

Avaliação multicritério da acessibilidade em ambiente SIG

O caso de um campus universitário

RODRIGUES, Daniel S.; SILVA, António N. R.; RAMOS, Rui. A. R.; MENDES, José F. G.

Resumo

Ao longo dos últimos anos, o crescimento contínuo das comunidades universitárias atingiu proporções tais que motivaram a expansão e a actualização dos campi universitários. Visando uma melhoria da oferta de instalações e serviços, quer qualitativa quer quantitativa, essa expansão tomou contornos tão expressivos que justificam uma avaliação da acessibilidade interna. O objectivo desta análise é procurar identificar áreas ou, mais especificamente, locais que apresentem um eventual défice de acessibilidade do ponto de vista pedonal (por este ser modo de locomoção predominante). Os resultados servirão de apoio na procura de medidas no sentido de corrigir ou prevenir este tipo de problema. A título de exemplo, apontam-se algumas das causas, a saber, a edificação de novas instalações em zonas de baixa acessibilidade sem que aconteça um reajuste dos acessos ou, simplesmente, a diminuição da acessibilidade global (em relação ao campus remodelado) do espaço inicialmente atribuído a um serviço fundamental, impondo-se assim a sua deslocação para uma zona mais conveniente.

Neste trabalho é apresentado um modelo de avaliação multicritério da acessibilidade que permite o desenvolvimento de cenários de avaliação baseados na atitude de risco e compensação entre critérios, obtendo-se desta forma um espectro estratégico de avaliação. Inserido num ambiente SIG, é contemplada a componente espacial ao apresentar os resultados sob a forma de superfícies contínuas, favorecendo-se a leitura dos níveis de acessibilidade ao longo da área em estudo. A aplicação prática incidiu sobre a avaliação da acessibilidade interna de um campus universitário, reflectindo-se o ponto de vista da comunidade utente através da elaboração de um inquérito para a recolha de dados de base.

Este exemplo de avaliação de acessibilidade, por se realizar com recurso à técnica de avaliação multicritério integrada a um SIG vectorial, abre ainda perspectivas de aplicação do modelo proposto para outros problemas de planeamento de transportes.

PALAVRAS-CHAVE: Acessibilidade, Avaliação Multicritério, Sistemas de Informação Geográfica.

INTRODUÇÃO

É possível observar na literatura especializada que os SIG parecem ser a plataforma ideal para a aplicação da técnica de avaliação multicritério envolvendo problemas de natureza espacial, sendo por este motivo frequentemente associadas (Ewart, 1994; Bender e Simonovic, 1995; Jankowski e Ewart, 1996; Simonovic e Bender, 1996; Eastman, 1997; Jankowski *et al.*, 1997; Malczewski *et al.*, 1997; Jankowski *et al.*, 2001; Mendes, 2001). Malczewski (1999) enfatiza inclusive no prefácio de seu livro que os SIGs e a avaliação multicritério podem beneficiar mutuamente de uma combinação entre as suas áreas de investigação. Os SIGs, ao oferecer capacidades únicas na automatização, gestão e análise de dados espaciais para a tomada de decisão, têm um papel importante a desempenhar na análise de problemas de decisão multicritério. Pelo seu lado, a avaliação multicritério oferece uma vasta colecção de técnicas e procedimentos que permitem revelar as preferências de decisores e incorporá-las em tomadas de decisão baseadas num SIG.

Como muitos problemas de planeamento de transportes são multicritério e, portanto, a realidade sobre a qual incidem implica a tomada em conta de uma multiplicidade de atributos, o uso da técnica adequa-se também à análise de diversos problemas nesta área, como demonstram, por exemplo, os trabalhos de Malczewski *et al.* (1997) e Mendes (2001). O que se observa, na realidade, é que a técnica se presta bem à análise de problemas de natureza espacial em geral, condição em que muitos dos problemas de planeamento de transportes se enquadram por definição.

A principal justificação do uso de SIG vectorial em transportes é o facto dos modelos de redes, nos quais praticamente toda a análise de transportes se baseia, terem-se adaptado melhor a este tipo de modelo de representação de dados espaciais. No que diz respeito à indicação de se avaliar, por exemplo, especificamente a acessibilidade em ambiente SIG, Arentze *et al.* (1994a) trataram de dissipar qualquer dúvida a este respeito, afirmando que existem diversas razões pelas quais estes sistemas disponibilizam um ambiente adequado a implementação de índices de acessibilidade ou, de forma mais geral, de medidas de performance espacial. Os SIGs integram técnicas de gestão de dados que permitem gerir e manusear a informação em que se baseiam os índices. Por outro lado, oferecem também funções de apresentação que oferecem a possibilidade de representar os resultados obtidos em mapas da área em estudo. Por fim, os SIGs dispõem ainda de ferramentas de análise que permitem efectuar diversas funções que integram o processo de cálculo de índices de acessibilidade, tais como a selecção de locais relevantes, a agregação de zonas ou a determinação de distância entre objectos espaciais (não só distâncias Euclidianas, mas também através de redes).

Assim, à luz do que foi acima referido, é objectivo deste trabalho apresentar um modelo de avaliação de acessibilidade que integra métodos de avaliação multicritério em ambiente SIG vectorial. A adopção deste ambiente é relevante pelo facto de, ao procurar-se medir a acessibilidade ao longo de uma rede, ser considerado este tipo de análise um domínio do mesmo (Malczewski, 1999).

De seguida, introduzem-se os conceitos teóricos nos quais o modelo se baseou, bem como uma breve revisão bibliográfica que procura mostrar uma certa evolução ao longo da história, particularmente do conceito de acessibilidade. São depois efectuadas uma apresentação e descrição do modelo. Posteriormente, descreve-se o caso de estudo que permite validar a utilidade do modelo. Finalmente, o artigo encerra com a secção de conclusões, seguida da lista de referências bibliográficas utilizadas.

ACESSIBILIDADE

Como demonstra o trabalho de Hoggart (1973) ao citar artigos sobre este tema escritos em 1826, 1903 e 1909, o conceito de acessibilidade no âmbito dos transportes – por ser esse o que se procura neste trabalho – é um tema discutido e objecto de estudo há cerca de duzentos anos. Hoggart defende que a acessibilidade está associada à interpretação, implícita ou explícita, da facilidade de alcançar oportunidades espacialmente distribuídas. Interpreta-se assim que a acessibilidade depende não só da localização das oportunidades, mas igualmente na facilidade de vencer a separação espacial entre indivíduos e locais específicos (Silva, 1998; Mendes, 2001). No mesmo sentido, Ingram (1971) define acessibilidade de um local como a característica (ou vantagem) respeitante a superar alguma forma de resistência ao movimento. Por outro lado, Ingram (1971) também estabeleceu uma distinção entre acessibilidade relativa, referente ao grau de conexão entre dois pontos na mesma superfície (ou rede), e acessibilidade integral ou total, inerente ao grau de interconexão entre um ponto e todos os restantes da mesma superfície (ou rede).

Considerando que a forma como a acessibilidade é avaliada depende do objectivo a atingir, Morris *et al.* (1979) mostram uma classificação e uma formulação extensivas das medidas de acessibilidade relativa e integral. Encontram-se trabalhos recentes cujas medidas de acessibilidade apresentadas, de uma forma ou outra, se enquadram com a classificação de Morris *et al.* (ver Allen *et al.*, 1993; Arentze *et al.*, 1994a e 1994b; Tagore e Sikdar, 1995; Love e Lindquist, 1995; Mackiewicz e Ratajczak, 1996; Geertman e Van Eck, 1995; Shen, 1998; Bruinsma e Rietveld, 1998; Talen e Anselin, 1998; Schoon *et al.*, 1999). Trabalhos ainda mais recentes sobre o tema (como, por exemplo, Van der Waerden *et al.*, 1999; Turró *et al.*, 2000; Goto *et al.*, 2001 e Silva *et al.*, 2002), indicam que o tema ainda continua motivando o interesse para o desenvolvimento de novas pesquisas. O que se observa claramente em vários dos trabalhos acerca do tema é que, enquadrada no âmbito da análise espacial, a acessibilidade herda com naturalidade um carácter que leva a que a sua mensuração ou avaliação envolva inúmeros atributos, razão pela qual não só se justifica, mas se recomenda, o desenvolvimento de um modelo fundamentado em métodos de avaliação multicritério para a obtenção dos seus índices.

AVALIAÇÃO MULTICRITÉRIO

A tomada de decisão de âmbito espacial e multicritério requer uma articulação entre os objectivos do ou dos decisores e a identificação dos atributos necessários na determinação do grau em que esses objectivos serão atingidos. Um atributo é utilizado na medida da performance em relação a um objectivo. Ao objectivo e aos respectivos atributos, por formarem uma estrutura hierárquica de critérios de avaliação para um determinado problema de decisão, devem ser atribuídos um peso, de forma a permitir quantificar a importância relativa de cada um em relação ao seu contributo na obtenção de um índice global. De um conjunto de procedimentos para a definição de pesos estabelecidos e utilizados por diversos autores, alguns dos mais usuais são (Malczewski, 1999, Mendes, 2001): escala de n pontos (originalmente apenas de sete pontos, como introduzido por Osgood *et al.*, 1957); distribuição de pontos e sua variante, estimativa de rácios (Easton, 1973); Analytic Hierarchy Process (Saaty, 1977, 1980, 1987); e rank sum e rank reciprocal (Stillwell *et al.*, 1981), baseados na ordenação de critérios.

Quer os critérios individualmente, quer os conjuntos de critérios deverão possuir propriedades de forma a representar adequadamente a vertente multicritério de um problema de decisão. Após o estabelecimento da estrutura hierárquica dos objectivos e dos atributos, as atenções deverão estar viradas para existência de uma diversidade de escalas em que os diversos critérios são medidos. Dado que as análises multicritério visam a comparação entre critérios, é necessário que as unidades destes possam ser convertidas em unidades comparáveis, isto é, serem normalizadas. Segundo Eastman (1997) e

Eastman *et al.* (1998), o processo de normalização é na sua essência idêntico ao processo de fuzzification, introduzido pela lógica fuzzy (expressão original apresentada por Zadeh, 1965, para a qual não se adoptou qualquer tradução neste texto). O objectivo consiste em transformar qualquer escala noutra comparável e medida num intervalo normalizado (por exemplo [0, 1]). Uma vez normalizados para um intervalo fixado, os scores dos critérios podem ser agregados de acordo com a regra de decisão (Ramos, 2000). Nesse sentido, existem diversas classes de operadores para a combinação de critérios (uma descrição extensiva pode ser encontrada em Malczewski, 1999). Dois procedimentos considerados mais relevantes no âmbito dos processos de decisão de natureza espacial são a Combinação Linear Pesada (WLC, de Weighted Linear Combination, conforme Voogd, 1983) e a Média Pesada Ordenada (OWA, de Ordered Weighted Average, conforme Yager, 1988). A estrutura conceptual do modelo, que é apresentada na sequência, foi elaborada tendo por base o estudo, como definido *a priori*, da acessibilidade, por ser este um elemento cuja avaliação envolve inúmeros atributos.

O MODELO

O modelo desenvolvido neste trabalho, alicerçado no modelo apresentado e aplicado à avaliação da acessibilidade para a localização industrial por Mendes (2001), baseia-se em princípio na medição de afastamento incluindo o efeito da distância. Enumeram-se de seguida os principais pontos teóricos para a avaliação da acessibilidade que se procuraram englobar no modelo:

- i) A acessibilidade avalia-se em relação a um determinado objectivo; a título de exemplo, o objectivo pode ser a localização industrial, ou a identificação dos níveis de acessibilidade no interior dum campus universitário;
- ii) O índice de acessibilidade a calcular resulta da combinação das distâncias a um conjunto de destinos-chave, que podem ser pontos (por exemplo, paragens de transporte público), linhas (por exemplo, estradas) ou áreas (por exemplo, centros de serviços);
- iii) Os destinos-chave estão relacionados com o objectivo e podem possuir importâncias diferentes (pesos);
- iv) Os meios que permitem alcançar os destinos-chave podem apresentar diferentes níveis de resistência ao movimento (fricção). A título de exemplo, e do ponto de vista pedonal (relativo ao modo a pé), a fricção advirá das “dificuldades” encontradas no percurso (por exemplo, escadas ou rampas);
- v) As distâncias-custo aos destinos-chave resultam da combinação das distâncias reais com a fricção da superfície;
- vi) As distâncias-custo aos destinos-chave podem ser normalizadas através de funções fuzzy que, após a aplicação dos pesos, representam a sua contribuição no índice de acessibilidade;

Sendo i uma localização, A_i a sua acessibilidade é dada pela equação (1) (Mendes, 2001).

$$A_i = \sum_j f(c_{ij}) \cdot w_j \quad (1)$$

Onde $f(c_{ij})$: função fuzzy aplicada à distância-custo entre o local i e o destino-chave j ;

w_j : peso do destino-chave j .

A equação (1) é essencialmente uma Combinação Linear Pesada (WLC) que permite aos critérios compensar entre eles as suas qualidades (*trade-off*). Acontece assim que uma qualidade muito pobre pode ser compensada pela existência de um número de qualidades fortes. Uma outra abordagem, como a Média Ordenada Pesada (OWA), oferece algum controlo sobre a compensação de critérios e inclui o efeito de uma atitude de risco no processo de avaliação, podendo sempre o analista escolher em que zona do espaço estratégico de solução se pretende situar.

Uma componente muito importante do modelo de avaliação multicritério diz respeito às prioridades/importâncias associadas aos diversos critérios intervenientes (neste caso distância aos destinos-chave), isto é, os valores dos pesos w_j da equação (1). O envolvimento de pesos na avaliação tem por objectivo quantificar a importância relativa de cada um dos critérios no conjunto de destinos-chave considerado. Desta forma é possível reflectir a sua importância na contribuição que tem para o índice de acessibilidade global.

Outra componente importante é o processo de normalização a adoptar. Neste caso e por ser o mais adequado para variáveis contínuas (distâncias), optou-se pelo recurso ao procedimento de fuzzification, isto é, a aplicação de uma função fuzzy, devidamente escolhida e criteriosamente calibrada (ver Figura 1). O objectivo é, para todos os destinos-chave, transformar qualquer escala de avaliação numa comparável, enquadrando os valores num intervalo normalizado (neste trabalho, [0, 1]).

Por se pretender introduzir cenários de avaliação no processo, propõe-se uma avaliação da acessibilidade em duas etapas. Na primeira etapa, os destinos-chave são agrupados em função de uma determinada característica comum (por exemplo funcionalidade). A avaliação da acessibilidade de cada local é realizada então em relação a cada grupo, em vez de o fazer

em relação a todos os destinos-chave existentes na área em estudo, através da equação (2) de agregação pelo método WLC. Os pesos são agora definidos em relação ao grupo em que os destinos-chave estão inseridos, isto é, o somatório dos pesos será sempre igual à unidade dentro de cada grupo.

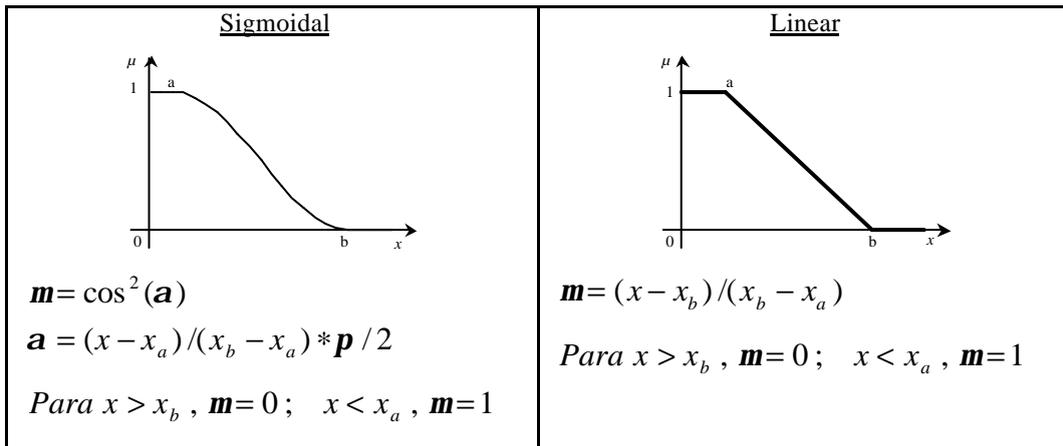


Figura 1. Funções Fuzzy

$$A_i^g = \sum_j^{n_g} f(c_{ij}) \cdot w_j^g \quad (2)$$

Onde A_i^g : índice de acessibilidade do local i em relação ao grupo g ;

$f(c_{ij})$: função fuzzy aplicada à distância-custo entre o local i e o destino-chave j incluído no grupo g ;

w_j^g : peso do destino-chave j incluído no grupo g ;

n_g : número de destinos-chave do grupo g .

A segunda etapa destina-se ao cálculo do índice de acessibilidade global, através da combinação OWA dos valores da acessibilidade em relação aos grupos de destinos-chave A_i^g . Impõe-se, então, a consideração de dois conjuntos de pesos: um primeiro relativo à importância dos próprios grupos de destinos-chave (p_g); um segundo constituído pelos *order weights* (O) que permitirá aplicar o procedimento OWA e, adoptando diferentes combinações de valores, definir cenários de avaliação, reflectindo a aplicação de mediadas de risco e *trade-off* digerentes (ver exemplos em Malczewski, 1999, Ramos, 2000, e Rodrigues, 2001). O índice de acessibilidade global do local i será dado então pela equação (3).

$$A_i = A^i \times O \quad (3)$$

Onde A^i : vector $[A_i^1 \cdot p_1 \ A_i^2 \cdot p_2 \ \dots \ A_i^{n_g} \cdot p_{n_g}]$ ordenado (em ordem crescente),

sendo que A_i^g : índice de acessibilidade do local i em relação ao grupo de destinos-chave g ;

n_g : número de grupos de destinos-chave;

p_g : peso do grupo g ;

O : vector dos *order weights*.

IMPLEMENTAÇÃO EM SIG VECTORIAL

De seguida, apresenta-se e descreve-se o fluxograma da Figura 2, que pretende ser uma orientação para uma implementação em SIG vectorial bem sucedida.

Uma vez conhecidos os nós (incluindo os destinos-chaves) e a rede que serve de suporte aos deslocamentos, o primeiro passo da Figura 2 consiste em calcular as distâncias mais curtas (c_{ij}) através da rede, de cada nó para todos os destinos-chave. Procede-se então à sua normalização recorrendo à ou às funções fuzzy adoptadas e devidamente calibradas (pontos de controlo), obtendo-se os *scores* $f(c_{ij})$. Uma tabela onde previamente foram armazenados os pesos de cada destino-chave permite, multiplicando cada score pelo respectivo peso, calcular os *scores* ponderados de cada nó

relativamente a cada destino-chave. De seguida, é calculado o índice de acessibilidade (A_i^g) relativamente a cada um dos grupos de destinos-chave definidos, correspondendo ao somatório dos respectivos *scores* pesados - equação (2). De seguida, agregam-se os índices de acessibilidade dos grupos segundo o método OWA - equação (3), resultando os índices de acessibilidade globais (A_i). Este método pressupõe a construção de um vector ordenado (em ordem crescente) cujos valores advêm do produto entre os índices de acessibilidade e os pesos respectivos de cada grupo para, de seguida, se calcular o produto entre esse vector e o vector de *order weights*. Finalmente, a construção dos mapas de cenários de avaliação da acessibilidade, cujo o número varia em função do número de vectores de *order weights* adoptados, baseia-se nos índices da acessibilidade globais.

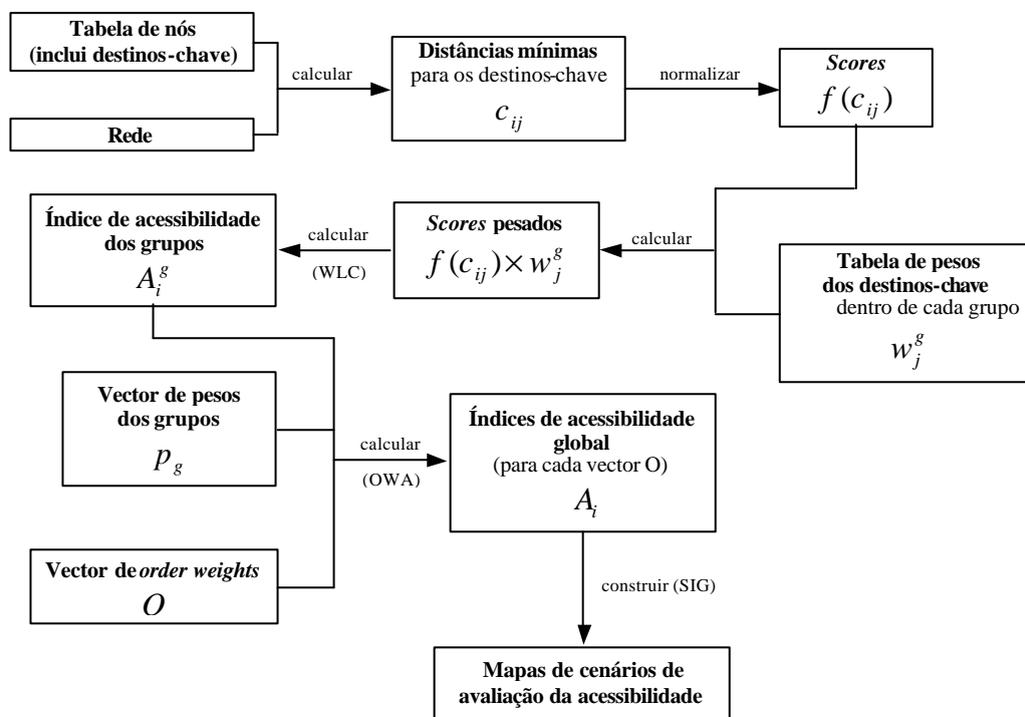


Figura 2. Implementação em SIG vectorial

CASO DE ESTUDO: AVALIAÇÃO DA ACESSIBILIDADE INTERNA DO CAMPUS DA UNIVERSIDADE DO MINHO EM BRAGA

O Campus da Universidade do Minho em Gualtar localiza-se numa área limítrofe da cidade de Braga, entre a zona Este da última e a freguesia de Gualtar. A zona que actualmente está edificada e infraestruturada estende-se ao longo de doze hectares (Figura 3). Este pólo da Universidade abrange uma comunidade universitária de aproximadamente 13000 utentes, os quais se dividem em 12000 alunos¹, 800 docentes e 300 funcionários². Os edifícios existentes suportam a actividade académica, albergando as diversas Escolas e Institutos, três Complexos Pedagógicos e vários serviços, dos quais se podem destacar, a título de exemplo, a Biblioteca, a Cantina, o Centro de Informática, o Pavilhão Polivalente e os Serviços Académicos. O Campus possui ainda “duas portas de entrada”, comuns a peões e veículos: uma a Sul-Oeste, embora condicionada para os automóveis, e outra a Este. São disponibilizados oito parques de estacionamento, quatro dos quais condicionados ao acesso com um cartão magnético, e duas paragens de autocarro: uma no interior do Campus servida por uma linha dedicada aos utentes universitários, e outra no exterior, servida por linhas de âmbito geral.

Sendo que no interior do Campus o principal meio de locomoção é o modo a pé, é oferecida uma rede pedonal com uma extensão aproximada de 5800 metros (Figura 4).

O objectivo do caso de estudo consistiu na avaliação da acessibilidade interna do Campus Universitário de Gualtar. Foi implementado o modelo apresentado anteriormente, com as necessárias adaptações decorrentes da realidade em análise, no sentido de gerar vários cenários de avaliação alternativos.

Os pontos avaliados ao longo da rede correspondem a todos os nós dos arcos que surgiram ao longo do processo de digitalização e posterior construção de topologia. Desta forma, foram tidos em conta 360 pontos (Figura 5) dispersos ao longo da rede que traduzem uma cobertura do Campus que se considerou adequada.

¹ fonte: Serviços Académicos da Universidade do Minho.

² fonte: Secção de Recursos Humanos da Universidade do Minho. Este número refere-se aos funcionários do quadro permanente; estima-se que trabalhem no Campus, para além destes, algumas centenas de outros funcionários, entre tarefeiros, monitores, investigadores, etc.

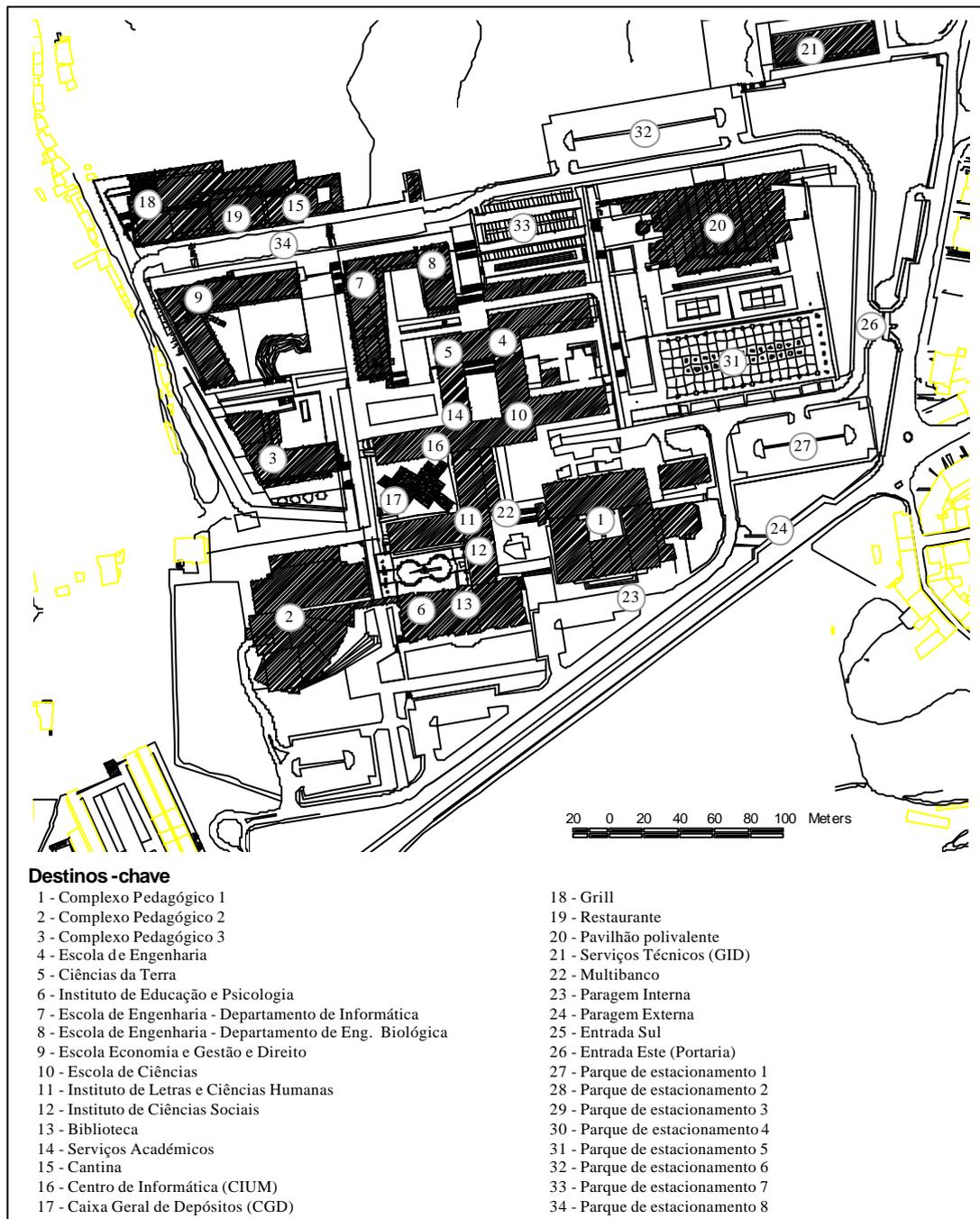


Figura 3. Campus da Universidade do Minho em Gualtar - Braga

1. Os destinos-chave

Concluída a identificação os destinos-chave do Campus (Quadro 1), procedeu-se ao seu agrupamento em três grupos que se consideraram representar as três funcionalidades fundamentais para a comunidade universitária: a primeira engloba os complexos pedagógicos, departamentos e institutos, por funcionarem em conjunto e directamente ligados à leccionação e à investigação; os serviços que, como o nome indica, estão incumbidos de prestar todos os serviços inerentes ou necessários para o funcionamento do Campus; e por fim os acessos, que constituem as "portas" de entrada ou saída em relação ao "exterior".

2. O inquérito

De forma a obter os pesos, identificar as funções fuzzy a adoptar e respectivos pontos críticos que traduzissem o ponto de vista da comunidade utente, foi realizado um inquérito aos vários utilizadores do Campus. Foi adoptada uma amostra da comunidade universitária que incluiu cem alunos, vinte docentes e vinte funcionários, sendo estes números considerados representativos do universo total, de quem se procura traduzir o ponto de vista. Os alunos foram inquiridos aleatoriamente e em zonas dispersas do Campus. Apesar desta preocupação e para evitar qualquer desvio casual, pediu-se a cada inquirido que referisse o curso que frequentava de forma a evitar uma eventual preponderância, no cômputo geral, de alguns cursos. Por seu turno, os docentes e funcionários foram inquiridos de forma a abarcar, em termos

espaciais, toda a área do Campus.

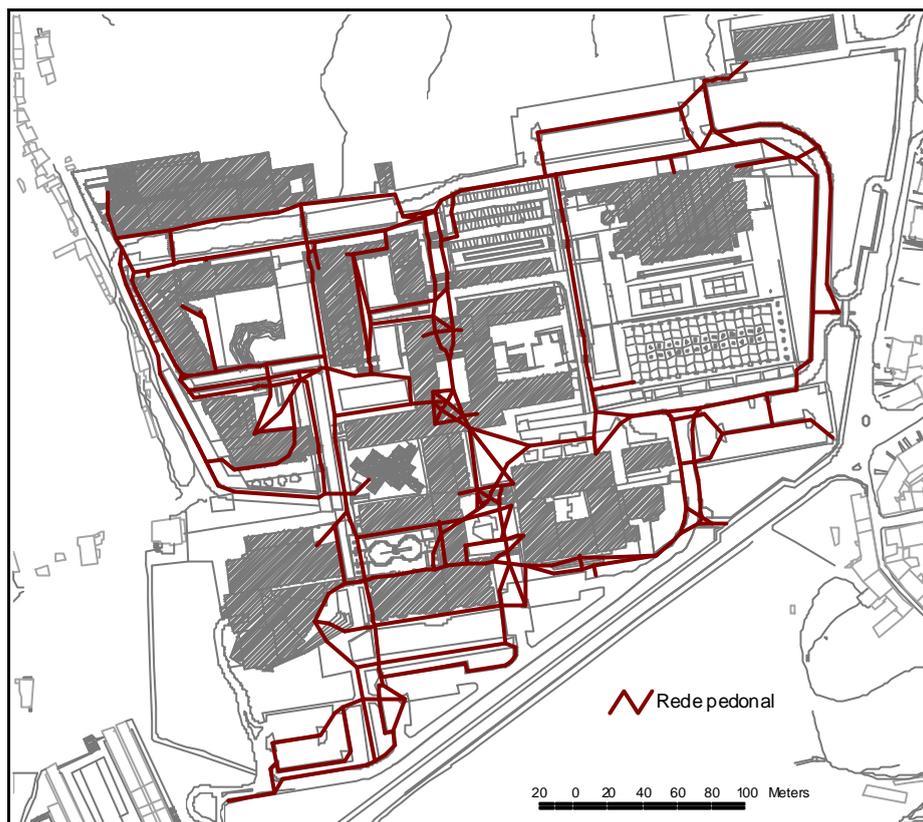


Figura 4. Rede Pedonal do Campus

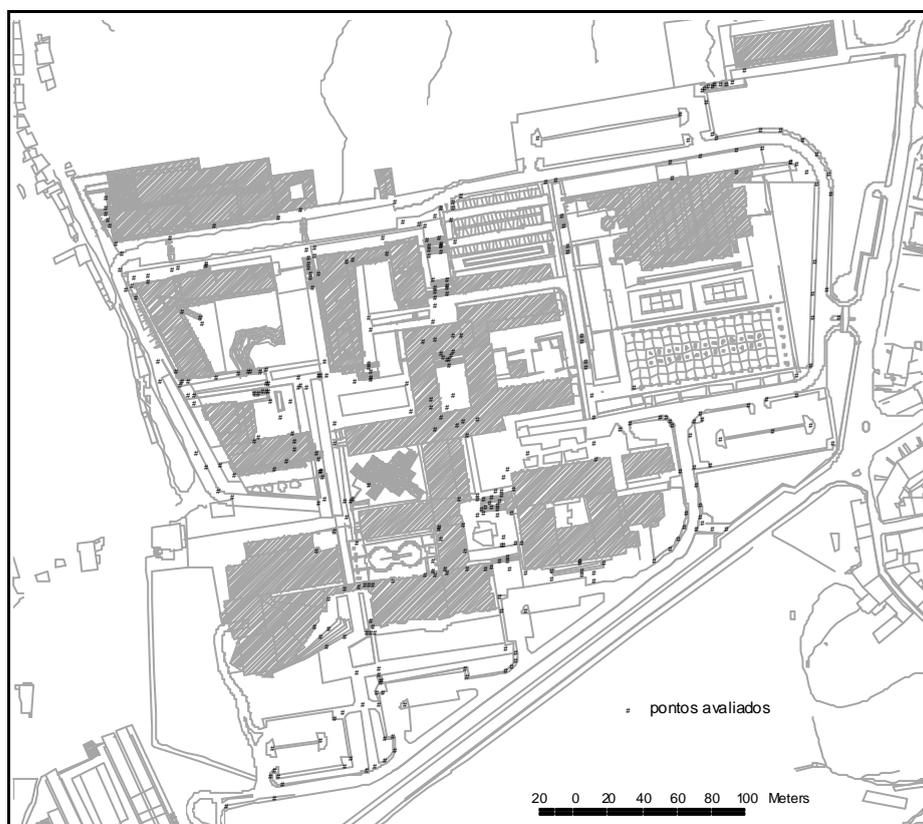


Figura 5. Pontos avaliados

Para os vários destinos-chave definidos, foi desenvolvido o processo de avaliação de pesos: recorrendo a uma escala de dez pontos, os inquiridos atribuíram uma pontuação a cada um dos destinos-chave e funcionalidades em função da

importância que lhes suscitava do ponto de vista da utilização. Em seguida, foi pedida a distância máxima que se dispunham percorrer a pé para se deslocarem até cada destino-chave (Quadro 1). Foi ainda pedido, que identificassem qual das duas funções fuzzy de normalização propostas (linear e sigmoidal) melhor representava, em sua opinião, a variação da importância da distância na acessibilidade ao destino.

Quadro 1 – Destinos-chave e funcionalidades

Funcionalidade	Peso	Destino-chave	Peso	Distância máxima (metros)
Complexos pedagógicos, Departamentos e Institutos	0,37	CP1	0,14	306
		CP2	0,17	356
		CP3	0,08	227
		Escola de Engenharia	0,06	119
		Ciências da Terra	0,07	219
		Instituto de Educação e Psicologia	0,06	156
		Depart. Informática	0,08	174
		Eng. Biológica	0,05	133
		Escola Economia e Gestão e Direito	0,09	204
		Escola de Ciências	0,08	202
		Inst. de Letras e Ciências Humanas	0,06	135
Inst. de Ciências Sociais	0,06	148		
Serviços	0,34	Biblioteca	0,15	406
		Serviços Académicos	0,12	319
		Cantina	0,12	372
		CIUM	0,09	199
		CGD	0,10	223
		Grill	0,07	167
		Restaurante	0,07	138
		Pavilhão polivalente	0,10	287
		GID	0,04	158
Multibanco	0,14	285		
Acessos	0,29	Paragem Interna	0,08	144
		Paragem Externa	0,08	173
		Entrada Sul	0,15	295
		Entrada Este (Portaria)	0,12	255
		Parque de estacionamento 1	0,08	183
		Parque de estacionamento 2	0,06	109
		Parque de estacionamento 3	0,06	124
		Parque de estacionamento 4	0,07	127
		Parque de estacionamento 5	0,08	186
		Parque de estacionamento 6	0,08	189
		Parque de estacionamento 7	0,07	119
Parque de estacionamento 8	0,07	164		

3. A Normalização

Necessária para agregar a avaliação de critérios não comparáveis entre si, a normalização efectua-se através de um processo de *fuzzification* com recurso a uma função (linear ou sigmoidal) escolhida para cada destino-chave. No entanto, aconteceu que nenhuma das curvas reuniu uma preferência clara dos inquiridos. Optou-se então por efectuar duas implementações do modelo: uma recorrendo à função sigmoidal e outra à função linear. Desta forma, será ainda possível avaliar a diferença de resultados devida ao tipo de curva adoptada para a função fuzzy.

Não menos importante, era a procura dos dois pontos de controlo, que permitissem calibrar a função fuzzy. Ao primeiro foi atribuído o valor zero, dado que a uma distância nula corresponde um score máximo em termos de acessibilidade e, como as distâncias a percorrer são reduzidas, admitiu-se que não existe nenhum patamar no qual se considere constante o score máximo. Para o segundo ponto (distância máxima), a partir do qual os scores passam a tomar o valor zero (acessibilidade nula), foram adoptados os valores resultantes do inquérito efectuado (médias).

A informação recolhida a este nível denota que os utentes do Campus são relutantes a deslocarem-se, pois as distâncias obtidas são extremamente baixas (entre 109 e 406 metros). Como referido por Aultman-Hall (1997, p.12) um percurso de 400 metros é frequentemente considerado como aceitável para percursos a pé. Por essa razão, optou-se por implementar uma terceira vez o modelo, adoptando uma curva sigmoidal (que privilegia as curtas distâncias em detrimento das longas

distâncias) e a distância máxima de 400 metros para todos os destinos chave.

4. Impedâncias

A existência de diversas escadas, ao longo dos percursos habituais efectuados pelas pessoas que frequentam o Campus, levou à consideração de impedâncias nos arcos correspondentes da rede (devidamente individualizados no processo de digitalização). Dado que a transposição de uma escada equivale ao percurso de uma distância superior à distância horizontal sem escada (Figura 6), foi então medido no terreno o espelho (altura) e cobertor (comprimento percorrido) de degraus das diversas escadas. As medidas apresentaram valores semelhantes e foram então adoptadas as seguintes: 17.5 cm de espelho e 33.5 cm de cobertor. Obteve-se assim uma impedância a aplicar aos lances de escadas que agrava as distâncias em 13%.

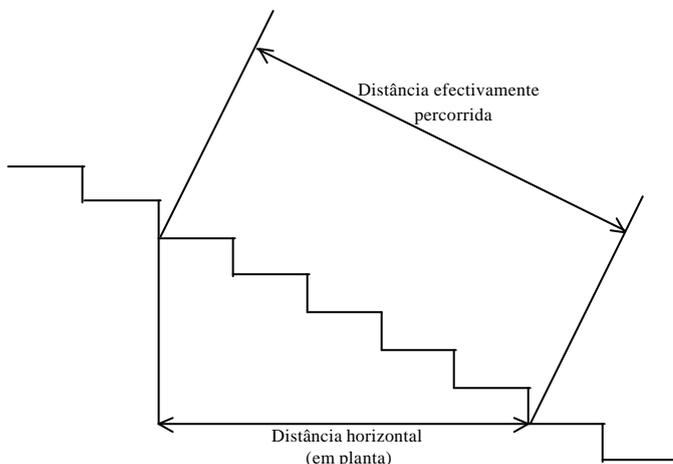


Figura 6. Distância percorrida num lance de escadas

5. Cenários de avaliação

Implementando o modelo apresentado com as respectivas adaptações ao Caso de Estudo e utilizando rotinas previamente programadas (que permitem automatizar e facilitar a execução dos passos do fluxograma da Figura 2), obtiveram-se um conjunto de doze cenários de avaliação da acessibilidade para o Campus de Gualtar da Universidade do Minho e para cada análise. Este número advém da adopção de um mesmo número de pontos de decisão (Figura 7) do espaço estratégico de decisão. Esta opção justifica-se com o objectivo de identificar mais facilmente a transição entre os três pontos de avaliação fundamentais, a saber, os pontos A (*tradeoff* total), B (risco máximo) e C (risco mínimo).

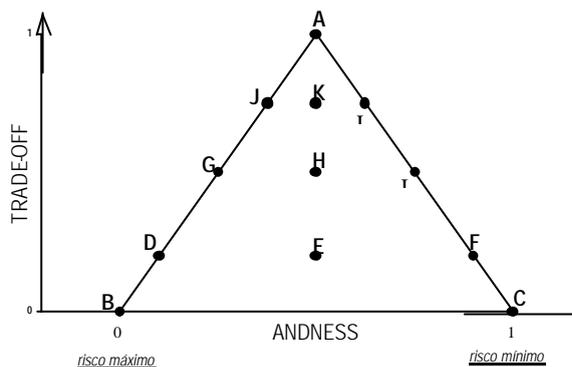


Figura 7. Pontos de decisão no espaço estratégico de decisão

A geração dos mapas de acessibilidade seguiu a ordem de implementação do modelo. Em termos práticos, equívaleu à divisão deste processo em duas fases:

- geração dos mapas de base, representando a avaliação da acessibilidade relativamente a cada grupo individualmente (pela implementação do método WLC);
- geração dos mapas dos cenários de avaliação, partindo dos valores obtidos na fase anterior e implementando a agregação pelo método OWA de acordo com o ponto de decisão adoptado.

O processo de desenvolvimento dos mapas de acessibilidade é comum às várias análises e constituído pelas seguintes acções:

- modelação de uma superfície irregular de triângulos a partir dos pontos avaliados, isto é, o atributo elevação vai colher os seus valores ao atributo dos nós que contenha o score de grupo a ilustrar (processo idêntico à elaboração de um modelo digital de terreno), gerando um novo tema que facilita a visualização da acessibilidade;
- apresentação da superfície gerada com uma legenda constituída por nove intervalos iguais (por se considerar um número que permite uma boa interpretação e compreensão dos resultados), escolhendo-se o intervalo de variação de cores do verde para o vermelho (onde verde corresponde à maior acessibilidade e vermelho à menor);
- elaboração, para os cenários A, B e C, dos histogramas das áreas obtidas, correspondendo cada barra do gráfico à área de cada uma das nove classes de acessibilidade, variando da esquerda (scores mais baixos) para a direita (scores mais altos).

As Figuras 8, 9 e 10 apresentam os mapas da acessibilidade, segundo a normalização da Análise III, vista apenas na óptica das funcionalidades adoptadas. Os valores de referência para a geração destes mapas provêm da sequência de cálculo que permite obter os *scores* da acessibilidade em cada nó da rede relativamente a cada funcionalidade, pela agregação segundo o método WLC dos *scores* relativos aos destinos-chave dentro de cada grupo. Assim, a Figura 8 representa a acessibilidade aos Complexos Pedagógicos, Institutos e Departamentos, a Figura 9 a acessibilidade aos Serviços e a Figura 10 a acessibilidade aos Acessos.

Por seu turno, a Figura 11 apresenta os mapas gerados representativos dos cenários de avaliação implementados de acordo com a Análise III. A geração destes mapas resulta da agregação dos *scores* relativos aos grupos utilizando o procedimento OWA. A Figura 12 apresenta os histogramas das superfícies geradas para os pontos de decisão A, B, e C, individualmente e em conjunto. Nos histogramas adoptaram-se nove classes apresentadas nos mapas, sendo a classe 1 a de menores valores de acessibilidade e a classe 9 a de maiores valores.

5. Conclusões do Caso de Estudo

Para as três análises efectuadas, os mapas relativos à acessibilidade das funcionalidades mostram dois mapas muito semelhantes: a acessibilidade aos Complexos Pedagógicos, Departamentos e Institutos e a acessibilidade aos Serviços. Ambas mostram áreas de muito boa a boa acessibilidade concentradas no centro do Campus, característica consentânea com a localização dos edifícios que albergam essas funcionalidades. Este facto é mais acentuado no caso dos Serviços, já que estes se encontram essencialmente posicionados na parte central do Campus. No que respeita à acessibilidade aos Acessos, é patente o privilegiar dos parques de estacionamento mais próximos dos complexos pedagógicos 1 e 2 (parques 1 e 5 de livre acesso - alunos - e parques 2, 3 e 4 de acesso condicionado - docentes e funcionários), prolongando-se a zonas de muito boa a boa acessibilidade às paragens de autocarro e às entradas. Este resultado decorre do privilégio que os utentes dão aos dois acessos de entrada, pois muitos deles residem na proximidade do Campus e deslocam-se a pé. Com um peso ligeiramente inferior (ver Quadro 1) situam-se os parques de estacionamento e as paragens de autocarro, origem da extensão da mancha de zona de muito boa a boa acessibilidade. Esta zona aumenta consideravelmente na Análise III pois, no inquérito, os utentes admitiram distâncias bastante inferiores a 400 metros para os destinos-chave desta funcionalidade.

Quanto aos cenários de avaliação decorrentes da implementação das três análises efectuadas, existe um comportamento semelhante, à medida que se progride do ponto A para o ponto B. Há uma redução ligeira da zona central de muito boa acessibilidade a boa acessibilidade, resultado da restrição à capacidade de compensação entre critérios (tradeoff nulo em B). Na passagem do ponto de decisão A para C, a parte central do Campus deixa de ser a zona de melhor acessibilidade, sendo esta transferida para as zonas dos parques de estacionamento mais utilizadas pelos utentes, resultado da opção de risco mínimo sem compensação de critérios. No entanto, na Análise III, a zona central continua a ser considerada de boa acessibilidade motivada pelo aumento imposto à distância máxima (400 metros) nesta análise, comparativamente com as outras duas, para a generalidade dos destinos chave. Apesar de ser uma avaliação com risco mínimo, o resultado garante uma grande área de acessibilidade muito boa a boa.

Pela análise dos histogramas, pode-se concluir que, de acordo com a Análise III, a área de muito boa a boa acessibilidade é superior para qualquer um dos três pontos de decisão, comparativamente com as outras duas análises. Esta conclusão é previsível dada a adopção de uma distância máxima igual a 400 metros, exceptuando o caso da Biblioteca, superior aos valores obtidos pelo inquérito. Na mesma análise, acontece igualmente um abatimento da diferença entre os histogramas dos três pontos de decisão em relação as outras duas análises efectuadas.

Comparando os cenários encontrados e confrontando com a análise do risco de avaliação, pode-se concluir que as áreas de maior acessibilidade encontradas para a solução de risco mínimo (C) são aquelas utilizadas por todos os utilizadores do Campus, independentemente do seu local preferencial de trabalho dentro do Campus, isto é, as portas de acesso, parques de estacionamento e entradas.

Na análise de risco neutro e tradeoff total, as zonas centrais do Campus, equitativamente próximas de todos os destinos-chave, são aquelas que obtêm scores mais elevados. Na análise de risco máximo e como o risco não é muito, pois a dimensão do Campus é aceitável para percursos a pé e os destinos-chave mais importantes estão numa posição central, a solução encontrada é muito semelhante à da obtida pela agregação WLC (de risco médio).

Em termos de análise da distribuição dos destinos-chave no Campus, ressaltam de imediato a localização dos edifícios da Cantina/Grill/Restaurante, do Pavilhão Polivalente e dos Serviços Técnicos (GID). Estes edifícios estão implantados em

zonas cujo índice de acessibilidade é baixo, mais precisamente nas extremidades do Campus (como já referido anteriormente, as zonas com índices mais elevados estão no centro do Campus).

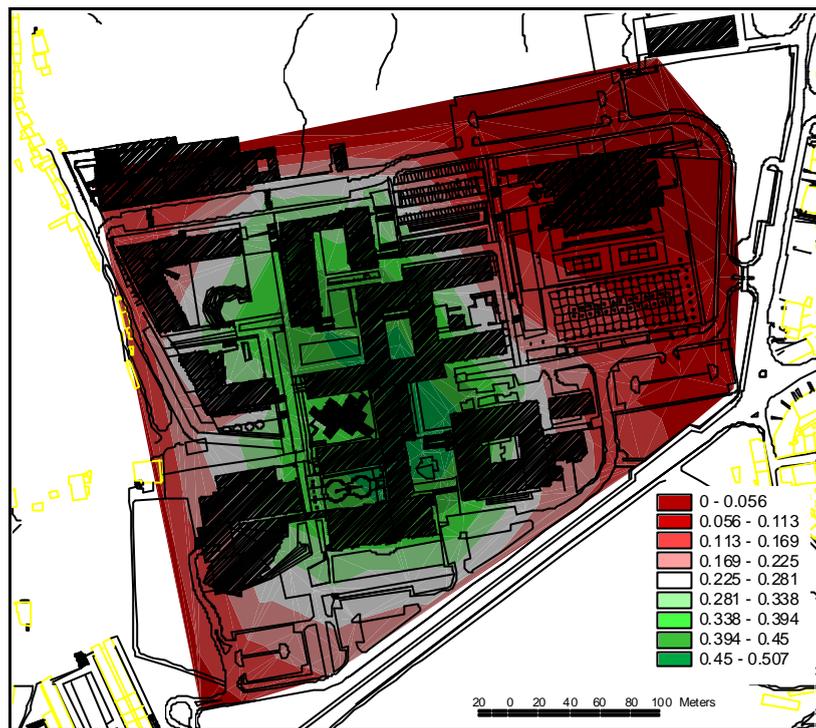


Figura 8. Acessibilidade aos complexos pedagógicos, institutos e departamentos

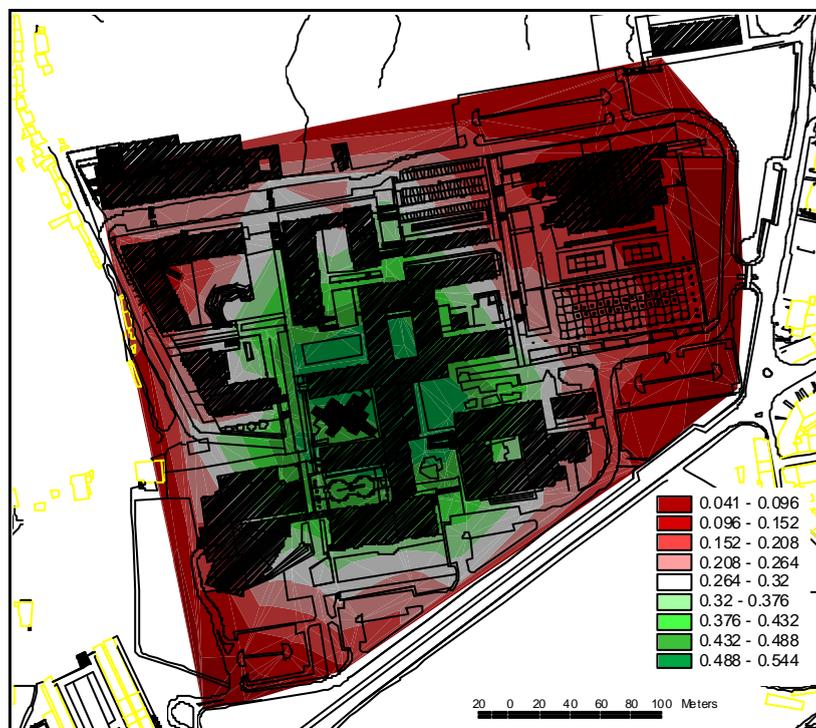


Figura 9. Acessibilidade aos serviços

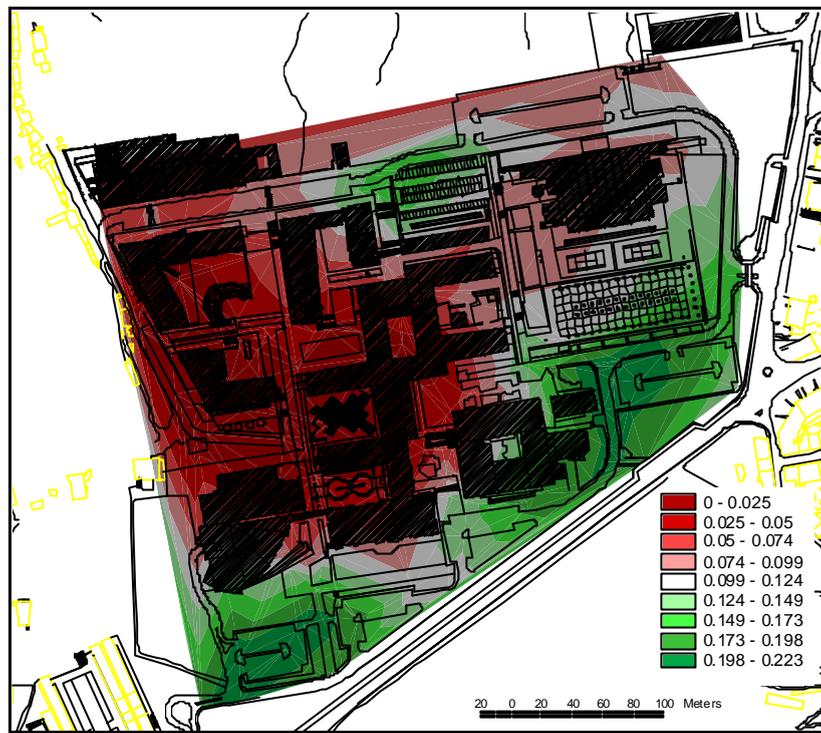


Figura 10. Acessibilidade aos acessos

Frequentado por uma grande parte da comunidade utente e oferecendo um serviço de primeira necessidade, a alimentação, a Cantina/Grill/Restaurante constitui dos casos apresentados o que suscita mais reflexão. A natureza do serviço prestado motiva, em geral, duas caminhadas: de e para os destinos-chave. Como, neste estudo, não se distinguem os sentidos de percursos na rede, pode-se afirmar também que o índice de acessibilidade do conjunto dos destinos-chave à Cantina/Grill/Restaurante é baixo, o que apenas contribui para agravar ainda mais a situação. No entanto e após analisar os planos de desenvolvimento do Campus no futuro que prevêem expansões para oeste e noroeste, é muito possível que esta localização deixe ser questionável.

No que toca ao Pavilhão Polivalente, é sabido que a sua procura está relacionada com a prática de actividades desportivas e de lazer. Estas actividades, por serem praticadas geralmente ao fim do dia, levam os utentes a retirarem-se do Campus e não a regressarem a outros pontos ou destinos-chave. Dada a especificidade da procura deste equipamento, considera-se aceitável a sua localização.

Para a comunidade utente em geral, o recurso ao GID acontece de forma muito esporádica. A procura deste serviço está geralmente associada ao uso dos parques de estacionamento, nomeadamente no levantamento de um dístico cuja colocação no automóvel é obrigatória ou na aquisição de cartões de acesso aos parques condicionados. Perante isto, considera-se a sua localização aceitável.

CONCLUSÕES

O modelo de avaliação da acessibilidade apresentado baseia-se na medição da distância entre um ponto de partida (a avaliar) e os destinos-chave. O índice de acessibilidade global é obtido através do uso de técnicas de análise multicritério, em cada nó da rede e em relação aos destinos-chave. Preconiza-se a sua implementação num SIG vectorial por este ambiente ser considerado melhor adaptado à resolução de problemas de transportes. Dado que os pontos avaliados são discretos, propõe-se o ajuste aos mesmos de superfícies contínuas com a finalidade de permitir visualizar a distribuição da acessibilidade para toda a área em estudo. Desta forma, procura-se suprir uma das deficiências dos sistemas tradicionais (baseados em quadros e tabelas) que consiste numa comunicação pouco eficaz dos resultados e das alternativas aos decisores (Malczewski *et al.*, 1997; Malczewski, 1999).

Por recorrer ao operador de agregação OWA (Order Weighted Average), aponta-se como maior potencial do modelo a possibilidade de desenvolver cenários de avaliação baseados na atitude de risco (ANDness) e compensação entre critérios (tradeoff), obtendo-se desta forma um espectro estratégico de avaliação. Na base do modelo encontram-se os grupos de destinos chave e respectivas ponderações (pesos), que se recomenda obter a partir dum inquérito à comunidade utente de forma a reflectir o ponto de vista da mesma. Defende-se também a integração directa no ambiente SIG dos métodos de avaliação multicritério, por constituir uma orientação que leva a uma potenciação e a um aumento da utilidade dos SIGs em tarefas de avaliação (Carver, 1991; Arentze *et al.*, 1994a). Além disso, este exemplo de avaliação de acessibilidade, realizado com a técnica de avaliação multicritério integrada a um SIG vectorial, abre ainda perspectivas de aplicação do modelo proposto para outros problemas de planeamento de transportes.

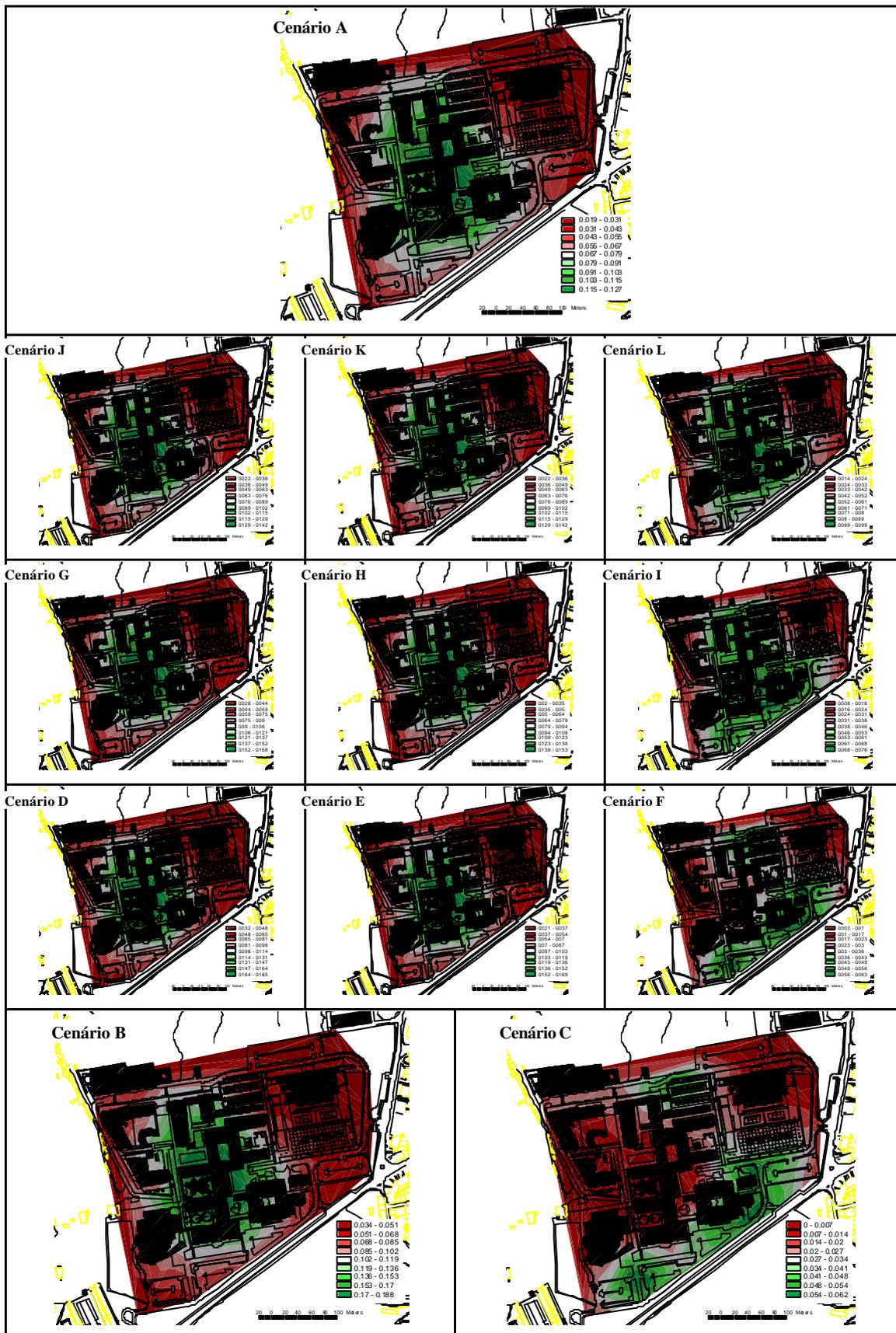


Figura 11. Cenários de avaliação

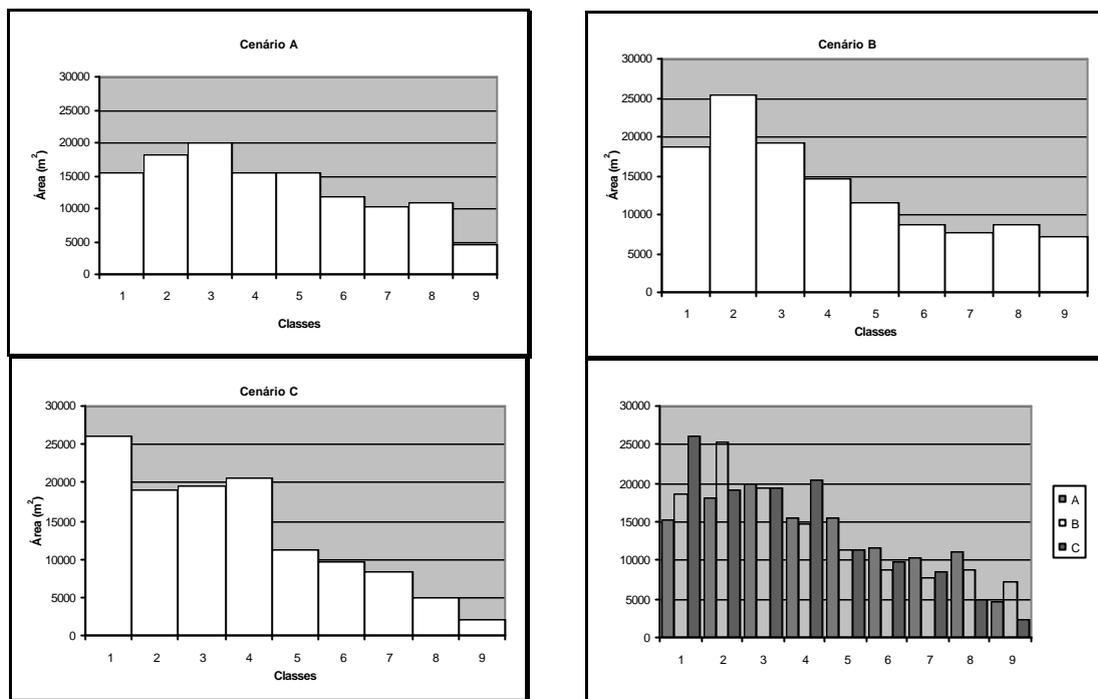


Figura 12. Histogramas dos cenários de avaliação A, B e C

Para além das potencialidades já apontadas, considera-se que as possibilidades analíticas do modelo não se esgotam por aí. A sua exploração pode assumir ainda, na prática, formatos diversos, tais como: a identificação de destinos chave que justifiquem, pela sua relevância e taxa de frequência, a sua deslocação por se encontrarem em zonas com baixa acessibilidade; a identificação de localizações preferenciais de novos edifícios (para a implantação dos quais, geralmente, só existem, à partida, zonas com baixa acessibilidade), podendo-se ainda definir os ajustes a implementar na rede de acessos de forma a aumentar a acessibilidade das futuras edificações, em função da importância dos serviços que irão albergar. Em termos futuros sugere-se que, noutros estudos que utilizem este modelo de avaliação da acessibilidade, a resistência ao movimento possa contemplar aspectos como o conforto e/ou a mobilidade. Nesse sentido, poderá ter-se em conta factores como a segurança, o volume de tráfego, a topografia, a qualidade dos passeios ou a facilidade em atravessar as ruas, mediante a sua adequação ou não ao tipo de estudo pretendido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao ICCTI (Instituto de Cooperação Científica e Tecnológica Internacional) e à CAPES (Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), agências de fomento à pesquisa em Portugal e no Brasil, respectivamente, pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Allen, W. B., D. Liu e S. Singer (1993) Accessibility Measures of U.S. Metropolitan Areas. *Transportation Research, Part B, Methodological*, v. 27, n. 6, p. 439-450.
- Arentze, T. A.; A. W. J. Borgers, H. J. P. Timmermans (1994a) Geographical Information Systems in the Context of Multipurpose Travel: A New Approach. *Geographical Systems*, v. 1, n. 4, p. 87-102.
- Arentze, T. A.; A. W. J. Borgers e H. J. P. Timmermans (1994b) Multistop-based Measurements of Accessibility in a GIS Environment. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 8, n. 4, p. 343-356.
- Aultman-Hall, L.; M. Roorda e B. W. Baetz (1997) Using GIS for Evaluation of Neighborhood Pedestrian Accessibility. *Journal of Urban Planning and Development*, v. 123, n. 1, ASCE, p. 10-17.
- Bender, M. J. e S. P. Simonovic (1995) *On the Use of GRASS for Preparation of Water Resources Planning and Management: Case Studies*. Water Resources Research Report 34. The University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada.
- Bruinsma, F. e P. Rietveld (1998) The Accessibility of European Cities: Theoretical Framework and Comparison of Approaches. *Environment and Planning A*, v. 39, p. 499-521.
- Carver, S. J. (1991) Integrating Multi-criteria Evaluation with Geographical Information Systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 5, n. 3, p. 321-339.
- Eastman, J. R. (1997) *IDRISI for Windows: User's Guide. Version 2.0*. Clark University - Graduate School of Geography, Worcester, MA, USA.
- Eastman, J. R.; H. Jiang e J. Toledano (1998) Multi-criteria and Multi-objective Decision Making for Land Allocation Using GIS. In: Beinat, E. e P. Nijkamp (eds.) *Multicriteria Analysis for Land-Use Management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, p. 227-251.
- Easton, A. (1973) *Complex Managerial Decision Involving Multiple Objectives*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.

- Ewart, G. M. (1994) *Integrating Geographic Information Systems and Multicriteria Decision Making to Develop a Prototype Decision Support System for Health Professionals*. Tese de Mestrado, Universidade de Idaho, Moscow, ID, USA.
- Geertman, S. C. M. e J. R. R. Van Eck (1995) GIS and Models of Accessibility Potential: An Application in Planning. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 9, n. 1, p. 67-80.
- Goto, M.; A. N. R. Silva e J. F. G. Mendes (2001) Uma Análise de Acessibilidade sob a Ótica da Equidade – O Caso da Região Metropolitana de Belém, Brasil. *Engenharia Civil/Civil Engineering*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, n. 10, p. 55-66.
- Hoggart, K. (1973) *Transportation Accessibility: Some References Concerning Applications, Definitions, Importance and Index Construction*. Council of Planning Librarians: Exchange Bibliography 482, Monticello, IL, USA.
- Ingram, D. R. (1971) The Concept of Accessibility: A Search for an Operational Form. *Regional Studies*, v. 5, n. 2, p. 101-107.
- Jankowski, P. e G. Ewart (1996) Spatial Decision Support System for Health Practitioners: Selecting a Location for Rural Health Practice. *Geographical Systems*, v. 3, n. 2, p. 279-299.
- Jankowski, P.; T. L. Nyerges, A. Smith, T. J. Moore e E. Horwath (1997) Spatial Group Choice: A SDSS Tool for Collaborative Spatial Decision-Making. *International Journal of Geographical Information Systems*, v. 11, n. 6, p. 566-602.
- Jankowski, P.; N. Andrienko e G. Andrienko (2001) Map-centred Exploratory Approach to Multiple Criteria Spatial Decision Making. *International Journal of Information Science*, v. 15, n. 2, p. 101-127.
- Love, D. e P. Linqvist (1995) The Geographical Accessibility of Hospitals to the Aged: A Geographic Information Systems Analysis within Illinois. *Health Services Research*, v. 29, n. 6, p. 629-652.
- Mackiewicz, A. e W. Ratajczak (1996) Towards of New Definition of Topological Accesibility. *Transportation Research, Part B, Methodological*, v. 30, n. 1, p. 47-79.
- Malczewski, J.; M. Pazner e M. Zaliwska (1997) Visualization of Multicriteria Location Analysis Using Raster GIS: A Case Study. *Cartography and Geographic Information Systems*, v. 24, n. 2, p.80-90.
- Malczewski, J. (1999) *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Mendes, J. F. G (2001) Multicriteria Accessibility Evaluation using GIS as Applied to Industrial Location in Portugal. *Earth Observation Magazine*, v. 10, n. 2, p. 31-35.
- Morris, J. M.; P. L. Dumble e M. R. Wigan (1979) Accessibility Indicators for Transport Planning. *Transportation Research, Part A, Policy and Practice*, v. 13, n. 2, p. 91-109.
- Osgood, C. E.; G. J. Suci e P. H. Tannenbaum (1957) *The Measurement of Meaning*. Universidade of Illinois Press, Urbana, IL, USA.
- Ramos, R. A. R. (2000) *Localização Industrial. Um Modelo Espacial para o Noroeste de Portugal*. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Rodrigues, D. S. (2001) *Avaliação Multicritério da Acessibilidade em Ambiente SIG*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho, Braga, Portugal.
- Saaty, T. L. (1977) A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, v. 15, n. 3, p.234-281.
- Saaty, T. L. (1980) *The Analytical Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York, NY, USA.
- Saaty, T. L. (1987) Concepts, Theory, and Techniques: Rank Generation, Preservation, and Reversal in the Analytic Hierarchy Decision Process. *Decision Sciences*, v. 18, n. 2, p. 157-177.
- Schoon, J. G., M. MacDonald e A. Lee (1999) Accessibility Indices: Pilot Study and Potential Use in Strategic Planning. *Proceedings of the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board* (em CD-ROM), Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- Shen, Q. (1998) Location Characteristics of Inner-city Neighborhoods and Employment Accessibility of Low-wage Workers. *Environment and Planning B*, v.25, p. 345-365.
- Silva, A. N. R. (1998) *Sistemas de Informações Geográficas para o Planejamento de Transportes*. Tese de Livre-docência. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.
- Silva, A. N. R.; A. A. Raia Jr. e C. W. R. Bocanegra (2002) Exploring an ANN Modeling Approach that Combines Accessibility and Mobility into a Single Trip Potential Index for Strategic Planning. *Proceedings of the 81st Annual Meeting of the Transportation Research Board* (em CD-ROM), Transportation Research Board, Washington, DC, USA.
- Simonovic, S. P. e M. J. Bender (1996) Collaborative Planning-Support System: An Approach for Determining Evaluation Criteria. *Journal of Hydrology*, v. 177, n. 3-4, p. 237-251.
- Stillwell, W. G., D. A. Seaver e W. Edwards (1981) A Comparison of Weight Approximation Techniques in Multiattribute Utility Decision Making. *Organizational Behavior and Human Performance*, v. 28, n. 1, p. 62-77.
- Tagore, M. R. e P. K. Sikdar (1995) A New Accessibility Measure Accounting Mobility Parameters. *Proceedings of the 7th World Conference on Transport Research*, The University of New South Wales, Sydney, Austrália, v. 1, p. 305-315.
- Talen, E. e L. Anselin (1998) Assessing Spatial Equity: An Evaluation of Measures of Accessibility to Public Playgrounds. *Environment and Planning A*, v. 30, p. 595-613.
- Turró, M.; A. Ulled, A. Esquiús e E. Cañas (2000) Definición del Indicador de Conectividad ICON. *Memorias del IV Congreso de Ingeniería del Transporte*, Valencia, Espanha, v.1, p. 21-29.
- Van der Waerden, P.; H. Timmermans, J. Smeets e A. N. R. Silva (1999) The Validity of Conventional Accessibility Measures: Objective Scores versus Subjective Evaluations. *Anais do XIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, ANPET, São Carlos, v. 1, p. 40-49.
- Voogd, H. (1983) *Multicriteria Evaluation for Urban and Regional Planning*. Pion, London.

- Yager, R. R. (1988) On Ordered Weighted Averaging Aggregation Operators in Multicriteria Decision Making. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 8, n. 1, p.183-190.
- Zadeh, L. A. (1965) Fuzzy Sets. *Information and Control*, v. 8, p. 338-353.