aqui o acesso dá-se desde o centróide i em consideração, até ao equipamento do tipo j mais próximo. O esforço metabólico será, em Joules, a energia despendida a ir e voltar em bicicleta do centróide ao equipamento. Para resolver este problema de roteamento utilizou-se a extensão *Closest Facility* do *ArcGIS*, minimizando a distância 3D entre o centróide (*incident*) e o equipamento (*facility*) e acumulando a energia Ebike. Note-se que não se minimizou 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. Esse esforço é, por seu turno, acumulado numa variável auxiliar durante o cálculo de *Closest Facility* e em seguida transposto para a *feature class* dos centróides da grelha através de um *join*. Para o cálculo dos indicadores *Bike Index 2* e *3*, o problema *Closest Facility* foi, na verdade, resolvido para os três equipamentos mais próximos e o valor do esforço para cada tipo de equipamento passado à *feature class* dos centróides. No quadro 3.3, apresenta-se a fórmula matemática que representa este cálculo, juntamente com outras fórmulas para os outros indicadores.

Bike Index 1

Este é um indicador relativo, de certa forma mais humano, dado que nos dá a fração de equipamentos ao alcance de uma viagem de bicicleta, pesados pela sua importância. O seu cálculo foi efetuado da seguinte forma: numa variável auxiliar da tabela associada da *feature class* dos centróides foi colocado o indicador binário em que 1 significa que o equipamento do tipo j está acessível de bicicleta e 0 que não está. Para um equipamento estar acessível o valor

de Ebike (ida e volta) não pode exceder o valor da energia gasta por uma pessoa de 80 kg percorrendo a pé uma distância plana de 1000 m (500 m ida + 500 m volta). Este valor é equivalente, da fórmula de Minetti (3), a $2,5 \times 80 \times 1000 = 200$ kJ metabólicos. O valor deste indicador oscilará entre 0 e 1, com 0 a significar nenhum equipamento ao alcance da bicicleta e 1 que todos os tipos de equipamento estão ao alcance da bicicleta. Um valor, p.ex. $a_i = 0.7$, significará que 70% dos equipamentos, tendo em conta o peso da sua importância, estará ao alcance do polígono cujo centróide é i .

Bike Index 2

Este indicador segue o mesmo espírito que o *Bike Index 1*, mas desta feita pretende-se avaliar também a liberdade de escolha para cada tipo de equipamento ao alcance da bicicleta. Assim, se um centróide i tiver três equipamentos ou mais do mesmo tipo ao alcance, terá 100% de contribuição deste 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 três deles ao alcance.

Bike Index 3

Por último, calculou-se um indicador que 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 é menor. Para o cálculo foi necessário adicionar duas variáveis auxiliares binárias na *feature class* dos centróides para cada tipo de equipamento, indicando se um equipamento se está (1) ou não (0) ao alcance da bicicleta, desta feita para um esforço pedonal equivalente a $\frac{1000 m}{w_j}$. Assim, os equipamentos de peso 3 (mais importantes, portanto frequentados mais regularmente), só estarão em alcance se o esforço de ida e volta em bicicleta for inferior ao esforço pedonal de ida e volta no plano correspondente a 333 m. Idem para os equipamentos de peso 2, desta feita para 500 m, e ainda os equipamentos de peso 1 (raramente frequentados) para 1000 m nos dois sentidos. Como os dois indicadores acima, este índice situa-se também entre 0 e 1.

Índices Diferenciais

Para avaliar a real influência do relevo na cidade de Coimbra, os cálculos dos quatro índices acima foram repetidos assumindo que a cidade era completamente plana. Isto permitiu construir mapas diferenciais representando a diferença entre a situação no terreno real e a hipotética da situação da cidade plana.

Nos Quadros abaixo (Quadro 3.3, Quadro 3.4, Quadro 3.5, Quadro 3.6) apresentam-se explicitamente as fórmulas matemáticas que traduzem os índices acima descritos.

Sejam:

- I_{ij}^k Impedância desde o centróide i ao k -ésimo equipamento mais próximo de tipo j .
Nota: Neste estudo apenas se considerou $k = 1,2,3$.
- $I_{ij}^{k,flat}$ Impedância no plano (todos arcos com declive 0) desde o centróide i ao k -ésimo equipamento mais próximo de tipo j .
- w_j Peso dos equipamentos de tipo j .
- L_k Fator de ponderação pela liberdade de escolha ao k -ésimo equipamento mais próximo. Valores usados na tese: $\vec{L}_1 = (0,7; 0,2; 0,1)$.
- $X_{ij}^{k,1000}$ 1 se a impedância I_{ij}^k for inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer 1000 m em modo pedonal no plano (500 m ida + 500 m volta), 0 caso contrário.
- $X_{ij}^{k,freq}$ 1 se a impedância I_{ij}^k for inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ em modo pedonal no plano para um equipamento de peso k , 0 caso contrário.
- $Y_{ij}^{k,1000}$ 1 se a impedância $I_{ij}^{k,flat}$ for inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer 1000 m em modo pedonal no plano, 0 caso contrário.
- $Y_{ij}^{k,freq}$ 1 se a impedância $I_{ij}^{k,flat}$ for inferior ao esforço metabólico equivalente a percorrer $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ em modo pedonal no plano para um equipamento de peso k , 0 caso contrário.

Quadro 3.3 - Indicador de Acessibilidade 0

Nome do Índice	Fórmula representativa	Descrição do Índice
BikeIndex0	$B_0(i) = \frac{\sum_j w_j I_{ij}^1}{\sum_j w_j}$	Acessibilidade absoluta do centróide i , isto é, o esforço médio, em joules metabólicos, ao equipamento mais próximo, pesado pela importância destes.
BikeIndex0 Plano	$B_0^{flat}(i) = \frac{\sum_j w_j I_{ij}^{1,flat}}{\sum_j w_j}$	Acessibilidade absoluta plana do centróide i , ou seja, esforço médio no plano, em joule metabólico, ao equipamento mais próximo, pesado pela importância destes.
BikeIndex0 Diferencial	$B_0^{diff}(i) = B_0(i) - B_0^{flat}(i)$	Acessibilidade absoluta diferencial do centróide i , ou seja, efeito do relevo sobre o esforço médio, em joule metabólico, ao equipamento mais próximo, pesado pela importância destes. Tendência: $B_0^{diff}(i) \geq 0$.

Quadro 3.4- Indicador de Acessibilidade 1

Nome do Índice	Fórmula representativa	Descrição do Índice
BikeIndex1	$B_1^{1000}(i) = \frac{\sum_j w_j X_{ij}^{1,1000}}{\sum_j w_j}$	Acessibilidade relativa do centróide i a 1000 m, ou seja, fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis até 1000 m de esforço metabólico, pesado pela importância destes. Gama de valores: $B_1^{1000}(i) \in [0,1]$.
BikeIndex1 Plano	$B_1^{1000,flat}(i) = \frac{\sum_j w_j Y_{ij}^{1,1000}}{\sum_j w_j}$	Acessibilidade relativa plana do centróide i a 1000 m, isto é, fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis no plano até 1000 m de esforço metabólico, pesado pela importância destes. Gama de valores: $B_1^{1000,flat}(i) \in [0,1]$.
BikeIndex1 Diferencial	$B_1^{1000,diff}(i) = B_1^{1000}(i) - B_1^{1000,flat}(i)$	Acessibilidade relativa diferencial do centróide i a 1000 m, que é o efeito do relevo sobre a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis até 1000 m de esforço metabólico, pesado pela importância destes. Tendência de valores: $B_1^{1000,diff}(i) \leq 0$. Pode ocasionalmente ser muito ligeiramente superior a zero.

Quadro 3.5- Indicador de Acessibilidade 2

Nome do Índice	Fórmula representativa	Descrição do Índice
BikeIndex2	$B_2^{1000}(i) = \frac{\sum_j w_j L_k X_{ij}^{k,1000}}{\sum_j w_j \sum_k L_k}$	Acessibilidade relativa ponderada do centróide i a 1000 m, que é a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis até 1000 m de esforço metabólico, pesado pela importância destes e ponderado pela liberdade de escolha. Gama de valores: $B_2^{1000}(i) \in [0,1]$.
BikeIndex2 Plano	$B_2^{1000,flat}(i) = \frac{\sum_j w_j L_k Y_{ij}^{k,1000}}{\sum_j w_j \sum_k L_k}$	Acessibilidade relativa ponderada plana do centróide i a 1000 m, que é a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis no plano até 1000 m de esforço metabólico, pesado pela importância destes e ponderado pela liberdade de escolha. Gama de valores: $B_2^{1000,flat}(i) \in [0,1]$.
BikeIndex2 Diferencial	$B_2^{1000,diff}(i) = B_2^{1000}(i) - B_2^{1000,flat}(i)$	Acessibilidade relativa ponderada diferencial do centróide i a 1000 m, que é o efeito do relevo sobre a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis até 1000 m de esforço metabólico, pesado pela importância destes e ponderado pela liberdade de escolha. Tendência de valores: $B_2^{1000,diff}(i) \leq 0$.

Quadro 3.6- Indicador de Acessibilidade 3

Nome do Índice	Fórmula representativa	Descrição do Índice
BikeIndex3	$B_3(i) = \frac{\sum_{jk} w_j L_k X_{ij}^{k, \text{freq}}}{\sum_j w_j \sum_k L_k}$	Acessibilidade relativa frequencista do centróide i , que é a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis até $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ de esforço metabólico, pesado pela importância destes e ponderado pela liberdade de escolha. Gama de valores: $B_3(i) \in [0,1]$.
BikeIndex3 Plano	$B_3^{\text{flat}}(i) = \frac{\sum_{jk} w_j L_k Y_{ij}^{k, \text{freq}}}{\sum_j w_j \sum_k L_k}$	Acessibilidade relativa frequencista plana do centróide i , que é a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis no plano até $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ de esforço metabólico, pesado pela importância destes e ponderado pela liberdade de escolha. Gama de valores: $B_3(i) \in [0,1]$.
BikeIndex3 Diferencial	$B_3^{\text{diff}}(i) = B_3(i) - B_3^{\text{flat}}(i)$	Acessibilidade relativa frequencista diferencial do centróide i , que consiste no efeito do relevo sobre a fração dos tipos de equipamentos mais próximos acessíveis até $\frac{1000 \text{ m}}{w_k}$ de esforço metabólico, pesado pela importância destes e ponderado pela liberdade de escolha. Tendência de valores: $B_3^{\text{diff}}(i) \leq 0$.

Os valores obtidos nestes índices serão apresentados no capítulo do estudo do caso através de mapas contrastados dependendo da qualidade da acessibilidade das diferentes zonas da cidade.

3.4. Mapas

Calculados os índices de acessibilidade, normais e diferenciais, a sua representação no mapa foi feita em SIG, através de um *join* dos centróides aos polígonos correspondentes, após o que os últimos foram pintados em escalas de cor. Através destes mapas consegue-se ter uma panorâmica global da acessibilidade na cidade, de onde se poderão posteriormente tirar conclusões sobre ações de melhoramento, seja da rede viária, seja da localização de equipamentos.

4. ESTUDO DE CASO - COIMBRA

Coimbra é uma cidade localizada na região centro de Portugal que se expandiu a partir do centro histórico. É conhecida internacionalmente por alojar uma das Universidades mais antiga da Europa e de Portugal e, por isso, tem registado aproximadamente 105 842 habitantes (censos 2011), sendo que 30 000 são estudantes. Coimbra é uma cidade com uma orografia condicionante e, juntamente com uma quase inexistência de caminhos cicláveis e de equipamentos de apoio a este meio de transporte suave, torna mais difícil uma possível evolução deste tipo de mobilidade.

Na Figura 4.1 apresenta-se o mapa da cidade de Coimbra com dois dos conjuntos de dados necessários para o estudo da acessibilidade, nomeadamente a rede viária (a vermelho) e a localização dos 19 tipos de equipamentos (19 cores diferentes). Como se pode ver, existe uma maior concentração destes na zona da Baixa, Olivais e Solum. Se por um lado a Solum e a Baixa são zonas relativamente planas e que se pode, desde já, antecipar uma boa acessibilidade destas zonas, por outro, os Olivais, apesar de bem servida de equipamentos, encontra-se numa zona altamente acidentada pelo que a acessibilidade desta zona é, à partida, uma incógnita.

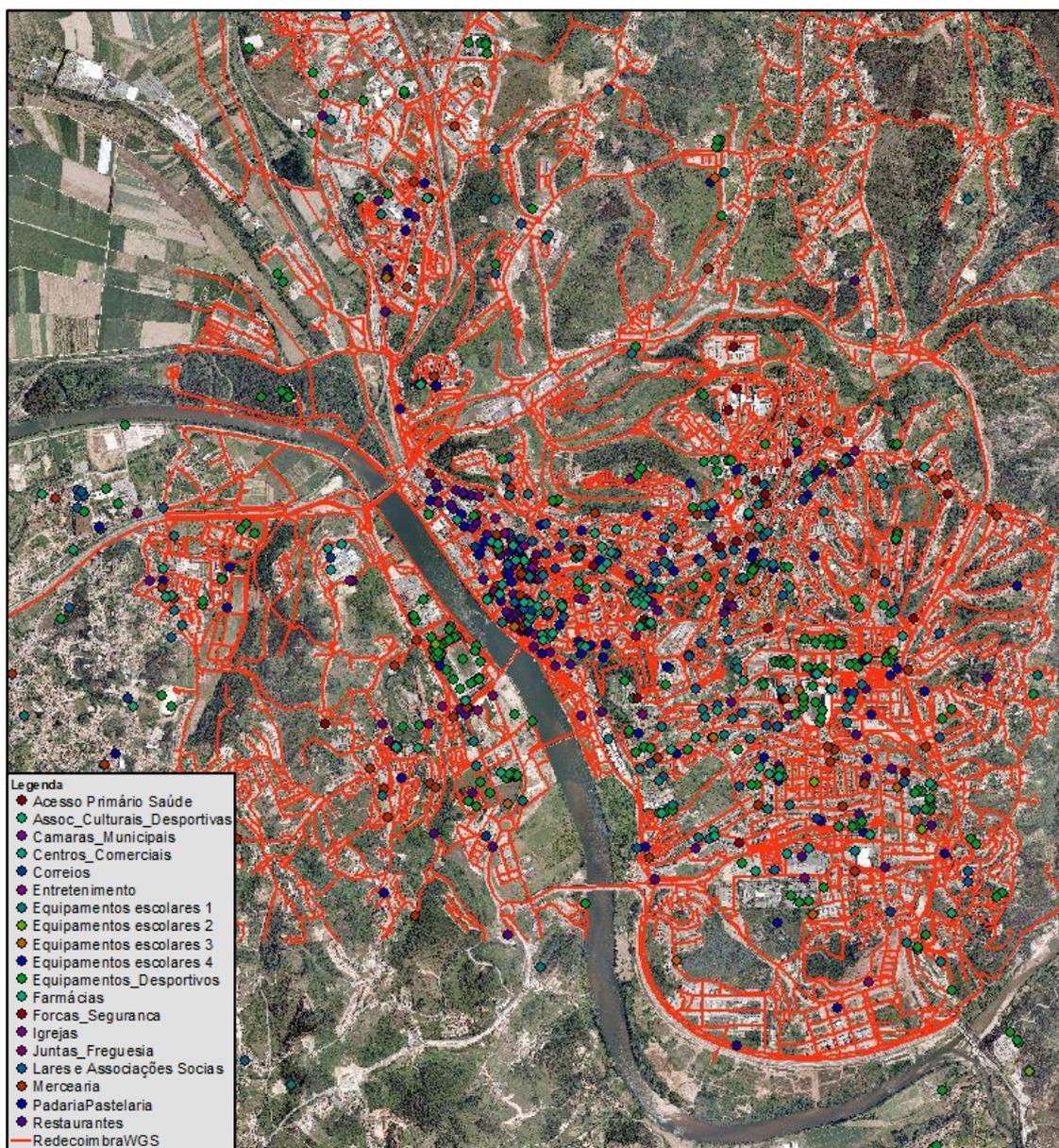


Figura 4.1 - Rede de Coimbra e os equipamentos existentes

Optou-se por não representar a grelha de polígonos *i* nesta figura para não a sobrecarregar visualmente.

4.1. Discussão dos Resultados Finais

Os mapas abaixo apresentam a acessibilidade de Coimbra, no modo ciclável, calculada como foi anteriormente indicada na metodologia. Juntamente com a apresentação dos mapas procedeu-se a uma breve discussão dos mesmos.

4.1.1. *Bike Index 0*

No mapa apresentado na Figura 4.2 estão representados, em formato de mapa, os resultados obtidos para o indicador *Bike Index 0*, no terreno original.

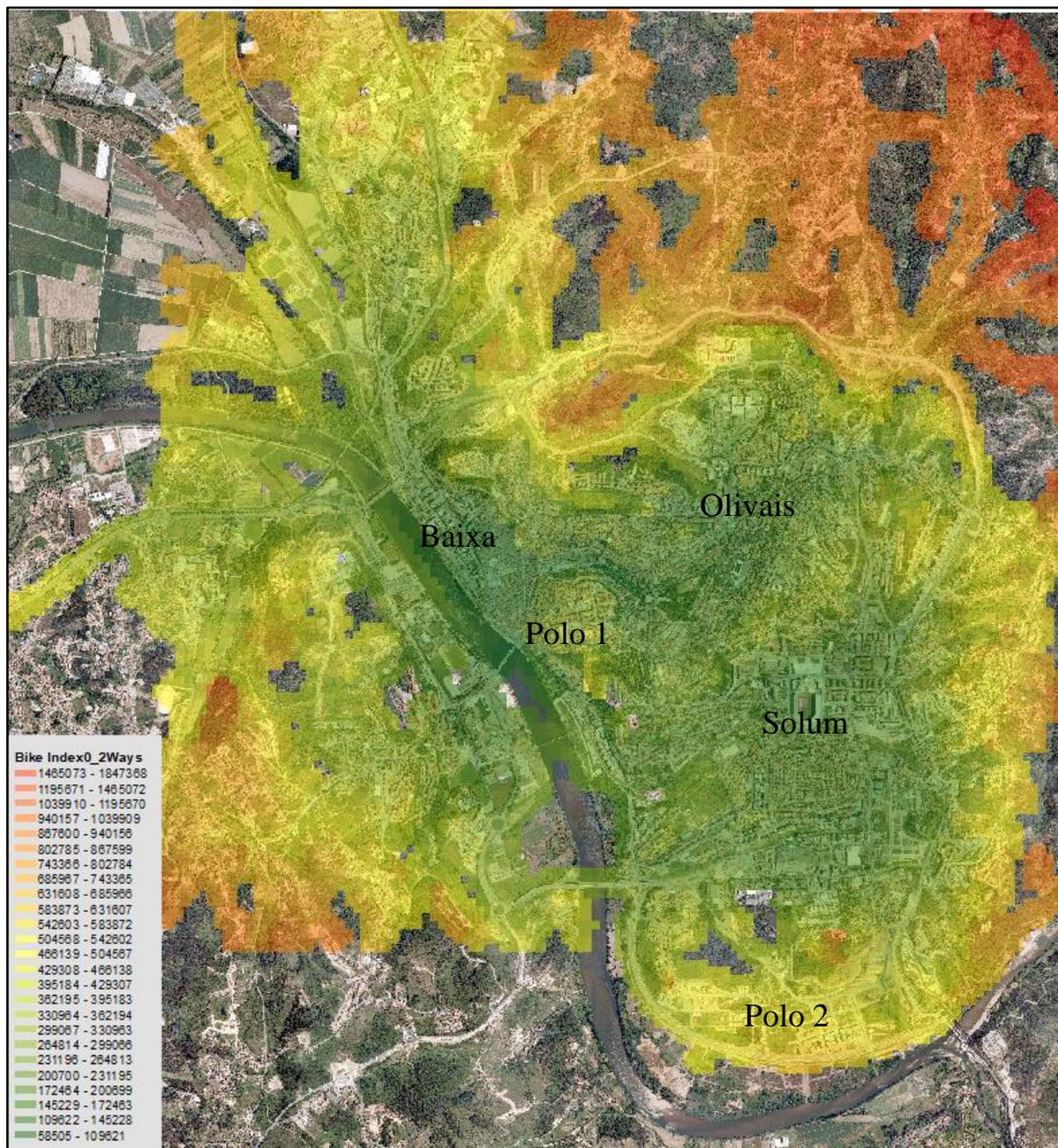


Figura 4.2 - Indicador de Acessibilidade 0 (BIKEINDEX0_2Way), em Joules metabólicos

Na Figura 4.3 encontra-se representado o mapa diferencial, que tem os valores de energia que resultam da diferença entre os valores do *Bike Index 0* (Figura 4.2) e os valores do *Bike Index 0_Flat* (Figura A.1)

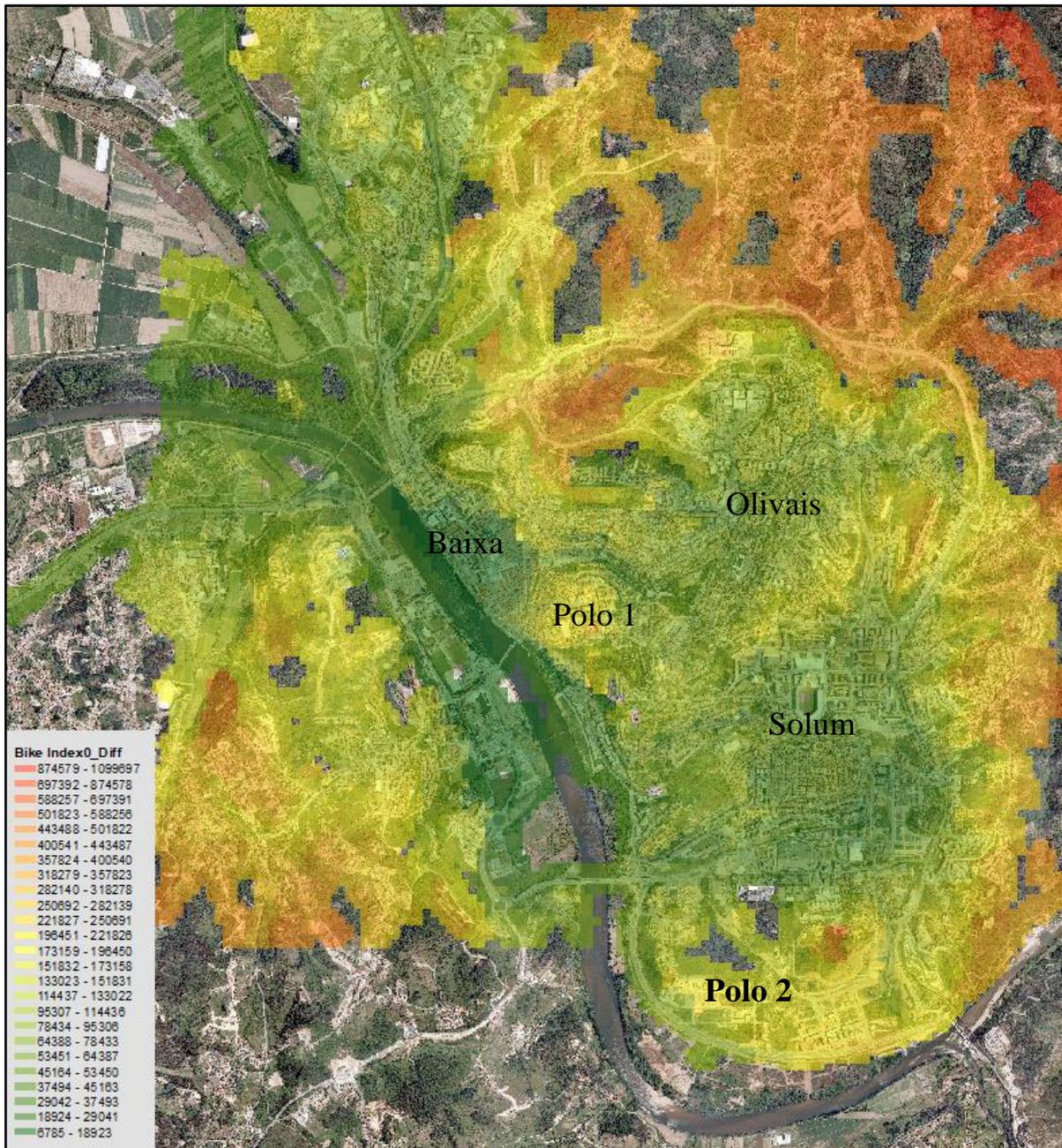


Figura 4.3 - Indicador de Acessibilidade 0_Diferencial (BIKEINDEX0_DIFF), em Joules metabólicos

Através da análise deste primeiro mapa (figura 4.2), podemos verificar que as zonas mais afetadas são as zonas remotas da cidade (zonas mais afastadas do centro urbano), que apresentam valores de esforço médio, aproximadamente, 5 a 10 vezes maiores do que o esforço máximo admissível (200 kJ). Devido ao facto destas zonas não disponibilizarem oportunidades de interação suficientes para satisfazer a população que nelas reside, existe uma necessidade de deslocação ao centro da cidade. Por isso é que, apesar de tudo, a centralidade é uma questão muito importante para a mobilidade ciclável, tal como é no geral. Esta questão da importância da existência de centralidade dos equipamentos já tinha sido abordada em trabalhos anteriores, sendo que a existência de relevo não altera este facto.

Dentro das zonas bem servidas (zonas verdes), existem zonas de planalto e de encostas com piores índices comparativamente às outras, como seria de esperar. Estas zonas apresentam valores de esforço, aproximadamente, duas vezes superior ao valor máximo admissível.

No mapa diferencial (Figura 4.3) podemos ver, de uma forma mais clara, quais as zonas mais afetadas pela existência de declive. Estas zonas localizam-se em zonas remotas e em zonas de planaltos e encostas, que têm falta de acesso a oportunidades de interação. No caso das zonas remotas pode-se verificar que estas, quer seja no terreno plano (Figura A.1) quer no terreno original (Figura 4.2), apresentam valores elevados de esforço metabólico. As pequenas diferenças dos valores deste esforço (no terreno plano ou no terreno original), nas zonas remotas, são devido à existência de zonas montanhosas durante o percurso para alcançar os equipamentos. As zonas de planaltos e de encostas mal servidas de equipamentos são penalizadas pela existência de declive. Um exemplo disso é a zona do Polo 1 (zona onde está localizada a Universidade de Coimbra), que tem diversas oportunidades de interação nas suas proximidades, contudo são de difícil acesso usando um modo de transporte ativo devido à necessidade de atravessar ruas excessivamente declivosas.

4.1.2. Bike Index 1

Na Figura 4.4 encontram-se representados os valores obtidos do *Bike Index 1*.

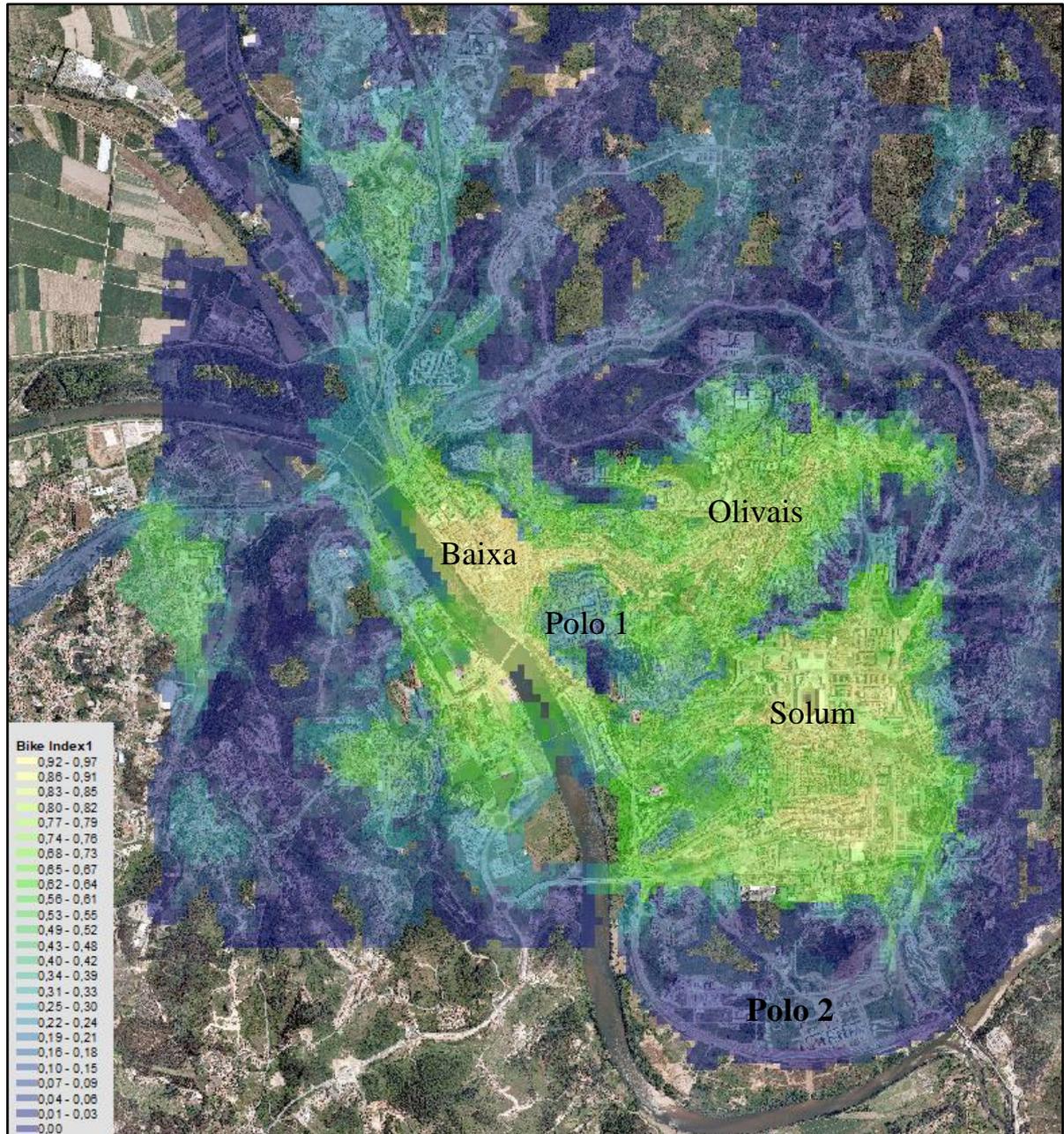


Figura 4.4 - Indicador de Acessibilidade 1_1000 m (BIKEINDEX1_1000)

O mapa da Figura 4.5 representa os valores, em contraste, do indicador diferencial do *Bike Index 1*.

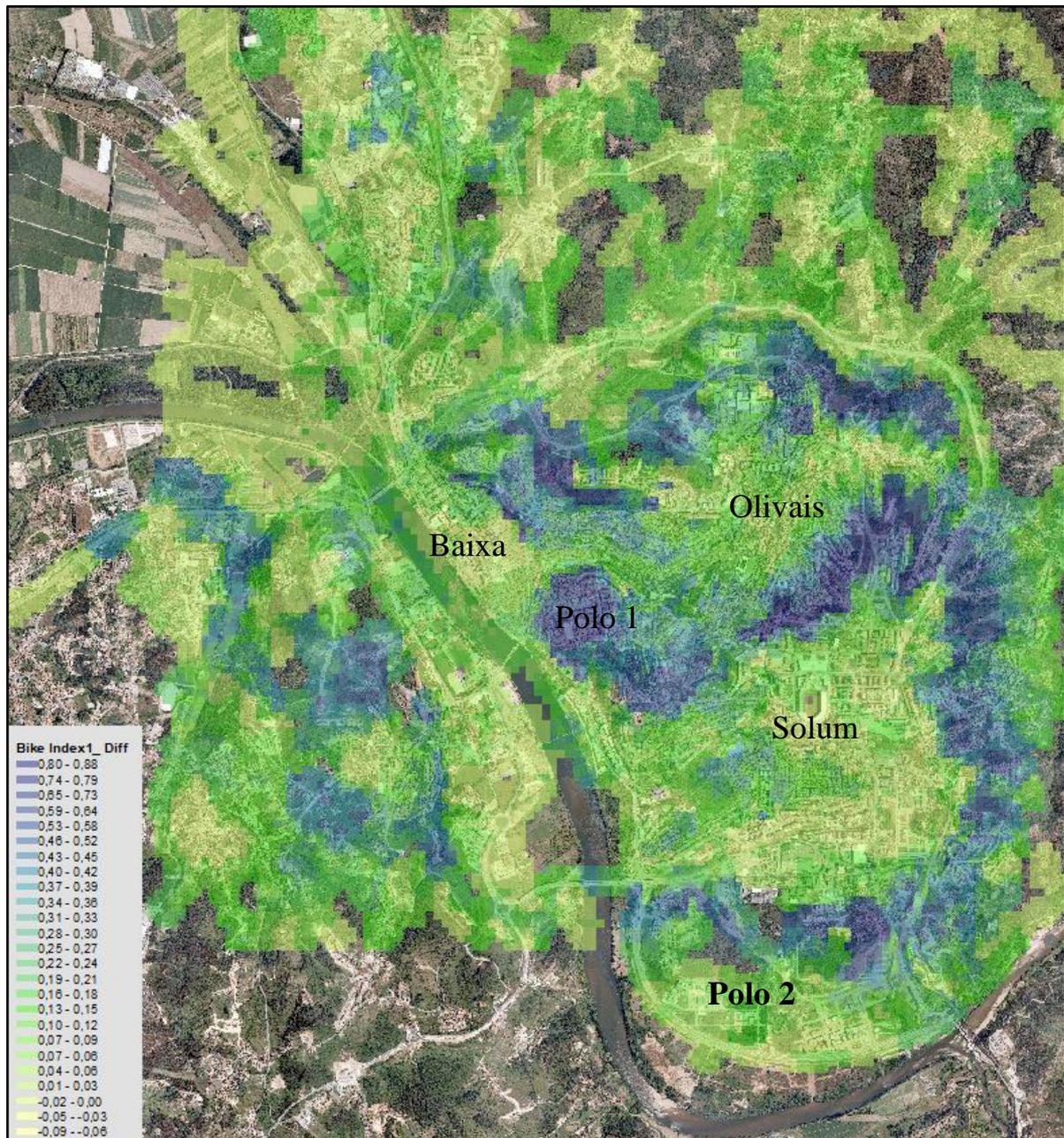


Figura 4.5 - Indicador de Acessibilidade 1_1000m_Diferencial (BIKEINDEX1_1000_DIFF)

No mapa referente ao *Bike Index 1* (Figura 4.4), podemos ver que as zonas com melhor acessibilidade são as zonas da Solum, da Baixa e dos Olivais (representadas a amarelo claro). Este facto vem comprovar, mais uma vez, que a centralidade é crucial para o acesso às várias oportunidades. Para além disto, verifica-se outra vez que as encostas e os planaltos mal servidos saem muito prejudicados, quando estes são centrais. Isto é claramente apresentado no mapa diferencial da Figura 10, sendo verificado que, apesar da curta distância, a altimetria destas zonas incapacita o acesso a, aproximadamente, 80% das oportunidades.

Os valores negativos que aparecem no mapa são referentes às zonas onde existe uma melhor acessibilidade no terreno original, comparativamente aos valores obtidos no plano. Isto significa, que o resultado do somatório da energia gasta a subir (num sentido) e a descer (no outro sentido) é menor, comparativamente a percorrer tudo no plano. O mapa diferencial deste indicador representa a diferença entre o mapa do anexo (Figura A.2) e o mapa da Figura 4.4.

4.1.3. *Bike Index 2*

Na figura abaixo apresentada (Figura 4.6), podemos ver os valores do *Bike Index 2*.

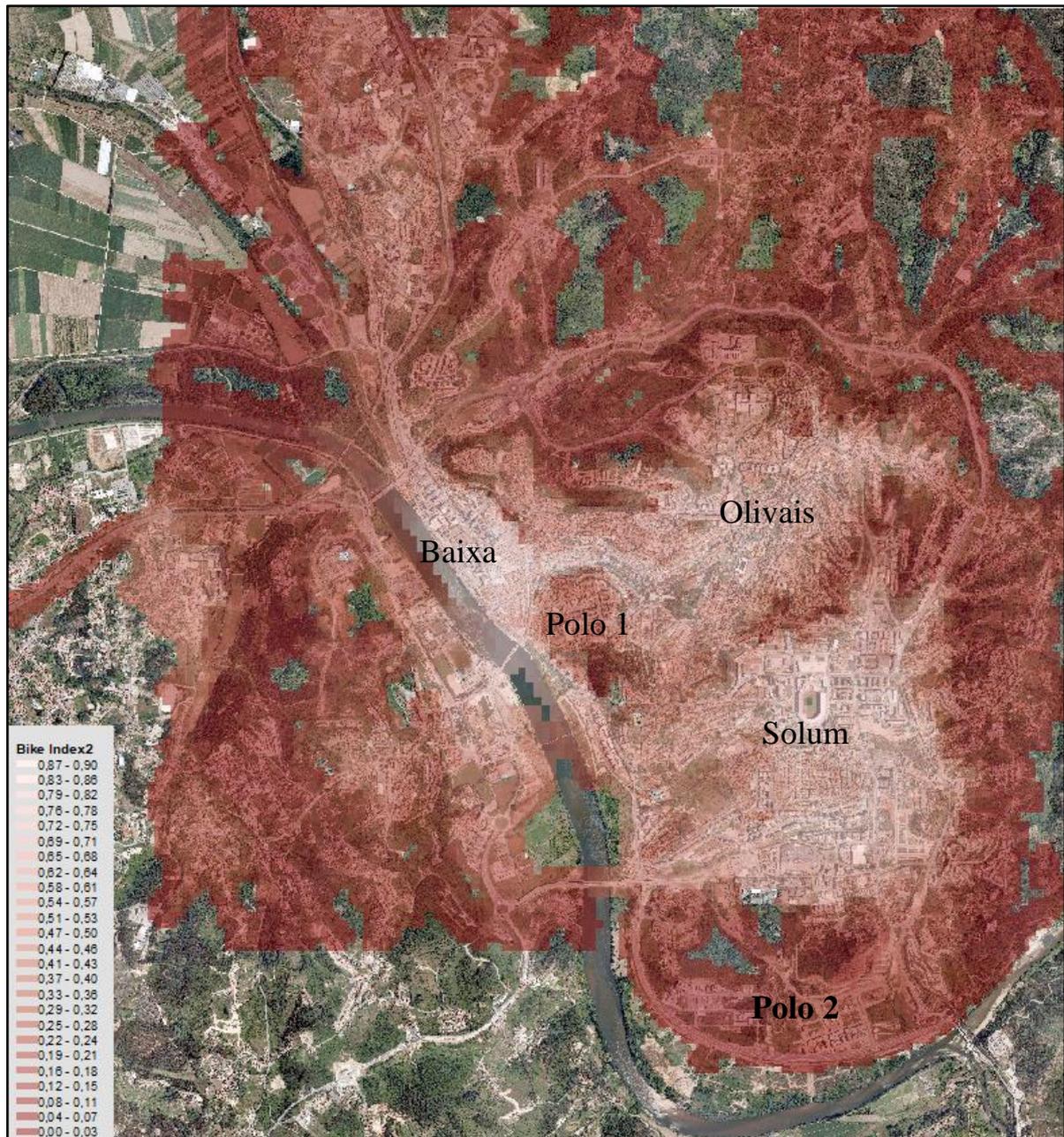


Figura 4.6 - Indicador de Acessibilidade 2_1000m (BIKEINDEX2_1000)

A Figura 4.7 apresenta, em contraste, os valores obtidos a partir dos cálculos para o indicador diferencial do *Bike Index 2*.

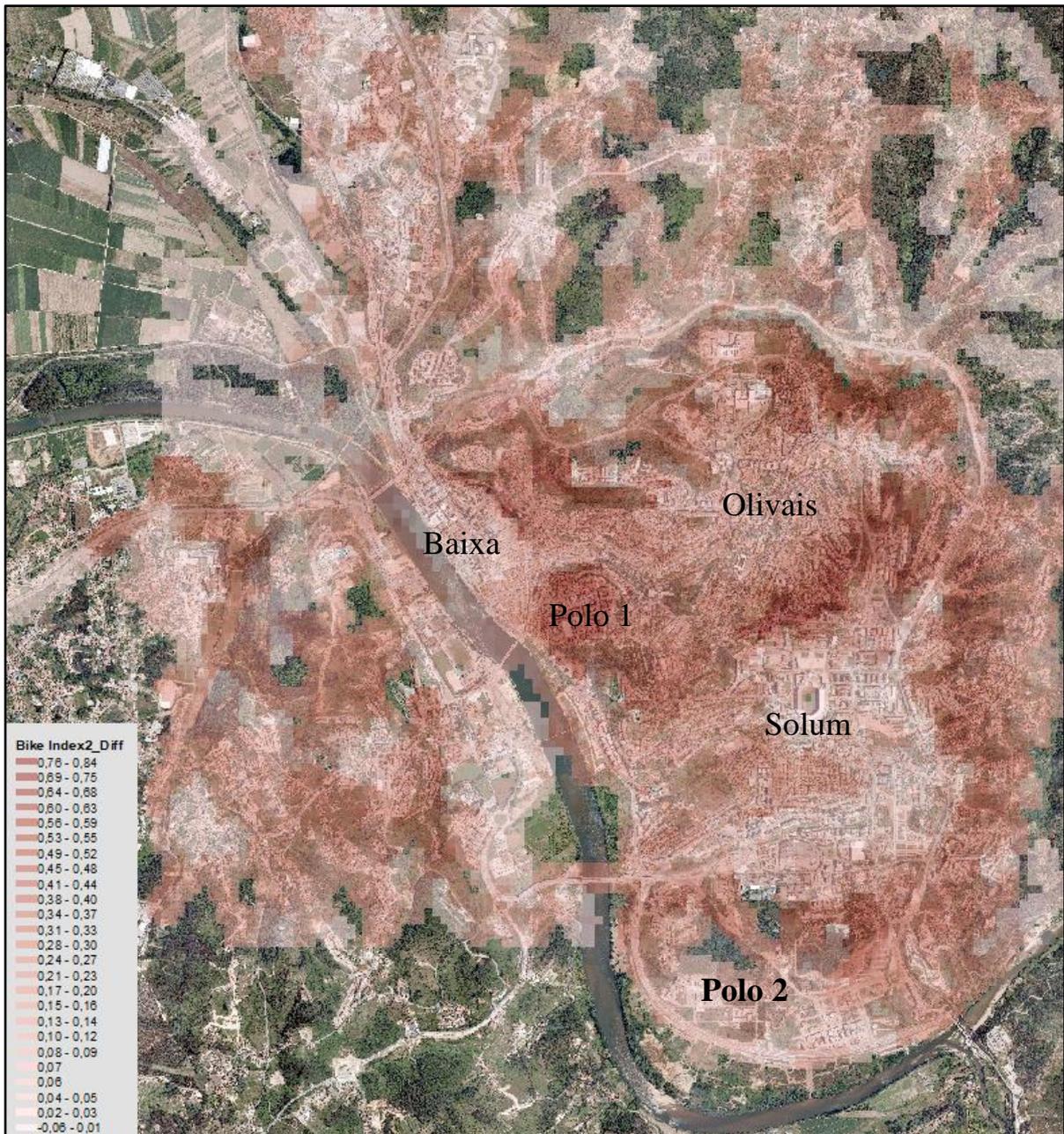


Figura 4.7 - Indicador de Acessibilidade 2_ 1000m_ Diferencial

Para o mapa da Figura 4.6 foi considerada a diversidade de oferta de tipos de equipamento.

Os resultados obtidos para este indicador são semelhantes aos referidos para o *Bike Index 1*, em que se confirma as observações já efetuadas relativamente à importância da centralidade e à penalização da existência de encostas e planaltos mal servidos. Quanto às zonas remotas, também nestes índices (*Bike Index 1* e *2*) elas são penalizadas. Isto acontece por falta de equipamentos nessas zonas, que levam a maus *scores* de acessibilidade, sendo que a declividade não altera este facto. As pequenas diferenças entre os dois indicadores referem-se à existência de mais condições de possibilidade de alcance, logo os valores obtidos vão ser iguais ou piores que o índice anterior. O mapa diferencial do *Bike Índice 2* representa a diferença entre o mapa do anexo (Figura A.3) e o mapa da Figura 4.6.

4.1.4. Bike Index 3

Na figura abaixo apresentada estão representados os valores obtidos do *Bike Index 3*.

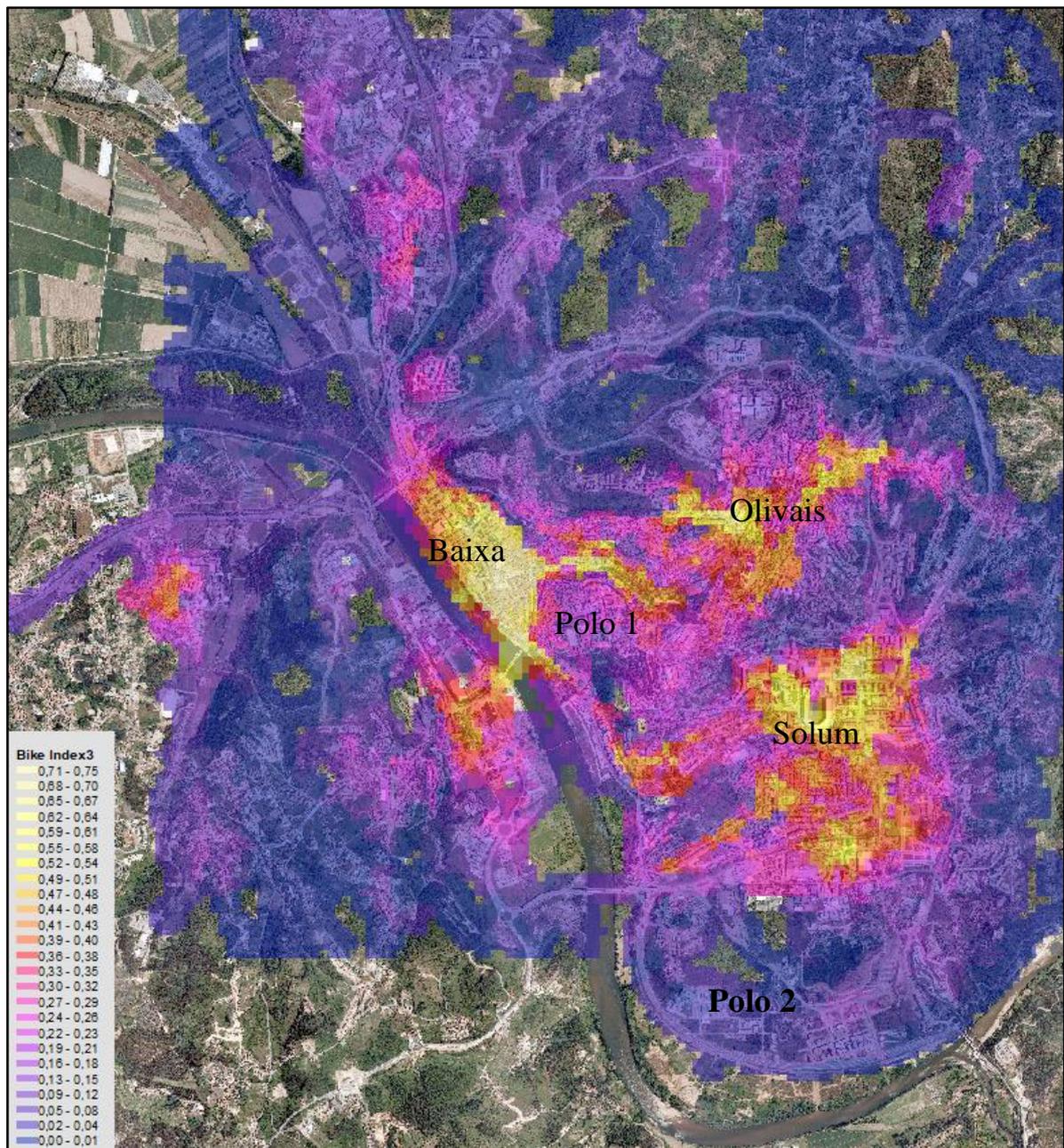


Figura 4.8 - Indicador de Acessibilidade 3 (BIKEINDEX3)

Na Figura 4.9 está representado o mapa diferencial do *Bike Index 3*.

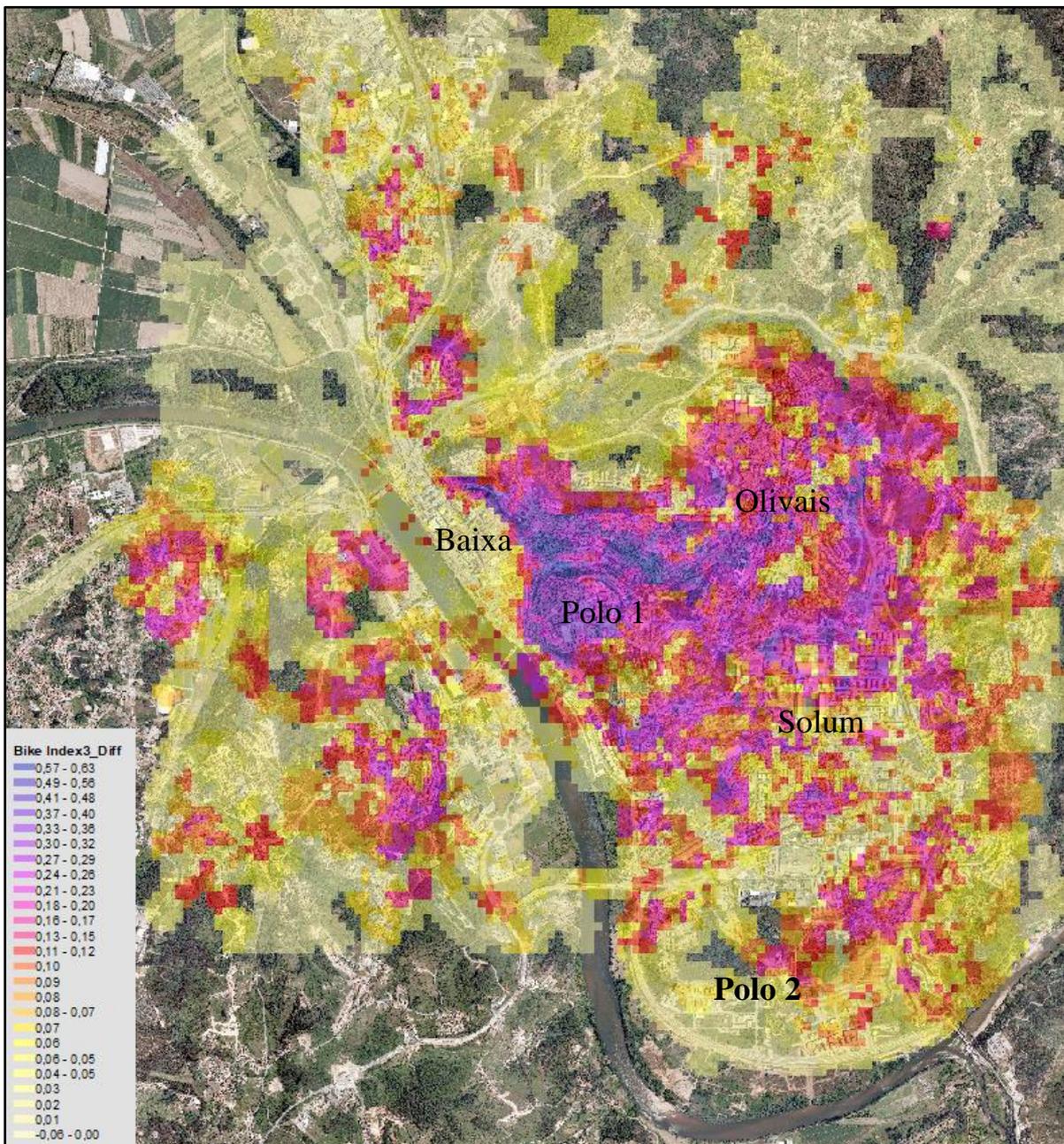


Figura 4.9 - Indicador de Acessibilidade 3_Diferencial (BIKEINDEX3_DIFF)

O *Bike Index 3* (Figura 4.8) é um indicador frequencista, que considera que as oportunidades de interação estão graduadas de acordo com a importância que têm na vida de uma pessoa, (Quadro 3.1) ou seja, este índice estuda a acessibilidade dependendo do tipo de equipamento. Portanto, existiu uma maior exigência quanto à curteza do caminho, o que realça a centralidade da baixa sendo esta uma zona com grande diversidade de todo o tipo de equipamentos. Para além disso, este mapa mostra a menor disponibilidade de oferta das outras duas zonas centrais da cidade, os Olivais e a Solum, que nos outros dois mapas dos índices 1 e 2 apresentavam bons valores de acessibilidade (Figuras 4.4 e 4.6, respetivamente).

Os resultados do mapa do diferencial do índice 3 (Figura 4.9) aparecem ainda mais dispersos, o que torna mais difícil a sua interpretação. Este mapa representa a diferença entre o mapa do anexo (Figura A.4) o mapa da Figura 4.8. Este apresenta valores mais baixos do que os outros mapas diferenciais, devido às restrições de acesso impostas a este índice. Este mapa evidencia penalizações nas melhores zonas da cidade em termos de acessibilidade, que estão próximas de zonas de planaltos e encostas, mais especificamente, a zona da Baixa e dos Olivais, sendo que na zona da Baixa já não se verifica tanto esse problema.

5. CONCLUSÃO

O trabalho realizado apresenta uma metodologia inovadora que pode ser bastante útil para as entidades responsáveis pelo planeamento urbano dos transportes. O objetivo do estudo, que visava essencialmente analisar a acessibilidade ciclável em toda a cidade, tendo em conta o facto de esta ser declivosa e usando o esforço humano como impedância, foi cumprido. Através da análise dos mapas obtidos, podemos realçar dois aspetos importantes sobre a acessibilidade ciclável em Coimbra. Em primeiro lugar, verificou-se que a centralidade é um fator decisivo para obter bons valores dos índices, como é o caso da zona da Baixa, da Solum e dos Olivais. O segundo aspeto é o facto de que o relevo é ainda assim um fator importante de acessibilidade, como se verificou, essencialmente, através da análise nos mapas diferenciais.

Na acessibilidade absoluta (*Bike Index 0*), as zonas remotas da cidade, como se encontram desprovidas de equipamentos próximos, são penalizadas por essa falta de centralidade e diversidade de equipamentos. A distância, nestas zonas, torna inviável a acessibilidade usando a bicicleta (p.ex. zonas de São Martinho, Lordemão, Tovim). Para além das zonas remotas, verifica-se que algumas zonas de planalto e encostas também são afetadas.

Na acessibilidade relativa (*Bike Index 1 e 2*), o relevo penaliza novamente as encostas e planaltos mal servidos de oportunidades. Por exemplo, existem zonas bem servidas, como a zona dos Olivais, que apesar de estar situada numa zona de planalto, apresenta na maioria dos mapas uma boa acessibilidade ciclável, o que prova que o efeito do relevo não é muito relevante quando o planalto é bem servido. Quanto às zonas remotas, também nestes índices elas são penalizadas, embora tal não pareça evidente nos mapas diferenciais. Isto acontece porque a falta de equipamentos nessas zonas levaria sempre a maus *scores* de acessibilidade e a existência de declives não altera este facto.

Na acessibilidade frequencista (*Bike Index 3*) conseguiu-se distinguir as zonas cujo grau de concentração de oportunidades de interação é tal, que permite uma acessibilidade ciclável quase completa (p.ex. Baixa). Outras zonas, que nos índices 1 e 2 apresentam bons *scores*, veem-se algo penalizadas neste, pela menor concentração de oportunidades (p.ex. Olivais, Solum).

Os resultados foram bastante reveladores sobre que zonas estão melhor ou piores servidas de acessibilidade usando este modo de transporte, e o porquê de o serem. Os mapas

representativos dos valores dos índices mostram que os resultados obtidos são, de certa forma, comuns a todos os índices. Concluiu-se, nomeadamente, que as zonas mais desfavoráveis ao uso da bicicleta são, em primeiro lugar, as zonas remotas, por estarem desprovidas de equipamentos ao seu alcance, seguidas das zonas mais centrais localizadas em planaltos mal servidos de oportunidades de interação e em encostas distribuídas pela área urbana, 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 levará a desistir desse modo de transporte para aceder a alguns equipamentos, penalizando os *Bike Indexes*.

Tendo este trabalho comprovado que o efeito do declive tem de ser levado em consideração no que respeita ao modo ciclável, torna-se necessário tomar medidas para mitigar esse efeito, se se pretender fomentar este modo. Como foi referido no capítulo 1 da dissertação, existem algumas soluções que podem tornar acessíveis certas zonas da cidade, que atualmente são inacessíveis de bicicleta. Na cidade de Coimbra, especificamente em zonas mais críticas de planaltos, como o Polo 1, Santa Clara ou os Olivais, medidas como o *Trampe Cyclocable* (Figura 1.3) e/ou os autocarros com adaptação para bicicletas (Figura 1.4) iriam melhorar significativamente a acessibilidade, tanto ciclável como pedonal, pois fornecem alternativas de continuidade de percurso aquando da existência de zonas declivosas durante o percurso. Também a bicicleta elétrica é uma alternativa à bicicleta convencional no que toca a ultrapassar zonas mais críticas.

Para além do efeito do declive, também a segurança, a conveniência e o conforto são fatores essenciais de modo a assegurar que, caso exista mobilidade ciclável, esta seja praticada de uma forma segura e confortável. Como foi referido no capítulo 1, existem medidas capazes de assegurar as condições ideais para que a cidade se torne acessível usando a bicicleta. O *Bike-Sharing* (Figura 1.5) é uma medida regularmente adaptada pelos países mais interessados neste modo de transporte, principalmente para zonas centrais com diversidade de oportunidades de interação (zona da Baixa de Coimbra), pois esta dá a possibilidade de uso conveniente, tanto aos residentes locais como aos turistas, na possibilidade destes possuírem ou não o seu próprio veículo ciclável. Para além desta medida, existem uma série de políticas de segurança rodoviária (Quadro 1.1), que são essenciais para que a mobilidade ciclável seja considerada uma mobilidade segura.

Em suma, é importante realçar a pertinência deste tema no mundo atual, pois impõe-se uma mudança de paradigma no binómio Homem – Natureza. Numa época em que se promove o abandono das energias fósseis e numa economia que começa a privilegiar cada vez mais as designadas “energias limpas”, a procura de soluções alternativas, mais consistentes, poderá

passar pela mobilidade clicável em espaços urbanos. Uma vez que uma das grandes riquezas de qualquer trabalho de investigação passa pela possibilidade de ser extrapolado para outras realidades e contextos, esta análise pode ser feita em todo o tipo de cidades, em que apenas varia as dimensões desta, a quantidade e disposição dos equipamentos disponíveis, e a sua orografia, sendo que este último fator influencia tudo o resto.

Por último, e numa perspetiva de dar continuidade ao trabalho realizado, seria importante estudar as infraestruturas cicláveis e todas as medidas de segurança e conforto que são necessárias tomar para que esta se torne um hábito diário na vida da população de Coimbra. Para além disto, poder-se-á ainda elaborar um estudo da acessibilidade ciclável usando a bicicleta elétrica, visto que esta poderá ser a evolução do modelo da bicicleta convencional, pois combina com a sociedade moderna atual e minimiza alguns dos fatores negativos apontados no nosso estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (1999) AASHTO Guide for the Development of Bicycle Facilities. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC, USA.
- Abousaeidi, M., Fauzi, R., Muhamad, R. (2016). “Geographic Information System (GIS) modeling approach to determine the fastest delivery routes”. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 23(5), 555-564.
- Cascetta, E., Papola, A. (2009). “Dominance among alternatives in random utility models”. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(2), 170-179.
- Cascetta, E., Carteni, A., Montanino, M. (2013). “A new measure of accessibility based on perceived opportunities”. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 87, 117-132.
- Cervero, R. (2005). “Accessible cities and regions: a framework for sustainable transport and urbanism in the 21st century”. UC Berkeley Center for Future Urban Transport: A Volvo Center of Excellence.
- Clarke, K. C. (1986). “Advances in geographic information systems”. *Computers, Environment and Urban Systems*, 10(3-4), 175-184.
- Costa, N. (2007). “Mobilidade e transporte nas áreas urbanas. O caso da área metropolitana de Lisboa”. Dissertação de doutoramento em Geografia Humana, Universidade de Lisboa, Lisboa.
- Dekoster, J., Schollaert, U. (2000). “Cycling: the way ahead for towns and cities”. European Commission, DG XI-Environment, Nuclear Safety and Civil Protection.
- Gama, M., Tralhão, L., Coutinho-Rodrigues, J. (2011). “Modelação SIG de uma rede de transportes multimodal: sua aplicação em acessibilidade à escala urbana”. In *International Conference Virtual City and Territory (7è: 2011: Lisboa)* (pp. 217-222). Department of Civil Engineering of the University of Coimbra and e-GEO, Research Center in Geography and Regional Planning of the Faculty of Social Sciences and Humanities of the Nova University of Lisbon.
- Geurs, K. T., Ritsema van Eck, J. R. (2001). “Accessibility measures: review and applications”. RIVM report 408505 006, National Institute of Public Health and Environment, Bilthoven.
- Geurs, K. T., Van Wee, B. (2004). “Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions”. *Journal of Transport Geography*, 12(2), 127-140.
- Geurs, K. T., Montis, A., Reggiani, A. (2015). “Recent advances and applications in accessibility modelling”. *Computers, Environment and Urban Systems*, 49, 82-85.

- Gohari, A. (2010). "Route Planning System Based on Geographic Information System". (Doctoral dissertation, University of Teknology of Malaysia).
- Goodchild, M. F., Longley, P. A., Maguire, D. J., Rhind, D. W. (2005). "Geographic information systems and science". Wiley & Sons, West Sussex, UK, 17, 517.
- Hansen, W. G. (1959). "How accessibility shapes land use". *Journal of the American Institute of Planners*, 25(2), 73-76.
- Izadikhah, M., Saen, R. F. (2016). "A new preference voting method for sustainable location planning using geographic information system and data envelopment analysis". *Journal of Cleaner Production*, 137, 1347-1367.
- Kemperman, A., Timmerman, H. (2009). "Influences of built environment on walking and cycling by latent segments of aging population". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2134), 1-9.
- Lacono, M., Krizek, K. J., El-Geneidy, A. (2010). "Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution". *Journal of Transport Geography*, 18(1), 133-140.
- Litman, T. (2008). "Evaluating accessibility for transportation planning". Victoria Transport Policy Institute, Victoria, Canada.
- Liu, S., Zhu, X. (2004). "Accessibility analyst: an integrated GIS tool for accessibility analysis in urban transportation planning". *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31(1), 105-124.
- Lourontzi, E., Petacht, S. (2017). "Cycling: Utilitarian and symbolic dimensions". *Transportation Research Procedia*, 24, 137-145.
- Memon, I. A. (2005). "Application of Geographic Information System in Transportation for Road Network Analysis". (Doctoral dissertation, University of Teknology of Malaysia).
- Menghini, G., Carrasco, N., Schüssler, N., Axhausen, K. W. (2010). "Route choice of cyclists in Zurich". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(9), 754-765.
- Minetti, A. E., Moia, C., Roi, G. S., 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.
- Mokhtarian, P.L., Salomon, I. (2001). "How derived is the demand for travel? Some conceptual and measurement considerations". *Transport Research Part A* 35 (8), 695-719.
- Morais, P. M. B. (2013). "Os SIG no processo de criação de instrumentos de apoio à decisão". Tese de mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Modelação Territorial Aplicados ao Ordenamento, Universidade de Lisboa.
- Moreira, F. (2016). "Mobilidade Sustentável: Acessibilidade Pedonal em Meio Urbano e as Suas Vantagens Energéticas – Aplicação à Cidade de Coimbra". Tese de Mestrado em Energia para a Sustentabilidade, Universidade de Coimbra.
- Nayati, M. A. K. (2008). "School bus routing and scheduling using GIS".
- Organization for Economic Co-operation and Development (OCDE), (2004). "National Policies to Promove Cycling". European Conference of the Ministers of Transport, Paris.

-
- Ory, D. T., Mokhtarian, P. L., Redmond, L. S., Salomon, I., Collantes, G. O., Choo, S. (2004). "When is commuting desirable to the individual?". *Growth and Change*, 35(3), 334-359.
- Page, M. (2005). "Non-motorized transportation policy". In *Handbook of Transport Strategy, Policy and Institutions*, 581-596. Emerald Group Publishing Limited.
- 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.
- Pucher, J., Buehler, R. (2008). "Making cycling irresistible: lessons from the Netherlands, Denmark and Germany". *Transport Reviews*, 28(4), 495-528.
- Redmond, L.S., Mokhtarian, P.L.(2001). "Modeling ideal commutetime and relative desired commute". *Transportation* 28 (2), 179-205.
- Ribeiro, N. A. (2013). "Estudo da adequação de áreas urbanas aos modos suaves de transporte-Utilização de tecnologia SIG em aplicação à cidade de Coimbra". Tese de Mestrado em Engenharia Civil na Especialidade de Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação.
- Stinson, M., Bhat, C. (2003). "Commuter bicyclist route choice: analysis using a stated preference survey". *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (1828), 107-115.
- Trampe (2013). <http://trampe.no/>. Trampe Cyclocable (página internet oficial), Trondheim
- Van Wee, B. (2016). "Accessible accessibility research challenges". *Journal of Transport Geography*, 51, 9-16.
- Vlastos Th., Mparmpopoulos N., Mpaltas P., (2005). "Legislation and policies for the promotion of cycling in Europe". *Retractions in Greece*.
- Wei, W. (2012). "Research on the application of Geographic Information System in tourism management". *Procedia Environmental Sciences*, 12, 1104-1109.

ANEXOS

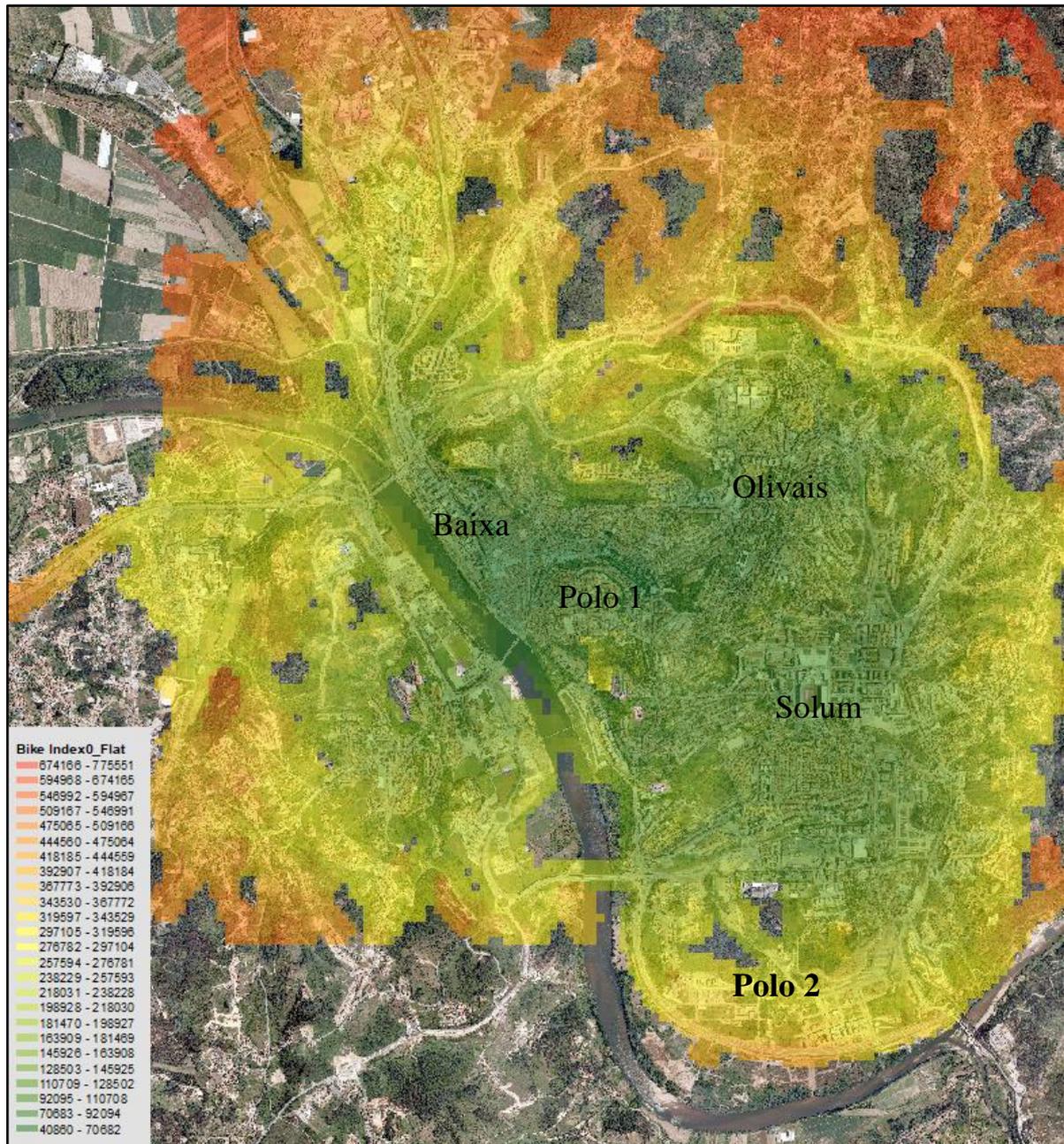


Figura A.1 - Indicador de Acessibilidade 0_Plano (BIKEINDEX0_FLAT), em Joules metabólicos

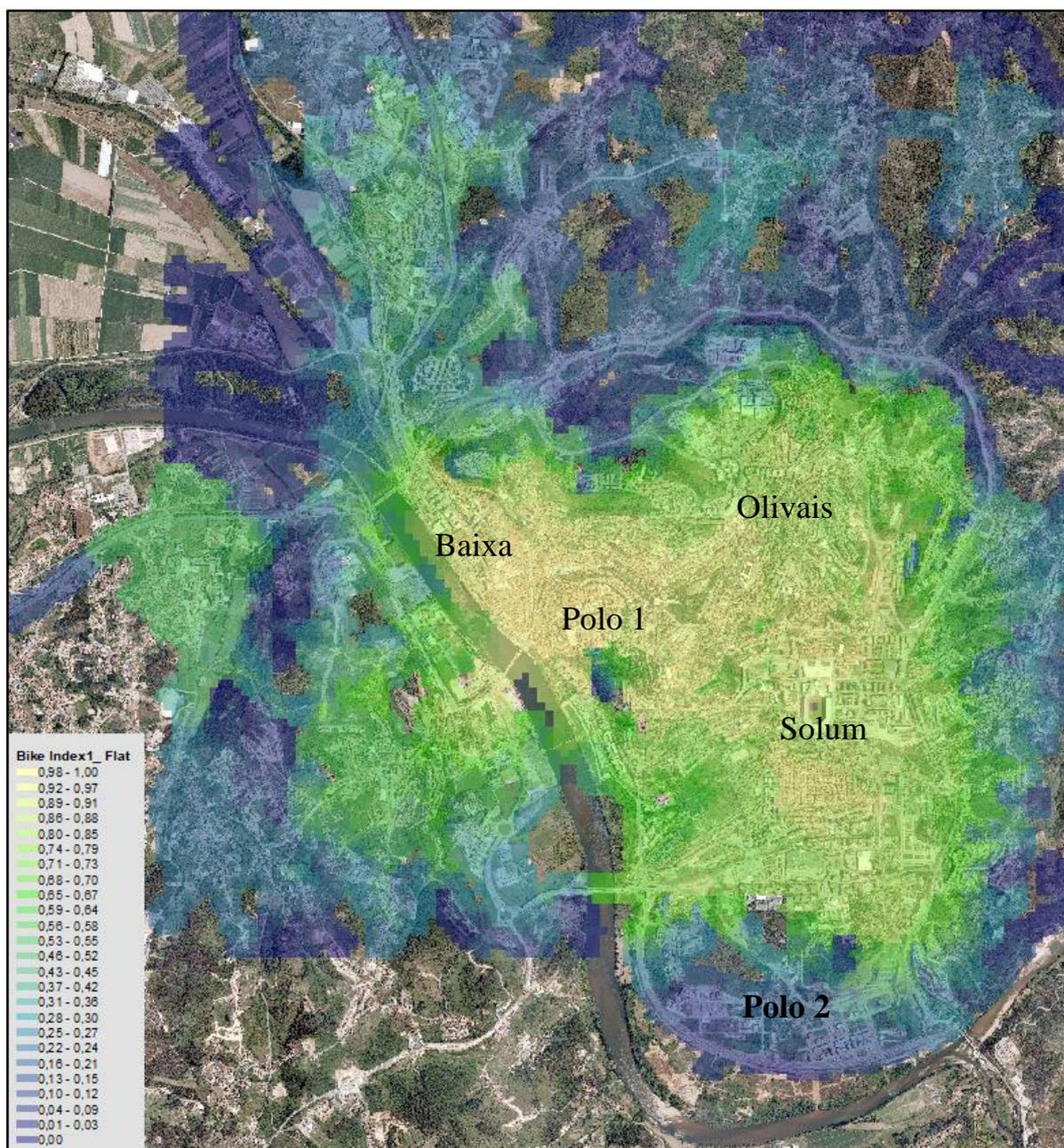


Figura A.2 - Indicador de Acessibilidade 1_1000_Plano (BIKEINDEX1_1000FLAT)

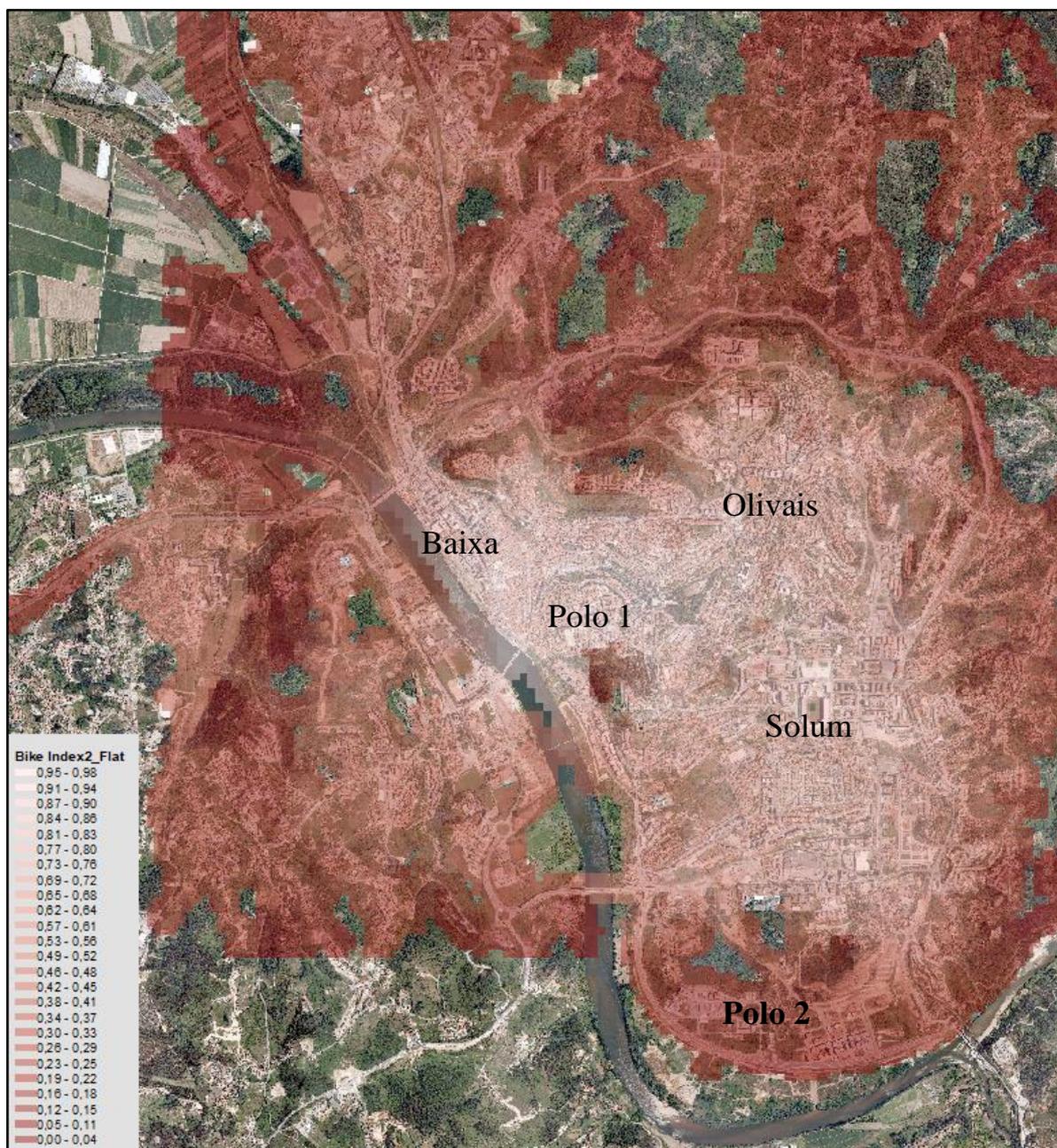


Figura A.3 - Indicador de Acessibilidade 2_1000m_Plano (BIKEINDEX2_1000FLAT)

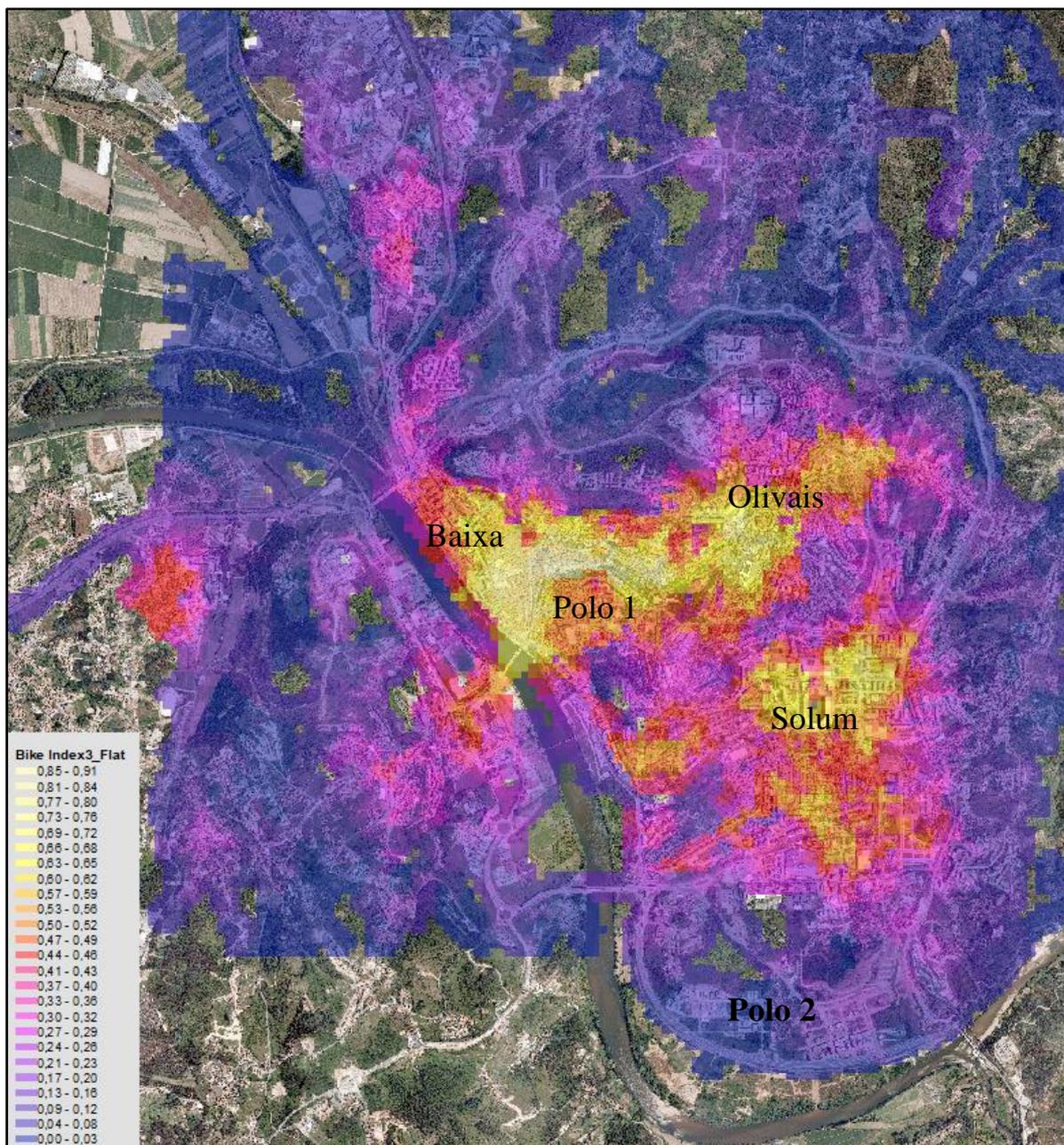


Figura A.4 - Indicador de Acessibilidade 3_Plano (BIKEINDEX3_FLAT)