EFEITO ESTRUTURANTE DAS REDES DE TRANSPORTE NO TERRITÓRIO

Modelo de Análise

Paulo Morgado

Modelação, Ordenamento e Planeamento Territorial
Centro de Estudos Geográficos
Universidade de Lisboa
2011

IGOT-UL / CEG-UL
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
Centro de Estudos Geográficos
Universidade de Lisboa

Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território.
Modelo de Análise.

Paulo Morgado

Ficha Técnica

Título:
Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território.
Modelo de Análise

Autores:
Paulo MORGADO

Edição:
CEG-UL / IGOT-UL
Centro de Estudos Geográficos
Instituto de Geografia e Ordenamento do Território
Universidade de Lisboa

Tiragem:
100 exemplares

ISBN:
978-972-636-219-7

Índice de conteúdos

ÍNDICE DE FIGURAS
ÍNDICE DE GRÁFICOS
ÍNDICE DE TABELAS

15 | 1. INTRODUÇÃO
15 | 1.1. Enquadramento
19 | 1.2. Objectivos
20 | 1.3. Opções metodológicas
21 | 1.4. Estrutura da dissertação

25 | 2. TEORIA DOS GRAFOS
27 | 2.1. Conceitos e definições
33 | 2.2. A teoria dos grafos nas ciências geográficas
42 | 2.3. Medidas topológicas e propriedades dos grafos
45 | 2.3.1. Medidas de conectividade e de ligação
50 | 2.3.2. Medidas de acessibilidade e centralidade: Análise de redes pelo cálculo de matrizes

61 | 3. REDES COMPLEXAS
63 | 3.1. A teoria da aleatoriedade
65 | 3.2. A teoria do Mundo pequeno e dos seis graus de separação
68 | 3.3. A dinâmica das redes: O modelo de Watts e Strogatz e o efeito de vizinhança
74 | 3.4. Os *Hubs* nas redes
76 | 3.5. Redes sem escala
78 | 3.6. Os ricos ficam mais ricos

81 | 4. OS SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA PARA TRANSPORTES (SIG-T)
83 | 4.1. Origens e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T
90 | 4.2. O que se entende por SIG e SIG-T
96 | 4.3. Modelos SIG-T
97 | 4.4. Principais aplicações e tendências dos SIG-T

105 | 5. MODELO DE ANÁLISE DO EFEITO ESTRUTURANTE DAS REDES DE TRANSPORTES NO TERRITÓRIO
106 | 5.1. Conceitos fundamentais
116 | 5.2. Conceptualização do modelo
118 | 5.3. Base de dados de features lineares em SIG para a construção do modelo
120 | 5.3.1. 1ª Fase operacional – Rasterização e georreferenciação dos mapas
124 | 5.3.2. 2ª fase operacional - Criação da Base de Dados Geográfica e vectorização das redes e dos nós
127 | 5.3.3. 3ª fase operacional – Conversão da geometria das redes em características topológicas.

130 | **5.4. Implementação do Modelo geo_grafo**
130 | 5.4.1. Desenho do programa
131 | 5.4.2. Funcionamento do programa
135 | **5.5. Interface Gráfico do Utilizador (IGU) e Plug-in SIG-T**

137 | **6. ANÁLISE DOS RESULTADOS**
140 | **6.1. O Modelo Isotrópico para análise do efeito da rede de transportes rodoviários na organização espacial**
186 | **6.2. O Modelo anisotrópico para análise do efeito da rede de transportes rodoviários na organização espacial**
187 | 6.2.1. Matriz Ponderada L
199 | 6.2.2. Modelo Gravítico
211 | **6.3. O Problema Mundo pequeno para análise da eficácia e vulnerabilidade da rede de transportes rodoviários**
223 | **6.4. Análise comparativa**

231 | **7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**
231 | **7.1. A pertinência do modelo: a introdução da componente espacial e a aderência dos resultados à análise geográfica**
236 | **7.2. As oportunidades de desenvolvimento do modelo: condições para difusão do modelo e criação de novas funcionalidades de análise**

241 | **BIBLIOGRAFIA**

Índice de figuras

FIGURA 1 | 30
As 7 pontes sobre o Rio Pregel

FIGURA 2 | 49
Grafo euleriano

FIGURA 3 | 63
Grafo (G), dos nós N={A, B, C, D}, ligados pelos arcos A=[{A,B}, {B,C}, {B,D}]

FIGURA 4 | 67
Grafo não-orientado

FIGURA 5 | 71
Grafo planar (CHIP)

FIGURA 6 | 73
Grafo não-planar, com o fluxo de tráfego europeu na internet, 1997

FIGURA 7 | 74
Sub-grafo H, do grafo G.

FIGURA 8 | 78
Fases de desenvolvimento da rede de transportes em Países de fraco desenvolvimento económico.

FIGURA 9 | 84
Grafo e respectivas matrizes C1 e C2

FIGURA 10 | 86
Grafo e respectiva matriz de conectividade, C1

FIGURA 11 | 87
Grafo e respectiva matriz de distâncias topológicas, D

FIGURA 12 | 88
Grafo e respectivas matrizes L1 e L2

FIGURA 13 | 89
Princípio de transição, na teoria da aleatoriedade

FIGURA 14 | 90
Modelo de Watts e Strogatz e o efeito de vizinhança

91 | FIGURA 15
Comparação entre caminho-mais-curto (D) e Coeficiente de clustering (C)

94 | FIGURA 16
Gráfico da distribuição do grau dos nós de um grafo aleatório (A) e de um grafo livre de escala (B)

96 | FIGURA 17
Exemplo de grafo aleatório versus grafo sem escala

98 | FIGURA 18
Evolução cronológica dos SIG relativamente a outros grandes acontecimentos tecnológicos

99 | FIGURA 19
Métodos de cartografia automática para o Modelo de Planeamento Urbano de Sines.

102 | FIGURA 20
Quatro componentes dos SIG-T

107 | FIGURA 21
Níveis de abstracção dos modelos

115 | FIGURA 22
Modelo dos modelos

116 | FIGURA 23
Relação entre a Geografia e a Ciência computacional

117 | FIGURA 24
Blocos do Modelo Conceptual

118 | FIGURA 25
Correcção Geométrica de uma imagem pelo método do vizinho mais próximo

119 | FIGURA 26
Exemplo de erros típicos da vectorização: switch-back; overshoot e undershoot

129 | FIGURA 27
Estrutura organizativa da topologia na Geodatabase

131 | FIGURA 28
Esquema processual síntese do 1º bloco do Modelo conceptual

132 | FIGURA 29
Interface do programa criado em VBA sobre o interface de visualização do programa hospedeiro (ArcMap)

FIGURA 30 | 30
Interface gráfico do ArcMap, para visualização e sobreposição das features de vias (lado esquerdo) e preparação da saída gráfica do mapa temático (lado direito).

FIGURA 31 | 49
Interface gráfico do ArcCatalog, para construção da geodatabase

FIGURA 32 | 63
Interface do ArcToolbox, com lista de medidas de distribuição espacial (circulo a encarnado) e visualização dos resultados no visualizador do ArcMap

FIGURA 33 | 67
Grafo das Estradas Romanas

FIGURA 34 | 71
Grafo da Rede de Estradas Romanas com identificação dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis calculados a partir da matriz D.

FIGURA 35 | 73
Grafo com a rede de cidades existentes até ao ano de 1100, e as medidas de distribuição espacial

FIGURA 36 | 74
Grafo da Rede de Itinerários de Portugal continental em 1800

FIGURA 37 | 78
Grafo da Rede de Itinerários com identificação dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis calculados a partir da matriz D.

FIGURA 38 | 84
Grafo com o sistema de rede urbana existentes até ao ano de 1800, e as medidas de distribuição espacial

FIGURA 39 | 86
Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1945

FIGURA 40 | 87
Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1945 com identificação do grupo dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis, calculados a partir da matriz D

FIGURA 41 | 88
Grafo com o sistema de rede urbana existente até ao ano de 1945, e as medidas de distribuição espacial

FIGURA 42 | 89
Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1985

91 | FIGURA 43
Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 1985, com identificação do cluster dos lugares mais acessíveis e menos acessíveis, calculados a partir da matriz D

94 | FIGURA 44
Grafo com o sistema de rede urbana existente ao ano de 1985, e as medidas de distribuição espacial

96 | FIGURA 45
Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental em 2000

98 | FIGURA 50
Grafo do Plano Rodoviário de Portugal continental 2000 com identificação do cluster dos lugares mais e menos acessíveis calculados a partir da matriz D.

99 | FIGURA 51
Grafo com o sistema de rede urbana existente até ao ano de 2000, e as medidas de distribuição espacial

102 | FIGURA 52
Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede de Estradas Romanas, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L42 (direita).

107 | FIGURA 53
Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede de Itinerários 1800, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L31 (direita).

115 | FIGURA 54
Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN45, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L37 (direita).

116 | FIGURA 55
Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN85, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L35 (direita).

117 | FIGURA 56
Grafo dos lugares mais acessíveis da Rede do PRN2000, pela matriz D (esquerda) e pela matriz L26 (direita).

118 | FIGURA 57
Potencial de Interacção dos lugares da Rede do PRN45

119 | FIGURA 58
Potencial de Interacção dos lugares da Rede do PRN85

FIGURA 59 | 30
Potencial de Interacção dos lugares da Rede do PRN2000

FIGURA 60 | 49
Evolução das Propriedades 'Mundo pequeno, para a Rede de Estradas de Portugal continental

FIGURA 61 | 63
Grafo da Rede de estradas Romanas com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

FIGURA 62 | 67
Grafo da Rede de Itinerários de 1800, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

FIGURA 63 | 71
Grafo do PRN45, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

FIGURA 64 | 73
Grafo do PRN85, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

FIGURA 65 | 74
Grafo do PRN2000, com identificação dos lugares com mais grau de intermediação

FIGURA 66 | 78
Evolução dos índices estruturais e de conectividade das Redes de Estradas de Portugal continental

FIGURA 67 | 84
Medidas territoriais: lugares mais centrais e elipses de tendência, para os Grafos das redes de estradas, desde o período Romano ao PRN2000.

Índice de gráficos

GRÁFICO 1 | 30
Evolução das Propriedades 'Mundo pequeno, para a Rede de Estradas de Portugal continental

GRÁFICO 2 | 49
Evolução dos índices estruturais e de conectividade das Redes de Estradas de Portugal continental

Índice de tabelas

TABELA 1 | 30
Síntese dos Modelos de Interacção espacial em Geografia

TABELA 2 | 49
Quadro síntese de medidas de conectividade para exploração da topologia da rede de transportes

TABELA 3 | 63
Funções SIG utilizadas nas diferentes fases dos modelos sequenciais de transportes

TABELA 4 | 67
Métodos para georreferenciação de imagens

TABELA 5 | 71
Erro aproximado segundo a escala e o número de pontos de controlo

TABELA 6 | 73
Síntese do Métodos e processos de georreferenciação

TABELA 7 | 74
Módulos que estruturam o algoritmo utilizado

TABELA 8 | 78
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de conectividade C1
da rede de Estradas Romanas

TABELA 9 | 84
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de conectividade C42
da rede de Estradas Romanas

TABELA 10 | 86
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades T42
da rede de Estradas Romanas

TABELA 11 | 87
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades D
da rede de Estradas Romanas

TABELA 12 | 88
Comparação das hierarquias da rede de lugares, obtidas a partir das Matrizes C42, T42 e D da
rede de Estradas Romanas

91 | TABELA 13
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Itinerários, 1800

94 | TABELA 14
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário de 1945

96 | TABELA 15
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário nacional de 1985

98 | TABELA 16
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade D da rede de Estradas do Plano rodoviário nacional de 2000

99 | TABELA 17
Leitura comparativa dos lugares de maior acessibilidade pelas medidas territoriais e topológicas, desde os Romanos até ao PRN2000

102 | TABELA 18
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidades L42 da rede de Estradas Romanas

107 | TABELA 19
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L31 da rede de Itinerários, 1800

115 | TABELA 20
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L37 do PRN45 237

116 | TABELA 21
Comparação da hierarquia dos 7 lugares que estão simultaneamente entre os mais acessíveis, quer a partir da Matriz D, quer da Matriz L37, do PRN45

117 | TABELA 22
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L35 do PRN85 243

118 | TABELA 23
Comparação da hierarquia dos 4 lugares que estão simultaneamente entre os mais acessíveis, quer a partir da Matriz D, quer da Matriz L35, do PRN85

119 | TABELA 24
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz de acessibilidade L26 do PRN2000

119 | TABELA 25
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN45 256

TABELA 26 | 30
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN85

TABELA 27 | 49
Hierarquia da rede de lugares, a partir da Matriz P do PRN2000

TABELA 28 | 63
Medidas Mundo pequeno: Coeficiente de cluster's e Distâncias mais-curtas

TABELA 29 | 67
Lugares com maior grau de intermediação, segundo as Estradas Romanas

TABELA 30 | 71
Lugares com maior grau de intermediação, segundo Rede de Itinerários de 1800

TABELA 31 | 73
Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN45

TABELA 32 | 74
Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN85

TABELA 33 | 78
Lugares com maior grau de intermediação, segundo o PRN2000

TABELA 34 | 84
Valores das medidas estruturais e de conectividade para as Redes de estradas de Portugal continental.

TABELA 35 | 86
Lugares com maiores índices das medidas acessibilidade e centralidade para as Redes de estradas de Portugal continental.

TABELA 36 | 87
Leitura comparativa dos lugares de maior acessibilidade pelas medidas territoriais e topológicas, desde os Romanos até ao PRN2000

Capítulo 1
Introdução

1.1 ENQUADRAMENTO

As redes são omnipresentes nas nossas vidas (Barabási, 2003). Desde as redes sociais, as redes empresariais, as redes de internet até às redes físicas, como as redes rodoviárias e ferroviárias, as redes constituem uma forma universal de representar diversos fenómenos da realidade, com ou sem expressão espacial.

Do ponto de vista geográfico, são as redes de transporte, e a sua relação com o território, as redes que são objecto de estudo desta dissertação. Conscientes de que o desenvolvimento das redes de transporte ampliam a difusão do conhecimento, e consequentemente proporcionam o desenvolvimento das sociedades (Ascher, 2001), os geógrafos sempre procuraram formas para determinar as influências e medir o efeito que estas exercem sobre no território, tanto ao nível da organização social e económica, como ao nível da organização espacial e do ambiente.

Desde que Ullman (1954) elegeu, no seu artigo "Geography as Spatial Interaction[1]", os transportes como o instrumento preferencial para interagir com o Meio (Black, 2003), que muitos cientistas têm dedicado os seus estudos aos transportes e aos processos resultantes. Contudo, só a partir da década de 1960 (Kansky, 1963), é que os geógrafos dão mostras de maior interesse no estudo acerca da estrutura das redes de transporte, e sua implicação no território, a partir de uma base matemática.

1 William Black, no seu livro "Transportation. A Geography Analysis", aponta este artigo de Ullman como o ponto de partida para a criação em Geografia, dum novo ramo de interesse dedicado à investigação sobre os transportes: A Geografia dos Transportes. "Ullman saw the field of transport geography as the definitive center of the field of geography. He believed that it was the manner in which humans interact with their world – their spatial interaction – that defined the field." (2003:4)

Apesar de estimulantes e úteis do ponto de vista teórico estes estudos não tiveram continuidade, quer devido a um limitado acesso à informação e rudimentares recursos computacionais, quer devido a um desinteresse dos geógrafos que preteriram esta temática por outros tópicos e outras metodologias (Gastner e Newman, 2006).

Só mais recentemente (década de 1990), e por iniciativa dos físicos, é que os modelos de análise de redes são retomados (Newman, 2003), e dos quais resultou uma nova forma de estudar e perspectivar o mundo, a que alguns autores (Dorogovtsev e Mendes, 2003; Barabási, 2003: 6-8; Bersini, 2005) designaram de Ciência das Redes Complexas.

Uma das teorias mais populares da Ciência das Redes Complexas é a teoria do *Mundo pequeno*, também conhecida pela teoria dos 'seis graus de separação' e que, de uma forma geral, significa que uma pessoa está, em média, ligada a qualquer outra pessoa no mundo, por intermédio de apenas seis pessoas (Watts, 2004).

Apesar de haver um consenso no mundo científico sobre o quanto esta é uma ciência promissora (Watts e Strogatz, 1998; Barabási, 2003; Dorgovtsev e Mendes, 2003; Bersini, 2005), da perspectiva daqueles que se dedicam ao estudo das redes geográficas (como as redes rodoviárias e as redes ferroviárias), as teorias das Redes Complexas estavam a esquecer-se de uma variável fundamental: a variável espaço, ou seja, os arcos e os nós das redes não têm qualquer referência espacial; localizam-se num espaço abstracto, não obstante serem redes reais com implantação no território, ignorando assim o facto de a sua disposição espacial poder influenciar a sua estrutura e vice-versa (Gastner e Newman, 2006; Batty, 2001). Este é um problema de análise, que o modelo *geo*_grafo proposto nesta dissertação procurou dar uma contribuição para a sua resolução (cf. cap. 5).

As redes de transporte são as redes que mais influência exercem sobre o território (Taylor, 2004), mais precisamente sobre a forma com o território está organizado e as suas componentes se articulam e se relacionam, conforme o provam o crescente número de publicações (livros, artigos em revistas e jornais, artigos nas actas das conferências, entre outros) sobre elas, e em que se pode verificar a existência de modelos de base matemática, mas com uma componente geográfica, a serem propostos (Dominique, 1998; Zan, 1998; O'Sullivan, 2000; Batty, 2001; Newman, 2003; Gorman, 2003; Kuby *et al*, 2005; Gastner e Newman, 2006; Jiang, 2006; Xu, 2007).

A acção do Homem sobre o território é algo inato, um reflexo biológico, se considerarmos o Homem como um organismo, o mais poderoso, no que respeita à capacidade de modificar o funcionamento dos ecossistemas (Odum, 1988). Todavia, esta relação do Homem com o território não é unidireccional. Na verdade, trata-se sobretudo duma inter-relação, na qual o Homem transforma o território, quer por um acto de intuição natural, quer por necessidade adaptativa, e o território molda o Homem, quer condicionando as suas acções, quer definindo o seu modo de vida. Desta relação, resultam dois tipos de interacções: as interacções positivas e as interacções negativas. As interacções positivas, vistas na óptica das teorias actuais, são

o que se designa por ordenamento do território[2], enquanto as interacções negativas, são o seu oposto, isto é, podem ser interpretadas como estados de desequilíbrio, de desordem e consequentemente de instabilidade entre os fenómenos que constituem o território, enquanto sistema complexo.

Para se poderem travar estes resultados negativos e potenciar os positivos, já não basta o exercício do ordenamento assente numa metodologia baseada no desenho de um conjunto de ideias fraccionadas, sob a forma de mapas. A modelação, a análise inter-sistémica e holística - suportada por métodos evoluídos na gestão da informação e análise espacial -, e a computação constituem as componentes metodológicas.

A modelação e a geocomputação são a fundação para o desenvolvimento de novas teorias e para a compreensão das actuais e futuras realidades territoriais (Wilson, 2000). Os modelos podem ser informais (verbais) ou formais (matemáticos e estatísticos), conceptuais (descritivos) e físicos (analíticos e de simulação); mas implicam sempre o 'saber fazer'.

Esta dissertação é de teor dominantemente metodológico e resulta de uma investigação teórica e aplicada, orientada para o ordenamento do território. Mais especificamente, esta dissertação tem dois objectivos fundamentais: 1) criar um modelo que sirva de instrumento aos analistas, concedendo-lhes as métricas necessárias à fundamentação científica dos seus conceitos, ideias e teses e contribuir para a literatura de referência, incrementado a discussão acerca das características das redes em geral, e do papel das redes de transporte no território, em particular no domínio da Geografia; e 2) constituir-se como um instrumento de apoio à tomada de decisão dos agentes que intervêm no território.

Tal como tem sido defendido (Haggett e Chorley, 1967, 1969; Dalton, 1973; Worboys, 1998; Fotheringham, 1999, 2002; Wilson, 2000; Haggett, 2001; Gaspar, 1981), o recurso aos modelos em ciência é uma obrigatoriedade, e é tão fundamental quanto o conhecimento teórico dos factos. Quer a nível do ensino, quer ao nível da investigação, os modelos constituem instrumentos para a exploração e criação de conhecimento.

Da leitura da bibliografia da especialidade podemos encontrar dois tipos de situações:

- As situações denominador-comum – apresentação da tese de que as redes de transportes são identificadas frequentemente como causa estruturante da configuração territorial (Haggett; Chorley, 1969), fruto das transformações que induzem no espaço e na distribuição das actividades humanas (Kansky, 1963; Peters, 1998);
- As situações desviantes – aquelas cuja manifestação se verificam a dois níveis diferentes:

2 A Carta Europeia do Ordenamento do Território define ordenamento do território como "*... a expressão espacial das políticas económica, social, cultural e ecológica de toda a sociedade. Ele é simultaneamente uma disciplina científica, uma técnica administrativa e uma política concebida como uma aproximação interdisciplinar e global tendente ao desenvolvimento equilibrado das regiões e à organização física do espaço segundo uma concepção directora*" (CONSELHO DA EUROPA, 1984:6).

1. Ao nível do tipo de abordagem ao tema - trabalhos de índole analítica, com um teor mais descritivo e histórico (Cortesão, 1964; Matos, 1980; Santa-Rita, 2006) e também monográfico (Alegria, 1990) e trabalhos de natureza teórica e quantitativa e assumidamente metodológica (Garrison, 1960; Nystuen e Dacey, 1961; Garrison e Marble, 1961; Kansky, 1963; Morril, 1965; Chorley e Haggett, 1969; Gould, 1991; Pumain, 1996; Gorman e Kulkarni, 2003; Gastner e Newman, 2006; etc.);
2. Ao nível do método e da técnica - que oscila entre trabalhos baseados em métodos clássicos, de características determinísticas e técnicas pouco evoluídas do ponto de vista da capacidade de análise da informação (Taaffe *et al*, 1963); e trabalhos apoiados em modelos e teorias mais evoluídas, como os da complexidade (Wilson, 2000; Strogatz, 2001; Watts, 2004), suportados por uma tecnologia computacional robusta que lhes proporciona vantagens analíticas e de simulação.

Nos trabalhos de natureza metodológica, os estudos das redes de transporte focam-se sobretudo na análise estrutural da rede e da caracterização das suas componentes (arcos e nós) de forma individual, com recurso à topologia das métricas da Teoria dos Grafos. Haggett e Chorley, no seu livro "Network Analysis in Geography" (1969), assim como mais recentemente Potrykowski e Taylor, na publicação "Geografía del Transporte", (1982) fazem uma muito boa síntese dos vários trabalhos realizados no domínio da Geografia das redes de transporte, como recurso à Teoria dos Grafos, a saber:

- Taaffe, Morrill, e Gould (1963), conduziram um estudo, a partir do qual propuseram um modelo de análise do processo de desenvolvimento da rede de transportes de países subdesenvolvidos. Segundo os autores concluíram, o processo de desenvolvimento decorre em quatro fases temporais e espaciais (fase inicial, fase local e de diferenciação nodal, fase de interconexão nodal e uma fase regional e de diferenciação nodal), a partir da linha de costa e em direcção ao interior.
- Garrison e Marble (1962) fazem um relato das experiências efectuadas nas suas tentativas de conceber um modelo de simulação topológica do crescimento da rede de transportes da Irlanda do Norte de 1830 a 1930, através dos métodos do modelo Monte Carlo[3];
- Morrill (1965), por sua vez, relatava uns estudos paralelos acerca da rede ferroviária da Suécia.

Todavia, estes modelos pecavam sobretudo pela abordagem demasiado simples face à maior complexidade da realidade, e falhavam na incorporação de regras menos intuitivas e mais estocásticas nos modelos, o que implicava a adopção de algoritmos matemáticos para a modelação de fenómenos geográficos (Wilson, 2000) para que possa englobar, quer as transformações das redes de transportes, quer as transformações espaciais.

3 Método de simulação de comportamentos sistémicos mediante um conjunto de variáveis de input que denotam incerteza e aleatoriedade comportamental. Trata-se de um método de estatística matemática não linear (uma vez que combina dados de input com medidas obtidas de processos matemáticos feitos sobre elas), não-determinísticos (é estocástico). Foram responsáveis pelo desenvolvimento deste método, Stanislaw Ulam e John von Newmann, no decurso da segunda metade da década de 1940.

Foi ao abrigo da teoria da complexidade[4], que foram surgindo neste final do século XX e início do século XXI (consequência da evolução na cibernética e nas tecnologias) novos e mais evoluídos métodos e técnicas para análise de sistemas complexos, que vieram permitir a inclusão da dimensão tempo como factor endógeno dos processos transformativos (Batty, 2005), como sejam as Redes Complexas (Newman, 2003; Xu, 2007).

À medida que as redes de transportes sofrem processos transformativos sobre o território, também as suas topologias se vão alterando, assim como o território, quanto à forma como está organizado. Esta relação de causa e consequência entre as redes de transportes e o território levantam uma série de questões, que materializam o *core* desta dissertação e que passa por medir e avaliar quantitativamente e qualitativamente, a forma como a dinâmica das redes de transporte influencia a organização do território? Como se manifesta essa influência em termos de padrões espaciais? Quais os métodos utilizados para medir essa influência? Como construir e desenvolver os modelos que operacionalizem esses métodos? Que informação deve ser utilizada e que processos devem ser alvo para poder integrar os modelos? Qual a importância do factor espaço na análise de redes? Como se devem disponibilizar os resultados?

1.2 OBJECTIVOS

O que se propõe com esta dissertação e cujos resultados se analisam no capítulo 6, é medir e avaliar o impacto da rede de transportes no território, pela óptica da organização espacial, do desenvolvimento regional e da hierarquia da rede de lugares. Para atingir esta pretensão, foi necessário definir etapas com objectivos mais práticos, nomeadamente a criação de um modelo (modelo SIG-T) que englobasse os algoritmos das medidas da Teoria dos Grafos e das Redes Complexas, e as combinasse com algumas funcionalidades dos SIG, tais como as funções de vectorização, georreferenciação e a possibilidade de estabelecer uma relação entre a base de dados gráfica e a base de dados alfanumérica.

É neste enquadramento científico e técnico que se desenvolve esta dissertação, com a conceptualização, criação e aplicação de um modelo geográfico de base matemática, formulado a partir da Teoria dos Grafos e das Redes Complexas, de forma a aproveitar as potencialidades de ambos os métodos e a eliminar as suas fragilidades, a saber:

- Com a Teoria dos Grafos, o objectivo é aproveitar a capacidade descritiva das suas métricas acerca, quer da estrutura geral e interna da rede, quer da ordem que impõe aos nós que a compõem e compensar com os SIG, a sua abstracção espacial;
- Com as Redes Complexas, o objectivo é verificar se as propriedades decorrentes das teorias *Mundo pequeno* e coeficiente de *clustering* também se manifestam nas

4 Diz-se que um sistema é complexo quando, a soma das componentes que o constituem, organizados em estruturas que podem existir em diversas escalas, não podem explicar o todo. Estes sistemas passam por processos de transformação que não são passíveis de ser descritos por uma única regra, ou seja, não podem ser reduzidos a um único nível de explanação.

redes geográficas (como as redes rodoviárias) e que permitem caracterizar a rede acerca da sua robustez, da facilidade de circulação (pessoas, bens, informação, ideias) que proporcionam e a identificação dos nós com maior grau de intermediação.

1.3 OPÇÕES METODOLÓGICAS

De uma forma mais pormenorizada, para a análise das propriedades que decorrem das redes de transportes, e dos seus nós e arcos, fez-se uso, quer das medidas de conectividade e de ligação, quer das medidas de acessibilidade e de centralidade, respectivamente, no que respeita à Teoria dos Grafos (cf. Cap. 2). Sobre as medidas de acessibilidade e de centralidade, para medir a acessibilidade individual dos nós, assim como para medir a acessibilidade geral da rede, o cálculo de matrizes foi o formalismo matemático consignado, que para além das medidas de acessibilidade e de centralidade, vai pôr em evidência também outras características e propriedades das redes, tais como: a eficácia da rede (cf. 6.4) e o potencial de interacção que exercem uns nós (lugares) sobre os outros, em função da distância que os separa e da população que comporta (cf. 6.3.).

Existem vários tipos de matrizes (matrizes de conectividade, de acessibilidade e ponderadas) para analisar a rede individualmente, do ponto de vista das suas componentes. Contudo, são as matrizes D (das distâncias topológicas mais curtas) e L (das distâncias físicas mais curtas), as que melhor adequação mostram para o estabelecimento de uma hierarquia de lugares, e para a verificação dos padrões espaciais que se formam ao longo do tempo, e à medida que ocorrem alterações na estrutura e nas relações nas redes.

Todavia, entre as duas matrizes (D e L) existem diferenças que importa assinalar. Enquanto a matriz D assume que todas as ligações entre os nós têm igual valor no cálculo da medida de acessibilidade, ou seja, que os resultados apurados pela matriz D não fazem distinção, entre a diferente influência que podem ter na ordenação dos lugares e no padrão espacial desses lugares, a estrada Lisboa/Queluz e a estrada Lisboa/Porto. A matriz L, das distâncias físicas, por sua vez, já é sensível à existência, tanto de pequenas, como de grandes ligações atribuindo-lhes ponderações diferentes, o que permite medir a influência de cada ligação (estrada) na ordenação dos lugares de acordo com a sua acessibilidade na rede. Assim, tem-se dois métodos de abordagem diferente para análise de redes e seu efeito na organização espacial: no primeiro caso trata-se de um modelo em que o espaço é considerado como isotrópico (modelo isotrópico, cf. Cap. 6.1.) e no segundo caso, do modelo contempla um espaço anisotrópico (modelo anisotrópico, cf. Cap. 6.2.).

Por fim, no que respeita ao objecto de estudo, as redes geográficas (Brunnet, 1996) das rodovias e as suas antecessoras, as estradas e os itinerários foram as estruturas viárias escolhidas para alimentar o modelo, a saber: as Estradas Romanas (itinerário Antonino, século III d.C.), as Estradas (itinerários de 1800) do período do pré-

fontismo, as Estradas do primeiro Plano rodoviário (1945), e as Estradas do segundo (1985) e terceiro Plano Rodoviário Nacional (2000), das quais se obtiveram, por via do modelo criado (cf. Cap. 5) os resultados que se analisam (cf. Cap. 6) e através dos quais se procuram as causas que possam responder às questões que se colocaram nesta dissertação.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação estrutura-se em sete capítulos. Os capítulos 1, 2, 3 e 4 são sobretudo de teor teórico e descritivo, e dedicam-se respectivamente à apresentação da tese, à dissertação sobre o estado da arte, à análise de conceitos e respectivas definições, e à apreciação crítica acerca dos modelos e métodos testados. Os capítulos 5 e 6, de teor computacional e empírico, é onde se vai demonstrar a aderência do modelo *geo*_grafo criado à modelação com dados geográficos, e se faz a implementação do modelo e analisam-se os resultados. Por fim, no capítulo 7 apresentam-se as considerações finais em que se procura responder acerca da relevância dos resultados devolvidos pelo modelo *geo*_grafo, e se tecem algumas críticas ao modelo e apontam possíveis desenvolvimentos futuros.

De uma forma mais pormenorizada, no capítulo 1 – Introdução – trata-se de proporcionar ao leitor um enquadramento temático que explique a pertinência da dissertação, exponha as questões que se colocam e que a dissertação propõe responder. É neste capítulo que se declaram as opções metodológicas consideradas e os métodos seleccionados e criados, assim como o objecto de estudo que alimenta o modelo. Em síntese, o capítulo da introdução funciona como um guião da dissertação, no qual se apresenta a estrutura da dissertação e o conteúdo de cada capítulo.

O capítulo 2 – Teoria dos Grafos – trata de apresentar e explicar a pertinência do formalismo das medidas de conectividade e de ligação e das medidas de acessibilidade e de centralidade, na análise das redes de transporte. Daqui decorreram um conjunto de questões que ajudaram a estruturar este capítulo em 5 pontos, a saber: Como surgiu a Teoria dos grafos? Por quais conceitos e definições se rege? Para que serve e que áreas científicas e domínios do conhecimento toca? Como surgiu e se desenvolveu a Teoria dos grafos no seio das ciências geográficas? Que métricas e formalismo matemático incorpora e que teorias se desenvolveram paralelamente a ela e como se podem adaptar?

É a partir desta última questão, que se estabelece a ligação para o capítulo 3 – Redes Complexas -, cujos modelos empíricos que engloba consideram-se fundamentais para uma geografia das redes, e cujas questões que se propõe responder levou à estruturação do capítulo nos seguintes pontos: Como surgiu esta nova ciência designada de Redes Complexas? Quais os principais precursores destas redes? Que modelos e que teorias incorpora? Que propriedades das redes revela e que os métodos clássicos não conseguiam identificar? E que implicação e aplicação tem em Geografia?

O capítulo 4 – sobre Os Sistemas de Informação Geográfica para Transportes (SIG-T) – marca o fim dos capítulos de teor mais teórico, e estabelece a ligação com os capítulos de conteúdo dominantemente computacional e carácter aplicativo. Trata-se de um capítulo sobre a tecnologia, e sobre a importância que veio desempenhar nos estudos dos transportes e na relação dos transportes com o território. Uma vez mais, é a partir de uma série de questões que o capítulo pretende dar resposta, que se definiu a estrutura do capítulo, nomeadamente: Qual a origem e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T? O que se entende por SIG-T? De onde surge a relação entre os SIG, os transportes e o território? Que tipo de modelos existem? Que implicações ao nível da análise de redes rodoviárias? Quais os modelos SIG-T mais praticados e principais aplicações e tendências futuras dos SIG-T?

O capítulo 5 - Modelo para análise do efeito estruturante das redes de transportes e comunicação no território – é o capítulo da dissertação e é de teor geocomputacional. É nele em que se cria e implementa o modelo para medir o efeito estruturante das redes de transporte sobre no território, e a partir do qual se podem obter respostas objectivas, quer de índole quantitativa, quer de índole qualitativa. À parte do objectivo principal, o modelo SIG-T criado (modelo *geo_grafo*) vem permitir a representação e uma melhor compreensão da relação entre os sistemas de transporte e o território, cuja escala ou complexidade da rede poderiam, de outra forma, colocá-los fora do nosso alcance de compreensão. Trata-se de um modelo geográfico - no que respeita ao seu objecto de estudo e natureza aplicativa -, de base matemática, formulado e compilado para correr num ambiente SIG, ou seja, programaram-se os algoritmos, para serem aplicados a qualquer conjunto de dados geográficos topológicos e georreferenciados, mediante a criação de uma aplicação *plugin*, hospedado num *programa* SIG.

Quanto à sua estrutura organizativa, o capítulo 5 desenvolve-se em cinco pontos: os três primeiros pontos do capítulo tratam, respectivamente, da apresentação e da introdução do modelo e referem-se a conceitos fundamentais de modelo e da modelação, sobretudo em Geografia; da conceptualização do modelo e das questões relacionadas com a informação necessária ao modelo, nomeadamente no que se refere à aquisição, à edição e estrutura de dados topológicos.

Os dois últimos pontos tratam da implementação do modelo e propõem-se responder às seguintes questões: Como se arquitecta o modelo? Como funciona o modelo? De que forma o modelo responde às acções que ordenamos? e, como é possível aceder ao modelo e dar início ao seu processamento? Esta última questão levou à construção de um *plugin* (botão a partir do qual se pode accionar o modelo, sem ter de se aceder ao interface da linguagem de programação (LP) do *Visual Basic for Applications* (*VBA*), de forma a proporcionar ao utilizador menos experiente em programação, a aceder ao modelo a partir de um Interface gráfico do utilizador (IGU), mais 'amigável'. O *plugin* "encobre" os procedimentos codificados no modelo *geo*_grafo.

O capítulo 6, de Análise dos Resultados, é onde estão expostos os valores devolvidos pelo modelo e são dadas as respostas às questões que compõem a tese que intitula

esta dissertação: Qual o efeito estruturante das redes de transporte (das suas alterações no decurso do tempo) no território, ou seja, como se relacionam os lugares e distribuem no território. Em pormenor, é no capítulo 6 que:

- Se testam e validam as hipóteses colocadas ao longo das várias etapas do projecto;
- Se cria, constrói, se parametriza, e se verifica da pertinência do modelo, e dos métodos, à realidade;
- Se testa e avalia da capacidade computacional (*hardware* e *software*);
- Se cria conhecimento, com a descoberta de padrões (espaciais e métricos) revelados pelas propriedades das redes; e
- Se responde à tese proposta.

Por fim, o capítulo 7 – Considerações finais – procura responder à questão: Que relevância apresentam os resultados da dissertação? A resposta a esta questão estruturou o capítulo em dois pontos: um sobre a aderência do modelo e dos resultados à análise geográfica; e outro sobre as oportunidades que se colocam de desenvolvimento do modelo, quanto à possibilidade de difusão da sua utilização, e quanto à possibilidade de incorporação de novas funcionalidades. O último parágrafo é dedicado a uma análise auto-crítica da dissertação, sobre algumas dos critérios e decisões tomados.

Capítulo 2
Teoria dos Grafos

A Teoria dos Grafos é um ramo da matemática que estuda a topologia das redes, e que demonstrou ser um valioso método de análise de situações em que os fenómenos em causa estabelecem relações entre si (Tobler, 1970). Como tudo está relacionado com tudo, e nada acontece de forma isolada (Barabási, 2003:7), a Teoria dos Grafos depressa adquiriu privilégios para lá das fronteiras da matemática, passando a constituir um método fundamental nos estudos de outras ciências e.g. Física, Química, Electrotecnia, Informática, Economia, Geografia, Sociologia, Biologia, Linguística, etc., para as quais as propriedades acerca da estrutura e das componentes das redes (nós e arcos) são fundamentais à compreensão da dinâmica de sistemas, sejam eles reais ou abstractos, simples ou complexos (Kansky, 1989; Sui, 2004, Jiang, 2006).

O matemático suíço Leonhard Euler (1736), e o Problema das 7 pontes de Königsberg[5] marcam a origem da Teoria dos Grafos. Contudo, não deixa de haver algumas vozes desalinhantes, conforme se pode testemunhar a partir de Haggett e Chorley: "…the first comprehensive treatment of network topology was not published until 1936 in König's *Theorie der endlichen und unendlichen Graphen*. The branch of topology dealing with elementary structure, which came to be called *graph theory*…" (1969:6).

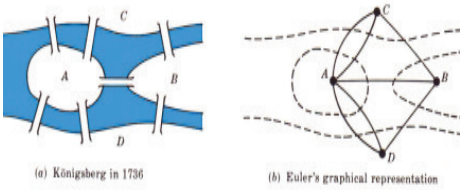
Não obstante, a maioria dos especialistas reconhece no trabalho de Leonhard Euler[6] (1707-1783) a génese da Teoria dos Grafos (Figura 1).

5 O documento de Euler abordava um problema que intrigava a população de Königsberg (actual Kaliningrado): o chamado problema das 7 pontes de Königsberg, sobre o Rio Pregel (cf. Fig. 1).

6 Para mais informações sobre a vida e obra de Leonard Euler, ver: http://www.educ.fc.ul.pt/docentes/opombo/seminario/euler/biografia.ht

FIGURA 1 AS 7 PONTES SOBRE O RIO PREGEL

FIGURA 2 GRAFO EULERIANO



Adaptado de Gribkovskaia et al (2007)

O problema centrava-se na seguinte questão: seria possível percorrer toda a cidade, passando por cima das 7 pontes sem repetir nenhuma delas? Da variedade de respostas que foram surgindo, o formalismo de Euler destacou-se pela simplicidade. O modelo de Euler consistia na representação abstracta dos territórios em nós, e das pontes que os ligavam em arcos. Desta forma, Euler representou o território sob a forma de um diagrama, que veio a designar-se por grafo (Figura 2), que é consensualmente identificado como o estudo que está na génese da Teoria dos Grafos.

Com este grafo, Euler demonstrou que um caminho contínuo, que passe por todas as pontes terá, obrigatoriamente, de ter apenas um nó de partida e um nó de chegada (caminho euleriano[7]). Tal caminho não está representado num grafo que tenha mais do que dois nós ligados por um número ímpar de arcos, como é o caso do grafo dos 4 nós e dos 7 arcos de Königsberg. O primeiro teste à teoria do virtuosismo prático surgiu 150 anos mais tarde (1875), quando se construiu uma nova ponte sobre o rio Pregel, dando-se razão a Euler e reconhecendo mérito à sua teoria.

7 Primeiro teorema da Teoria dos grafos.

Para além da resolução do problema, o artigo de Euler teve ainda o mérito de fazer perdurar até à actualidade dois pilares da Teoria dos Grafos: a definição mais genérica e informal de grafo e a descoberta de algumas das propriedades topológicas das redes. De um e de outro, tratar-se-á nos pontos seguintes deste capítulo, tentando clarificar algumas questões-chave acerca da Teoria dos Grafos, nomeadamente: que conceitos e definições a Teoria dos Grafos incorpora? Para que serve e que áreas científicas e domínios do conhecimento toca? Que métricas e que formalismo matemático incorpora? Que teorias se desenvolveram paralelamente à Teoria dos Grafos e como se podem adaptar? Que propriedades encerram as redes e que os grafos permitem mostrar? e como surgiu e se desenvolveu a Teoria dos Grafos no seio das ciências geográficas.

2.1. CONCEITOS E DEFINIÇÕES

A pertinência de um sub-capítulo sobre conceitos e definições numa dissertação de cariz metodológico mede-se pela necessidade em clarificar um conjunto de termos que, quer devido à difusa literatura sobre a temática em vários domínios científicos e técnicos - de que resulta falta de consenso no uso dos termos -, quer ao rigor que se quer imprimir, permitem garantir coerência e evitar ambiguidades. Não se pretende fazer aqui uma análise exaustiva sobre toda a terminologia da Teoria dos Grafos; pelo contrário, esta será uma abordagem orientada apenas para os conceitos que se consideram fundamentais para a compreensão da Teoria dos Grafos e para a importância que têm neste estudo. Também vamos explicitar os termos que são aqui usados e que são considerados indispensáveis para o correcto entendimento desta dissertação.

Vários autores têm advertido para a existência de uma certa incoerência no uso dos termos, assim como uma certa leviandade na terminologia utilizada. Haggett e Chorley sublinham que "One of the complications in applying graph theory to the analysis of network structure is the very confused and overlapping terminology. Lines are commonly referred to as 'links', 'edges', 'sides', 'arcs', 'segments', 'branches', 'routes' or 'one-cells'; while points are described as 'nodes', 'vertices', 'junctions', 'intersections', 'terminals' or 'zero-cells' (…) Terms are often restricted to a particular applied field (e.g., in the medical literature links and nodes become 'neurons' and 'synapses') …" (Haggett e Chorley, 1969:6); Wilson, por seu lado, dedica mesmo um sub-capítulo a estas questões ("Remark on terminology"), na sua obra "Introduction to graph theory", onde explícita que: "The language of graph theory is decidedly non-standard – every author has his own terminology." (1972:10), ou ainda no caso de Thomas, que admite, que ao longo da sua obra, os termos "graph and network, vertice and node, as well edge and link will here be used interchangeably." (Wilson, 2002:293).

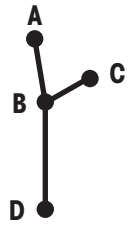
Também Taaffe e Gauthier referem em nota de rodapé a fácil confusão que é feita no uso de termos, alertando o leitor para o facto de que "Technically the terms vertices and nodes are used to refer to abstract networks, whereas the terms node and linkage refer to a real-world network before it is abstracted. This distinction is difficult to

follow in practice. Vertices and nodes, and edges and links, will be used interchangeably…" (Taaffe e Gauthier, 1973:101). Mais críticos no que se diz respeito à análise de redes em geografia, são Dalton, Garlick, Minshull e Robinson[8] que advertem para o facto de os investigadores se contradizerem e introduzirem grandes ambiguidades quando utilizam diferentes termos para as mesmas técnicas. "The extreme case is that of the technique referred to as the route shape index (…), which is called the degree of circuit by Kansky, the detour index by Cole & King, the index of directness by Tidswell & Baker in one place, and the index of accessibility by them a few pages later…" (Dalton *et al*, 1973:4).

Para esta problemática contribui também o facto da Teoria dos Grafos, desde Euler até à actualidade, ter deixado de ser estudada e aplicada exclusivamente na Matemática, para ser adoptada por outros domínios científicos, nomeadamente, nas ciências sociais e humanas. Com efeito, verifica-se uma proporcionalidade entre a dispersão do tema por mais e diversos domínios científicos, e o aumento de 'ruído' em torno do tema, de que resulta muitas das vezes numa visão enviesada e deturpada do original (Watts, 2003:28).

No entanto, aceita-se que entre as várias definições provenientes de vários domínios científicos e técnicos, com maior ou menor formalismo matemático, existe um denominador comum no que concerne o entendimento que se tem de grafo (G): dois pares de conjuntos. Um conjunto finito e não-vazio composto por nós N (G) ligados entre si por um conjunto pré-definido de arcos A (G). Formalmente descrito como G = (N, A).

FIGURA 3 GRAFO (G), DOS NÓS N={A, B, C, D}, LIGADOS PELOS ARCOS A=[{A,B}, {B,C}, {B,D}]



De um ponto de vista gráfico, um grafo é um diagrama representado por um conjunto de pontos (que de agora em diante serão chamados de nós) ligados por segmentos (de agora em diante chamados de arcos); uma representação abstracta de uma rede, em que os conceitos de localização, distância, comprimento, orientação e forma são substituídas por propriedades topológicas (cf. 2.3), tais como: acessibilidade, centralidade, adjacência, conectividade e ligação, e, a partir das quais, mediante algoritmos e o cálculo de matrizes é possível estudar as suas componentes (nós e arcos) e

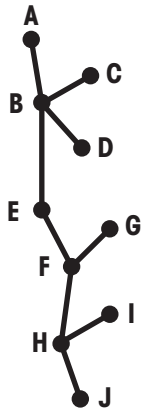
8 Dalton, R.; Garlick, J.; Minshull, R.; Robinson, A. (1973) – Networks in Geography. Modern Techniques in Geography. London. Philip, pp. 60

hierarquizá-las, ou estudar a rede no seu todo, respectivamente. Embora, quando se olha para um grafo, haja uma primeira preocupação para se entender a disposição dos nós e dos arcos que os ligam, a verdade é que nada disso é realmente importante na Teoria dos Grafos. O que realmente importa são as ligações ou conexões entre os nós. É a topologia que sobreleva, não a geografia.

Quanto à sua topologia, um grafo pode ser classificado segundo diferentes conceitos, e.g. simples, gerais, nulo, desconexo, completo, em árvore, floresta, regular, irregular, platónico, bipartido, infinito, isomórfico, orientado, não-orientado, … (Haggett e Chorley, 1967; Wilson, 1972; Taaffe e Gauthier, 1973; Dalton et al, 1973; Potrykowski e Taylor, 1984; Tucker, 2001; Black, 2003). As classificações são inúmeras e por vezes com definições pouco claras.

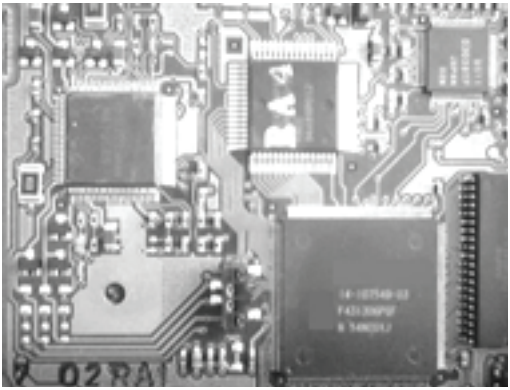
Dependendo da aplicação, os grafos podem ser direccionados ou orientados, e nesse caso os arcos são representadas por "setas". Se forem não-direccionados ou não-orientados (cf. Figura 4) os arcos são representados apenas por segmentos, sem qualquer indicação de sentido, o que pressupõe a possibilidade de existência de fluxos em ambos os sentidos.

FIGURA 4 GRAFO NÃO-ORIENTADO



Os grafos podem ainda ser classificados como sendo grafos planares ou grafos não-planares. Dizem-se planares, os grafos cujos arcos que se cruzaram formam necessariamente um nó, i.e., não pode haver cruzamento de arcos sem que um nó seja constituído na rede. Quando é permitido o cruzamento de arcos sem que se constitua um nó na rede, diz-se que se está na presença de um grafo não-planar. É exemplo de um grafo planar, a rede de rodovias que ligam as cidades de uma dada região ou país, assim como, para não nos restringirmos apenas a exemplos de fenómenos espaciais, a rede microeléctrica de um circuito integrado - chip (Figura 5).

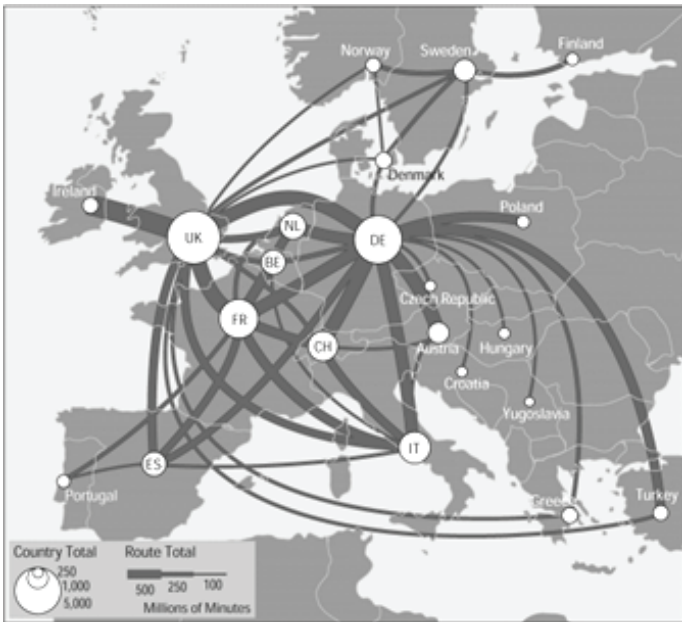
FIGURA 5 GRAFO PLANAR (CHIP)



Fonte: http://pt.wikipedia.org/wiki/Imagem:HD%27sMainBoard.JPG#file.

Como exemplo de um grafo não-planar podemos referir a rede de tráfego aéreo de uma qualquer companhia de aviação ou a rede de tráfego na internet (Figura 6).

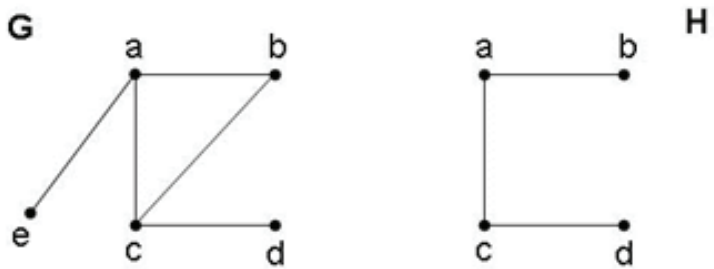
FIGURA 6 GRAFO NÃO-PLANAR, COM O FLUXO DE TRÁFEGO EUROPEU NA INTERNET, 1997



TeleGeography, Inc.,

Por sub-grafo de um qualquer grafo entende-se um sub-conjunto de nós e arcos do grafo, ou seja, graficamente, tem-se dois grafos. Mas como esses dois grafos são parte da mesma rede, então está-se na presença de um sub-grafo do grafo principal. Formalmente define-se que um grafo H é um sub-grafo de um grafo G se, $N_H \subseteq N_G$ e $A_H \subseteq A_G$, sendo N os nós e A os arcos do grafo, respectivamente (Figura 7).

FIGURA 7 SUB-GRAFO H, DO GRAFO G



Um claro exemplo deste caso é a rede de estradas de Portugal. No seu conjunto é um grafo, composto no entanto por vários sub-grafos. O sub-grafo da rede de estradas de Portugal continental e os sub-grafos da rede de estradas das várias ilhas que compõem os arquipélagos da Madeira e dos Açores, que por força da insularidade, e apesar de pertencerem à mesma rede de estradas, não têm uma ligação entre elas. No entanto, qualquer grafo é simultaneamente também um sub-grafo de si próprio. Este conceito é particularmente importante, por constituir variável de algumas das medidas topológicas, com o propósito de medir e avaliar a estrutura da rede (tabela 2, em Anexo).

Um grafo diz-se regular, no caso de todos os nós do grafo terem o mesmo número de arcos a confluir para si (grau de acessibilidade do nó). Este conceito e esta medida são de extrema utilidade, por exemplo numa análise ao grau de vulnerabilidade da rede (cf. Cap. 6). Saber identificar qual o arco e o(s) nó(s) que no caso de 'falha' ou 'desaparecimento', têm como consequência a quebra do grafo e interrupção de quaisquer tipos de fluxos. No caso de não existir o mesmo grau de acessibilidade para todos os nós do grafo, diz-se então que o grafo é irregular. Outros conceitos que importa explicitar no âmbito do tipo de análise desenvolvida para esta dissertação são:

- **Distância topológica** – distância medida entre dois ou mais nós, através do número de arcos que os separam.
- **Conectividade** – significa a existência ou não de ligação entre quaisquer locais. Na geografia dos transportes é um indicador fundamental da estruturação e valorização do espaço.

- **Acessibilidade** – consiste na possibilidade de se poder aceder a um local, ou conjunto de locais. Está fortemente dependente da conectividade, sendo que a acessibilidade é função da cobertura do território por infra-estruturas de transporte, e é tanto maior quanto maior a permeabilidade do território à rede de infra-estruturas. É, tal como a conectividade, um indicador forte da estruturação do espaço, na ponderação acerca da localização das actividades e também ou, consequentemente, na valorização do espaço.
- **Ordem (de um grafo)** – número total de nós.
- **Dimensão (de um grafo)** – número total de arcos.
- **Caminho** – percurso linear no qual nenhum nó aparece mais do que uma vez.
- **Circuito** – é um caminho fechado que se inicia e termina no mesmo nó, sem que se passe duas vezes pelo mesmo arco.
- **Região** – área intersticial ou envolvente ao grafo.
- **Cadeia** – é uma sucessão de arcos tal que cada um (excepto o primeiro e o último) tem um nó comum com o arco precedente e um outro em comum com o arco seguinte; é um caminho entre dois nós.
- **Comprimento da cadeia** – é o número de arcos que a cadeia tem.
- **Cadeia aberta** – é aquela que termina e acaba em nós diferentes.
- **Rede incoerente ou em árvore** - rede em que não existem circuitos.
- **Rede complexa** – rede com vários circuitos.
- **Grafo conectado** – significa grafo uno ou grafo de 'peça única', i.e., grafo em que qualquer par de nós tem um arco a ligá-los.
- **Multigrafo** – é um grafo em que existem vários arcos a ligarem quaisquer pares de nós.
- **Circuito euleriano** – é um circuito que permite visitar todos os nós pelo menos uma vez e que passa por todos os arcos apenas uma vez.
- **Caminho euleriano** – é um percurso que contém todos os arcos e vai a todos os nós.
- **Circuito hamiltoniano** – ou, neste caso, caminho hamiltoniano significa que se passa por cada nó pelo menos uma vez.
- **Árvore** – é um tipo de grafo, em que existe um nó que é designado de raiz e a partir do qual só existe um único caminho para se ir a qualquer outro nó do grafo. Se a árvore for um grafo não-direccionado, significa que qualquer um dos nós do grafo pode ser o nó chamado de raiz.
- **Floresta** – é um tipo de grafo em que os nós estão isolados, pelo que não existe qualquer circuito. Um grafo conectado (floresta de nós ligados) é chamado de árvore.
- **Adjacência** – Diz-se que um nó x é adjacente de um nó y, se o par (x,y) for um arco, ou seja, se existir um arco directo a ligá-los. No caso de grafos direccionados, a adjacência não é uma propriedade simétrica. Normalmente, a adjacência é representada sob a forma de matriz (matriz de adjacências; cf. 2.4).

No geral, para a maioria dos grafos em ciências geográficas, as entidades representadas de maneira abstracta sob forma de um conjunto de nós são cidades, vilas, casas, árvores, junções de vias, etc. Quanto ao conjunto de arcos da rede, que representam as ligações ou relações entre os nós, classicamente são representações das entidades como as rodovias, as ferrovias e as telecomunicações. Em particular, e no que

reporta ao estudo desta dissertação, considera-se um grafo, as redes de transportes rodoviárias, em que no lugar dos arcos estão as rodovias a assumir o lugar de nós do grafo, as cidades e junções das vias, subscrevendo assim a definição feita por Kansky, de grafo: "…in geographers' terms as 'a set of geographic locations interconnected in a system by a number of routes'. (Kansky, 1969:5)

2.2. A TEORIA DOS GRAFOS NAS CIÊNCIAS GEOGRÁFICAS

A razão do uso de métodos e técnicas analíticas nas ciências geográficas reside na necessidade de se definirem e determinarem medidas para determinado tipo de fenómenos espaciais. Essas medidas, quando aplicadas ao estudo das redes, servem para duas coisas:

- Descrever quantitativamente a rede; e
- Comparar exactamente uma rede com outra (Dalton *et al*, 1973:3).

Nesta dissertação, e no contexto científico actual, considera-se mais um ponto, em que a importância das medidas provenientes da Teoria dos Grafos é fundamental: a exploração dos fenómenos na procura de propriedades emergentes das redes, e.g., mundo pequeno, coeficiente de *clustering* e os *hub's* (Strogatz, 2001; Albert e Barabási, 2002; Sui, 2004; Jiang, 2006; Xu e Sui, 2007).

Desde a sua fundação, nos domínios da matemática, que novos teoremas e algoritmos têm reformulado a Teoria dos Grafos relevando-lhe uma vocação aplicativa na resolução de problemas e consequentemente, na descoberta de conhecimento noutros domínios científicos, com maior ou menor afinidade do ponto de vista formal, tais como: a Física, a Química, a Biologia, a Medicina, a Electrónica e as Telecomunicações em geral, enquanto nas ciências sociais se destaca, a Sociologia, a Psicologia, a Antropologia, a Economia, e a Geografia (Strogatz, 2001).

Enquanto ramo da Matemática, a Teoria dos Grafos simplifica a realidade sob a forma gráfica de nós e arcos; uma abstracção dos fenómenos reais que contudo não retira, antes pelo contrário, ao método espacial a vocação para análises empíricas e analíticas e, consequentemente, para a resolução de problemas reais.

No caso da Geografia, é o sub-domínio da Geografia dos Transportes, o ramo que mais tem invocado a Teoria dos Grafos, sendo que a análise de redes de transporte e comunicação só começa a ter relevância maior na década de 60, conforme se pode aferir de Haggett e Chorley: "Since transport systems with intricate pattern of road, rail, pipeline, air and telecomunications forms a major class of geographically-relevant circuit systems, they are used to illustrate the structural problems posed by this class of graphs. Substantive geographical accounts of these transport systems are given in a number of texts (e.g. Clozier, 1963; Wilson, 1967; Taaffe and Gauthier, 1969; Ullman, in James and Jones, 1954; see also the extensive literature reviews by Leinbac, 1967; Siddall, 1964; Wolfe, 1961)". (Haggett e Chorley, 1969:31), e a que se

podem ainda adicionar os trabalhos Shimbel[9], 1953; de Garrison,[10] 1960 e de Garrison e Marble[11], 1961; Nystuen, J. e Dacey, M., 1961[12]; Kansky[13], 1963 e de Taaffe, Morril e Gould, 1963.

Se é verdade que a análise espacial das redes de transporte e comunicação sempre constituiu matéria de interesse para a Geografia, independentemente das transformações ocorridas, quer nos meios de transporte, quer no território, - e que os geógrafos foram dos primeiros cientistas a perceberem este fenómeno de interacção espacial (Haggett, 2001), a estudá-lo e medir as suas implicações na organização espacial (Taaffe e Gauthier, 1973) - é também verdade que o uso da Teoria dos Grafos, para o estudo das redes deixou de ser recorrente em Geografia após a década de 60 da Geografia Teórica e Quantitativa.

Da análise bibliográfica feita para esta dissertação, apesar de cedo se ter revelado como padrão a existência de uma consciência colectiva acerca da influência exercida pela rede de transportes e comunicação sobre o território (Batty, 2001; Mun, 1997; Gaspar, 1986), a maioria dos estudos resultava em trabalhos de teor descritivo, focados numa perspectiva mais histórica e institucional e muitos poucos recorriam aos métodos quantitativos e à análise espacial. Desta forma, os modelos desenvolvidos constituem fracos auxiliares à formulação de teorias (Taaffe; Gauthier e O'Kelly, 1996).

Dos modelos explicativos da localização e distribuição espacial com base nas teorias micro-económicas, aos modelos de interacção espacial (cf. Tabela 1), existem dois séculos de preocupações pelo território e pelas relações que nele se estabelecem. Mas foi sobretudo no decurso das décadas de 60 e 70 com a introdução da matemática na análise sistémica do território (Wilson, 2000), que a Teoria dos Grafos surge nas ciências geográficas (Potrikowski e Taylor, 1984; Xu, 2007), e adquire maior importância no estudo da estrutura espacial das redes. "…that the description and analysis of network structure has been a tradicional concern of geographers. Among the methods employed in the description of networks have been the preparation of maps and tables listing distances, capacities, flows (…) During the past several years a more consistent set of summarizing measures of network characteristics has been developed in order to provide a better basis for the comparation and evaluation of Networks. The efforts have drawn heavily on the concepts of graph theory to describe the topological structure of networks" (Taaffe e Gauthier,1973:100).

9 Shimbel, A., 1953 – Structural Parameters of Communication Networks. Bulletin of Mathematical Biophysics, Vol. 15.

10 Garrison, W., 1960 – Connectivity of the interstate highway system. Papers of the Regional Science Association, 6.

11 Garrison, W.; Marble, D., 1961 – The Structure of Transportation Networks. Washington, D.C. Department of Commerce, Office of Technical Services.

12 Nystuen, J.; Dacey, M., 1961 – A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions. Papers and Proceedings of the Regional Science Association, 7:29-42.

13 Kansky, K., 1963 – Structure of Transportation Networks. University of Chicago. Department of Geography Research Paper Nº 84.

TABELA 1 SÍNTESE DOS MODELOS DE INTERACÇÃO ESPACIAL EM GEOGRAFIA

AUTOR	DATA	OBRA / TIPO MODELO / ASSUNTO DOMINANTE	SÍNTESE DO ASSUNTO DOMINANTE
Richard Cantillon	1755	*Essaí / Microeconómicos*	Organização social e espacial com base nos determinantes tempo e transportes, de que resultou a hierarquia aldeia/burgo/cidade, numa lógica de economias de aglomeração e de escala.
Von Thünnen	1826	Utilização do solo agrícola / Microeconómico	Refere a importância dos factores distância e custos de transporte (do povoado agrícola a um mercado) na determinação da regularidade espacial. Daqui resultou o estabelecimento de padrões de utilização do solo. Admite condições de concorrência de usos e avança teorias da melhor utilização agrícola por locais.
Alfred Weber	1909	Teoria da Localização das Indústrias / Microeconómico	Reconhece ser a indústria o fundamento de novas aglomerações populacionais. Modela a localização industrial, com base em factores económicos, e.g. custos de transporte, custos de mão-de-obra e a economia de aglomeração.
Christaller	1933	Teoria dos Lugares Centrais / Microeconómico	Expõe a forma de organização espacial das povoações, e das áreas de influência destas, com base nas relações funcionais entre elas proporcionadas pela mobilidade e acessibilidade. O seu modelo tem uma configuração geométrica hexagonal.
Abordagem Ecológica: Burgess, MacKenzie e Hoyt	1920 - 1940	Modelo das zonas concêntricas da estrutura espacial e social / Microeconómico	Saído da Escola de Chicago, este movimento manifestou-se na introdução de termos ecológicos na análise da estrutura espacial, dando o destaque dado aos factores de acessibilidade e mobilidade, determinados pelos principais eixos de transporte, para propor um modelo espacial de organização por sectores, cujos padrões sociais, económicos (rendas).
Wingo e Alonso	1961 - 1964	*Modelo de Mercado fundiário em função do custo dos transportes* / Microeconómico	A localização das populações e dos serviços são determinados em função do custo do solo, que por sua vez é determinado pelo custo do transporte, entre outros factores.

Este período é marcado pela transição entre os modelos de localização de matriz dominantemente microeconómica, e os modelos de interacção espacial. Na base desta mudança estão as críticas aos primeiros, que apontavam para o facto de se centrarem demasiado em torno dos indivíduos (agentes em competição pelo espaço) e menos nas relações estabelecidas, não só entre os indivíduos, mas também com o território e as infra-estruturas, como forma de procurar padrões homogéneos. Como resposta, inicia-se na década de 60, com o impulso do quantitativo nas ciências, novas teorias e novos modelos: modelos de interacção espacial.

Harvey	Anos 70	*Social Justice in the City*	Corrente da Economia Política, que procura explicação para os problemas sociais, económicos (vulgarizados na maioria das cidades), e urbanos, com base nas ideologias políticas resultantes de influências da propriedade particular, das empresas privadas, e da procura de lucro.
Wilson e Batty	1970 e 1976	Sistema de Cidades como um todo	A introdução da matematização e quantificação na análise sistémica da cidade. Estudo dos fenómenos de interacção entre cidades, de que resultou a modelação urbana e regional, como forma de previsão de probabilidades/cenários possíveis. A técnica da Ecologia Factorial, recuperada da Escola de Chicago, proporcionou um desenvolvimento nos estudos do complexo fenómeno urbano. Este avanço metodológico ocorreu em paralelo com os estudos morfológicos intra-urbanos.
Diversos	Anos 80 ...	A cidade como sistema e como centro de radiação e de competitividade internacional	A cidade como sistema fragmentado, tanto do ponto de vista espacial como do ponto de vista social. A 'redução' da cidade a objecto de *marketing* para captar investimento nas actividades, nomeadamente nas actividades emergentes (indústrias culturais, por exemplo). A cidade na rede de cidades - do espaço contínuo ao espaço rede? – na era da globalização económica, social e cultural.

A análise espacial das redes de transportes constituiu desde sempre um objecto de estudo da Geografia (Hensher, *et al*, 2004:1), muito embora nos seus primórdios esses estudos se tenham detido estritamente no âmbito da concepção e descrição de mapas, na elaboração das tabelas de distâncias e nos cálculos dos diferentes índices de densidade da rede e das isócronas. Só no início da década de 60, do século XX, Garrison (1960), num estudo sobre a estrutura espacial das redes de estradas interestados, fez uso dos métodos baseados nas propriedades topológicas dos grafos.

Claro que outras metodologias independentes da base matemática da Teoria dos grafos foram contempladas. Taffee, Morril e Gould, num estudo sobre redes de estradas em países africanos fizeram notar a importância de um olhar geográfico para a formulação de modelos de desenvolvimento de redes de comunicação. Baseados em dados empíricos, os autores desenharam um padrão que acharam aplicável para todas as estradas: "The results of the regression analysis indicate a close relationship between the internal distribution of road mileage and total population (…) Briefly, it has been found that in a given unit, road mileage is in general proportional to the square root (approximately) of the population times the square root (approximately) of the area." (Taaffe *et al*, 1973: 46)[14].

14 Formalmente: $\sum kmroad = \sqrt{p} * \sqrt{s}$, *p* (population) and *s* (surface).

Segundo os autores, o modelo de desenvolvimento da rede de estradas de países de fraco desenvolvimento económico decorre em quatro fases (Figura 8):

Fase 1 – Considere-se um litoral marítimo com pequenos portos e povoados comerciais, com fracas áreas de influência e débeis ligações entre eles. A comunicação estabelece-se através de pequenas embarcações de pesca e mercantis.

Fase 2 – Surgem as primeiras linhas de comunicação que vão estabelecer contacto com pontos do interior do país desde o litoral (B). Simultaneamente, os portos P1 e P2 desenvolvem-se e vêem crescer as suas áreas de influência (C). Segundo os autores, esta é a fase mais importante no processo de desenvolvimento dos países de fraco desenvolvimento económico. Aqui podem destacar-se três causas fundamentais que condicionam o aparecimento das primeiras linhas de comunicação do litoral para o interior: 1) a tendência para exercer o controlo político e militar da área; 2) a tendência para explorar e exportar riquezas naturais; 3) a tendência para exportar os produtos agrícolas.

Fase 3 – Ao longo das linhas de comunicação vão germinando e desenvolvendo-se outros aglomerados populacionais. Surgem tanto junto às linhas laterais, como junto aos portos maiores e às cidades do interior (C e D). A concentração da actividade económica nos portos maiores vai acelerar ainda mais o seu desenvolvimento em detrimento dos portos mais pequenos, que inclusivamente podem definhar. Simultaneamente, assiste-se ao aumento das periferias das grandes cidades à custa da asfixia das cidades mais pequenas.

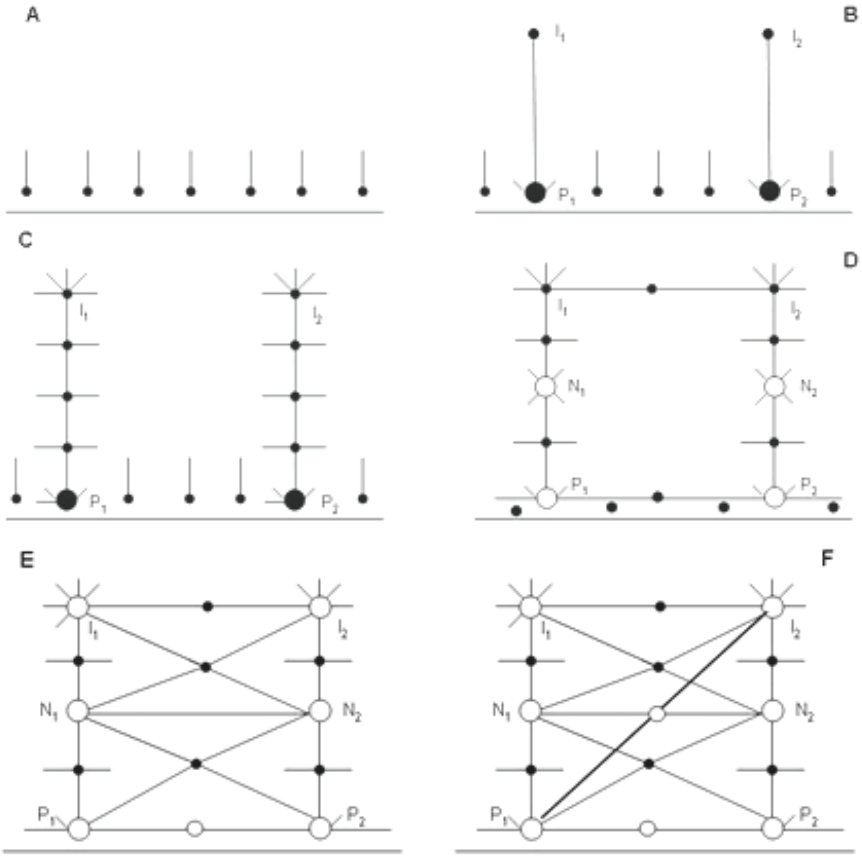
Fase 4 – Algumas linhas de comunicação laterais começam a juntar-se e conduzem ao surgimento de novos nós (D e E). Assiste-se à tendência para a especialização e ao crescimento de mercados urbanos, o que justifica o aparecimento da competitividade. Por fim, verifica-se a existência de ligações privilegiadas entre as cidades maiores, o que permite maiores fluxos (F). Esta fase é caracterizada pelo domínio da rede de estradas sobre a da rede ferroviária.

No entanto, os resultados teimavam em não explicar cabalmente todas as particularidades de que se revestem as redes e as transformações que provocam no território, sobretudo porque negligenciavam o carácter dinâmico das redes, ou seja, os nós não são sempre os mesmos e só as ligações (arcos) é que vão sendo adicionadas, pelo que foram surgindo outros modelos, nomeadamente, o modelo de R. Lachene, 1965.

O modelo de Lachene baseava-se num conjunto de pressupostos hipotéticos: a área de estudo era o interior de qualquer País; existia uma actividade económica homogénea; e a população ocupava o território de modo disperso. Para que existisse uma medida comparável justa, Lachene apontou igualmente 4 fases de desenvolvimento do território para explicar o seu modelo:

Fase I – Sobre uma área uniformemente desenvolvida existe uma rede de estradas de nível inferior e com uma configuração em árvore;

FIGURA 8 FASES DE DESENVOLVIMENTO DA REDE DE TRANSPORTES EM PAÍSES DE FRACO DESENVOLVIMENTO ECONÓMICO.



Fonte: Taaffe, Morril e Gould, 1963.

Fase II – É no cruzamento das estradas que surgem as cidades;

Fase III – Com o desenvolvimento das cidades e o progresso técnico dos transportes surgem as condições para que se forme um novo tipo de rede, e.g., rede ferroviária, que ainda que não una alguns dos nós existentes, vai ter uma capacidade superior à rede de estradas;

Fase IV – A formação de uma rede diferenciada decorrente da fase anterior vem proporcionar um aumento de potencial de todos os aglomerados populacionais e provocar um aceleramento ao processo de desenvolvimento, sobretudo para as três cidades maiores.

Não obstante os modelos desenvolvidos, a situação continuava a marcar-se pela não explicação universal, devidamente fundamentada cientificamente com métricas, da relação existente entre as redes de transportes e a organização e desenvolvimento do território.

Para responder a esta premissa surgem os modelos com base na simulação, o que marcou a introdução do formalismo matemático na análise espacial e a passagem de uma fase de diagnóstico, para cenários de prognóstico nas ciências geográficas e, muito particularmente, nos estudos sobre as redes de transporte e o território. "La simulación no ha encontrado hasta ahora muchas aplicaciones en los estúdios de la geografia y del transporte." (Potrykowski e Taylor, 1984:105).

É com esta fase da quantificação na análise espacial em Geografia, que vão surgir os primeiros estudos de redes através de métodos baseados na Teoria dos Grafos. Os modelos de Shimbel (1953) e de Kansky (1963) são os primeiros exemplos formais. O primeiro diz respeito a um estudo de teor teórico que contemplava a determinação de parâmetros estruturais para análise de redes de comunicação[15], e introduziu o método do cálculo da matriz D ou matriz de Shimbel para análise interna da rede (cf. 2.3.2.). O segundo é um modelo que estimava o desenvolvimento da rede de transportes através de um processo aditivo de ligações. O modelo representava a rede de transportes segundo um diagrama de arcos (rede de estradas) e nós (cidades), através do qual o autor conseguia determinar previamente a distância média e o número de arcos que a rede iria ter, mediante análise relacional entre a estrutura da rede, o nível socioeconómico da região, a dimensão da área de estudo e a sua dinâmica morfológica.

O modelo foi inicialmente elaborado para o território da Sicília (Itália) e tinha por objecto a rede ferroviária, isto porque, segundo Kansky, a ferrovia reflectia bem as características regionais da Ilha, já que era possível estabelecer uma relação directa entre a ordem em que foram sendo construídas as linhas e o desenvolvimento económico da região. "Un mayor grado de concentración representa una mayor probabilidad de la construction de las líneas." (Protykowski e Taylor, 1984:108).

Efectivamente, no seu estudo, Kansky demonstrou que é possível determinar a probabilidade de localização de um novo núcleo populacional, após se estudar a estrutura da rede e o nível de desenvolvimento económico das cidades maiores, mediante os seguintes procedimentos metodológicos:

- Dispõe o sistema de rede segundo a forma de um grafo, em que os nós são as cidades e os arcos as linhas ferroviárias que as unem;
- Vai adicionando gradualmente, a cada um dos nós da rede (cidade) um arco de forma que a cidade seguinte, de acordo com a sua dimensão vailigar-se com a maior e mais próxima cidade da rede;
- Quando todos os nós estiverem ligados, continua o procedimento para obter consecutivas ligações com a primeira, segunda, terceira, …*n* cidades da rede;

15 Cf. Alfonso Shimbel, 1953. Structural Parameters of Communication Networks. Bulletin of Mathematical Biophysics, Volume 15. pp 501-507.

- Este procedimento vai provocar algumas alterações nas ligações iniciais, nomeadamente, ao suprimento de algumas ligações e a um contínuo ajuste face ao relevo;

Faz-se a comparação entre a rede obtida pela simulação e a rede existente, verificando-se determinadas diferenças locais face ao factor relevo, e anota-se a semelhança da geometria.

Após Kansky[16], outros estudos foram surgindo, embora muitos deles com base nos mesmos pressupostos e por conseguinte pouco contribuíram para um avanço teórico, tendo-se criado um hiato teórico e quantitativo de uso da Teoria dos Grafos nas Ciências sociais em geral, e na Geografia em particular. Segundo Barnes e Harary (1983), a Teoria dos Grafos tem sido pouco e muito mal aproveitada pelas ciências sociais, geografia inclusive. Na maioria dos casos, os analistas recorrem a ela apenas para uso da terminologia ou dos conceitos, negligenciando os teoremas e algoritmos cuja aplicabilidade em redes reais está explícita.

Após este hiato de cerca de 30 anos, a Teoria dos Grafos só voltou a constituir método de análise da estrutura das redes, com a entrada no século XXI, altura em que a modelação e a análise quantitativa de dados (Batty, 2003; Pumain, 2003; Chapman, 2006) voltou a assumir destaque. Aludindo ao percurso irregular da Teoria dos Grafos nas ciências geográficas, a que Haggett e Chorley apelidaram de algo fragmentado, os mesmos previam que "any general theory of network growth lies in future research" (1969: 261). Ainda a sublinhar e justificar este menor uso das métricas desenvolvidas no âmbito da Teoria dos Grafos, está o facto de as redes serem sistemas complexos, tal como era complexo e complicado a análise das suas propriedades sem o auxílio da computação (cf. Cap. 5).

O facto é que o recente e renovado interesse dos geógrafos e da Geografia pela Teoria dos Grafos deveu-se ao desenvolvimento dos SIG (Gastner e Newman, 2006). Sobretudo se analisarmos o fenómeno no domínio das ciências geográficas, na medida em que estes vieram contornar um dos problemas apontados à Teoria dos Grafos, mais precisamente a sua abstracção espacial e a sua incapacidade de incorporar os atributos de localização (coordenadas), o que segundo aqueles que se dedicavam a estudar os fenómenos espaciais, constituía uma falha grave, visto excluir uma variável fundamental na explicação dos processos inter-activos e intra-activos entre os biótopos naturais e os biótopos artificiais de que resulta a configuração de padrões espaciais e a paisagem: o território.

Efectivamente, com o advento quer dos SIG (que permite a espacialização de dados, que até então ficavam apenas no domínio da matemática e da estatística), quer da maior capacidade computacional das máquinas e dos programas desenvolvidos, a

16 Garrison (1960) recorreu da Teoria dos grafos para medir a conectividade do sistema interestadual de auto-estradas do SW americano; Kansky (1963) voltou a dedicar a sua atenção à análise de redes e propôs 14 índices para medir e explorar a topologia duma rede de transportes e mais recentemente, Dill (2004) inovou no objecto de estudo (redes de ciclovias e redes pedonais) mas manteve os mesmos índices para medir a conectividade das redes, na região de Oregon.

Teoria dos grafos voltou a constituir método privilegiado para análise espacial (Batty, 2001; Batty, 2003:3).

A crescente tendência da Teoria dos Grafos e dos seus métodos matemáticos, na resolução de problemas reais, teve por génese dois factores: a globalização, que conferiu às redes a propriedade da ubiquidade em todos os aspectos da sociedade, tal como sempre existiram na natureza; o rápido desenvolvimento tecnológico verificado sobretudo na década de 90, sobretudo da micro-tecnologia e da computação, que permitiu a adopção dos métodos clássicos da Teoria do Grafos, e outros que entretanto se desenvolveram, ao estudo de redes em fenómenos de grande dimensão e complexidade, de que são exemplo a www[17] de Martin Dodge, a Internet[18] de Mathew Zook e de Albert-László Barabási , bem como as ligações aéreas.

Qual então a razão para tamanha discrepância de interesse e de material publicado acerca da Teoria dos Grafos? A resposta não é certamente simples, nem cabe aqui encontrá-la. No entanto, pode parafrasear-se Duncan Watts (2004), ao afirmar que podemos dividir este ramo da matemática pura em duas componentes: a quase óbvia e a absolutamente impenetrável.

Não obstante o contributo dos SIG e do recente avanço da investigação sobre uma das suas variantes, as Ciências de Informação Geográfica (CIG)[19], assim como o aparecimento da geocomputação[20] (ver Cap.5), conduziram ao surgimento de um subramo da Geografia dos Transportes: Os Sistemas de Informação Geográfica para Transportes (SIG-T) (cf. Cap.4). O principal responsável, quer pelo desenvolvimento do sector dos transportes em Geografia, quer pelo retomar da Teoria dos Grafos em Geografia, numa altura em que a teoria dos sistemas e as redes se tornaram o *core* da investigação da comunidade científica da actualidade, são os SIG. (Batty, 2003:2).

17 *World Wide Web* – é uma aplicação, baseado num programa que permite tirar e introduzir informação de e em qualquer computador ligado através da internet. O seu autor foi Bernes-Lee, um programador inglês, em 1990 altura a partir da qual se tornou possível à internet uma amplitude mundial. (Castells, 2001:26-32). Para ver a cybergeography de Martin Dodge, consultar htp://www.cybergeography.org e a InternetGeography de Mathew Zook, ver: htp://www.zooknic.com.

18 A internet tem as suas origens na ARPANET, uma rede de computadores criada pela ARPA (Advanced Research Projects Agency) do Departamento de Defesa dos EUA, em 1969. Tratava-se de um programa de computador com o objectivo de racionalizar o tempo de trabalho *on-line* dos computadores entre os vários centros de informática e grupos de investigação da agência. Em 1975, a ARPANET foi transferida para a Defense Comunications Agency, para facilitar a comunicação entre computadores de diferentes divisões das forças armadas, que funcionavam com protocolos TCP/IP. Em 1983, o sistema de defesa americano preocupado com violações à sua informação cria a rede MIL-NET, deixando a ARPA-INTERNET apenas para usos académicos, e entregue à National Science Foundation, que em 1987 passa a usar a ARPA-INTERNET como a sua espinha dorsal e inicia-se a privatização. Para a sociedade em geral, a internet nasceu em 1995. (Castells, 2001: 26-32).

19 Um domínio interdisciplinar no âmbito das ciências geográficas, mais focado na teoria e na metodologia associada aos SIG. (Longley et al, 2001)

20 Segundo Openshaw, a quem se atribui a autoria do termo, geocomputação "describe the use of computer-intensive methods for knowledge discovery in physical and human geography". (Openshaw and Abrahart, 1996 citado por Banger, 2002).

2.3. MEDIDAS TOPOLÓGICAS E PROPRIEDADES DOS GRAFOS

A descrição e análise da estrutura das redes, com destaque para as redes de transportes e comunicação, são tradicionalmente uma temática de interesse dos geógrafos. (Taaffe e Gauthier, 1973:100). A grande dificuldade em descrever e analisar as estruturas e propriedades das redes de transportes e comunicação reside na sua complexidade, daí o recurso a metodologias de simplificação desses sistemas, como sejam os grafos. Os grafos permitem manipular e representar qualquer tipo de relação arco-nó, de forma a:

- Comparar redes;
- Analisar a evolução das redes;
- Analisar e medir a densidade das redes;
- Medir o diâmetro das redes;
- Medir a acessibilidade individual dos nós da rede;
- Medir a acessibilidade geral da rede;
- Medir a conectividade da rede;
- Analisar o impacto das redes na organização espacial;
- Analisar padrões espaciais (hierarquias, *cluster's*, centros, periferias, relações, dominância e competição).

Na bibliografia de referência podem encontrar-se vários métodos para a investigação e descrição das propriedades das redes. Inicialmente cingiam-se à elaboração de mapas e à criação de tabelas com valores das distâncias, capacidade de fluxo, índices de densidade da rede e às isócronas. A partir de meados do século XX, são desenvolvidos e aplicados novos índices para medição da estrutura das redes e da hierarquia dos nós, com o intuito de dotar a análise mais consistente, que permita a comparação e a evolução das redes. Trata-se de medidas desenvolvidas no domínio da Teoria dos Grafos e da análise topológica acerca da estrutura das redes, e.g., medidas de conectividade e ligação, índices de coesão, medidas de acessibilidade e centralidade pelo cálculo de matrizes (Wilson, 2000).

Quanto às medidas de conectividade e ligação, elas são consideradas a forma mais simples de análise da estrutura de um grafo (Haggett e Chorley, 1969:31, 32), a partir das quais é possível analisar a evolução da rede ao longo do tempo (Potrykowski e Taylor, 1984:122) ou estabelecer comparações entre si (Taaffe e Gauthier, 1973:101).

Destas medidas é possível aferir quanto às propriedades dos grafos, ou seja, quanto à simplicidade, à complexidade, à coesão, à incoerência e ao grau de desenvolvimento da rede (cf. Cap. 6), assim como também se podem estabelecer relações entre o grau de desenvolvimento de um território e a estrutura da sua rede de transportes e comunicações: "La comparación de las redes de transporte de diferentes áreas indica que los países o regiones de débil desarrollo económico están servidos por sistemas de transporte cuyas redes tienen configuraciones próximas a los grafos incoherentes o árboles. Los países de alto desarrollo económico disponen, en cambio, de redes de transporte de gran cohésion." (Potrykowski e Taylor, 1984:124).

Todavia, para o propósito de estabelecer uma relação entre a estrutura da rede e as etapas de desenvolvimento de uma região ou país[21], os investigadores mostraram-se pouco satisfeitos com as medidas de conectividade e ligação. Isto, por estarem formalmente dependentes das suas componentes básicas: o número de arcos, o número de nós e o número de sub-grafos, o que condiciona uma análise mais consistente e realística. Para superarem esta desvantagem, havia que encontrar outros índices ou um índice sintético que fosse capaz de agrupar todas as propriedades do grafo. Com base neste argumento, já Alfonso Shimbel justificava a sua investigação perante os seus pares e salientava a importância do cálculo da matriz D: "Certain parameters are defined which roughly characterize the internal structure of networks" (Shimbel, 1953:501). Trata-se de dispor a informação, acerca da relação existente entre os nós da rede, sob a forma de uma matriz binária, com um número de linhas e colunas definidos em função do número de nós da rede, e preenchida apenas com uns (1) e zeros (0), para indicar a existência de ligação directa ou não entre os nós, respectivamente.

Foi a partir do cálculo de matrizes que se foram desenvolvendo novos índices de análise às propriedades topológicas dos grafos, nomeadamente, as medidas de acessibilidade e de centralidade, que para além de permitirem a comparação entre redes diferentes, permitem também classificar e diferenciar uns nós de outros, facto de que derivou a análise da estrutura das redes, para campos que reportam a conceitos espaciais de ordem, hierarquia, relações, distância-mais-curta, proximidade e acessibilidade.

Para um melhor entendimento dessas medidas topológicas (cf. Tabela 2, em anexo), considere-se os pressupostos seguintes:

- *A* = número de arcos
- *N* = número de nós
- *G* = grafo ou sub-grafo
- Número associado ou índice de Köning – é referente a um nó e significa a distância topológica desse nó medido em função do nó que se encontra mais afastado topologicamente na rede, considerando o caminho-mais-curto.
- Nó central – nó que apresenta o número associado mais baixo da rede.
- Diâmetro da rede – é o número associado mais elevado da rede. Indica o número de ligações (arcos) necessários para conectar os dois nós que se encontram mais afastados topologicamente na rede.
- Caminho-mais-curto – problema de optimização de redes que permite determinar qual a distância (qualquer unidade de medida) mais curta a percorrer entre quaisquer pares de nós de um grafo. Existem vários algoritmos para a resolução deste problema, se considerarmos que pode existir um valor de atrito (custo) associado a cada arco. Para grafos orientados e com custos associado, o algoritmo de resolução

21 Garrison, W.; Marble, D. (1961) – The Structure of Transportation Networks. Washington, D.C.; US Department of Commerce, Office of Technical Services, p.62 e Kansky, K. (1963) – Structure of Transportation Networks. University of Chicago, Department of Geography. Research Paper nº 84.

mais comum é o algoritmo de Dijkstra[22], que permite determinar e provar qual o caminho-mais-curto, de quaisquer pares de nós de um grafo, sem arcos de custos ou pesos negativos, e sem que tenha de o comparar com todos os outros caminhos possíveis. Para grafos com arcos com custos negativos, tem-se o algoritmo de Bellman-Ford-Moore[23], embora mais lento computacionalmente que o de Dijkstra. Para soluções simples e especialmente adaptadas a redes reais, como as redes de transportes, o algoritmo de Shimbel ou índice de acessibilidade de Shimbel (*ac*) é o mais indicado. Consiste na soma da distância de um nó a todos os outros nós do grafo (cf. 2.4.2.)

- Número máximo de circuitos de uma rede – é o número máximo de ligações (L_M) menos o número mínimo de ligações (L_m) necessário para se ligarem todos os nós. Para os grafos planares é: $L_M - L_m = 3\ (n - 2) - (n - 1) = 2 * n - 5$
- Medidas de conectividade e de ligação - métodos matemáticos que servem para descrever as características da rede no seu todo (a estrutura da rede).
- Medidas de acessibilidade e de centralidade – métodos matemáticos que servem para medir as características e diferenciar cada um dos nós, e uns dos outros, respectivamente.

Numa perspectiva matemática, os estudos terminam ou começam quando é possível identificar uma fórmula generalista, ou seja teoremas e corolários[24]. Na Teoria dos Grafos não são muitas as verdades demonstráveis, que se podem generalizar. No entanto, importa identificar algumas que têm repercussão na exploração das medidas topológicas para as redes em análise nesta dissertação:

***Teorema* 1** – Para qualquer grafo, a soma dos graus de acessibilidades de todos os nós é igual a duas vezes o número de arcos existente;
Corolário 1 – Todos os grafos, cujo número de nós seja ímpar é um grafo uniforme.

***Teorema* 2** – Se *G* for um grafo planar conectado, então qualquer grafo planar para *G*, terá sempre $r = e - v + 2$, em que r – região; e – arcos e v – nós, de *G*.

***Corolário* 2** – Se G é um grafo planar conectado com $e > 1$, então $e \leq 3v - 6$. O que permite demonstrar se um grafo é não-planar.

***Teorema* 3** – Um multigrafo não-direccionado diz-se euleriano, se, e apenas se, for um grafo conectado e todos os seus nós tenham um número ímpar de arcos a ligá-lo (grau de acessibilidade do nó).

---

22 Edsger Wibe Dijkstra (1930 – 2002), nascido em Roterdão e formado em física teórica, acabou por se dedicar às ciências computacionais, área em que desenvolveu toda a sua carreira académica. Em 1972 ganhou o prémio Turing pelos contributos fundamentais em linguagem de programação.

23 O algoritmo de caminho-mínimo de Bellman-Ford-Moore (1958) é particularmente útil para grafos sem pesos, mas não aconselhável para grafos muito grandes, devido à sua lentidão processual. (Zhan, B. e Noon, C., 1998)

24 "Um teorema não é mais do que uma verdade estabelecida e que se demonstra de forma perfeitamente convincente, a partir de outras verdades anteriormente estabelecidas. (…) Um corolário de um teorema «*T*» é um outro teorema que decorre imediatamente – ou quase – de «*T*»" (Alain, G., 1995:9)

Corolário 3 – Um multigrafo pressupõe que tenha como propriedade a existência de um caminho euleriano, mas não a de circuito euleriano, se, e apenas se, for um grafo conectado e ter exactamente dois nós com um grau de acessibilidade de valor ímpar.

***Teorema* 4** – Um grafo conectado com n nós, $n > 2$ tem um circuito hamiltoneano se o grau de acessibilidade de cada nó for pelo menos $n/2$.

Teorema 5 – Um grafo do tipo árvore T, com n nós tem n-1 número de arcos.

Teorema 6 – Nós de uma árvore T, sem quaisquer filhos (arcos que partem do nó), são chamados de nós de saída de T; os nós que têm filhos, são chamados de nós internos de T. Cada nó interno de T tem m filhos.

Teorema 7 – Se $m = 2$, o grafo é uma árvore T bipartida.

A forma, a conectividade e a acessibilidade duma rede e das suas componentes é definida como sendo a sua topologia, ou seja, a forma como os elementos da rede (arcos e nós) estão relacionados. Neste capítulo, apresentam-se as medidas derivadas das fórmulas matemáticas da Teoria dos Grafos, que ajudam à análise das diferentes topologias espaciais das redes de transportes e comunicações, à medida que crescem, diminuem ou desaparecem alguns dos seus elementos e aferir da sua influência sobre a organização e a configuração do território.

Para concretizar este desígnio é imprescindível o recurso a algoritmia testada, conforme a que abaixo se dispõe e se explica da sua importância:

2.3.1. MEDIDAS DE CONECTIVIDADE E DE LIGAÇÃO

O conceito de conectividade de um grafo é sobretudo importante quando se pretende:

- Comparar redes de transporte e comunicação;

- Avaliar o desenvolvimento da rede ao longo do tempo, pela identificação das configurações que desenvolvem.

Uma vez que a expansão ou intensificação das ligações entre os nós da rede é directamente relacionável com a procura das infra-estruturas de transporte para a deslocação de pessoas, bens e informação, o grau de conectividade da rede de transporte é um indicador da complexidade da organização espacial, i.e., quando o grau de conectividade da rede é maior, é também maior a complexidade espacial.

No que respeita à determinação do grau de conectividade da rede, o formalismo matemático estabelece um limite mínimo e máximo. Diz-se que a conectividade da rede é mínima, quando cada um dos nós está ligado à rede e nenhum dos nós está isolado. Consequentemente, a remoção de qualquer arco divide a rede em dois. Nestes

casos, a complexidade espacial é igualmente mínima. Formalmente, a conectividade mínima expressa-se por:

$C_{min} = (N - 1)$, em que N representa o número de nós da rede.

A fórmula permite determinar o número de arcos necessários para se ter uma conectividade mínima.

Quanto ao limite máximo, diz-se que a rede tem uma conectividade máxima quando cada nó está directamente ligado a qualquer outro nó da rede. Para o caso de grafos planares, a conectividade máxima expressa-se formalmente por:

$C_{max} = 3(N - 2)$, Є $N > 2$.

Para os grafos não-planares, o formalismo é:

$C_{max} = N(N - 1)$.

Em ambas os casos, esta medida significa que para cada nó que se adicione à rede, que tem de ter um mínimo de 2 nós, 3 novos arcos têm de ser acrescentados (3 novas ligações) para que a rede mantenha uma conectividade máxima.

Outras medidas de conectividade que foram surgindo na Teoria dos Grafos, para análise estrutural da rede são:

Algoritmo: **Número ciclomático (μ)** ou primeiro número de Betti (Potrykowski and Taylor (1984:123); Kansky and Danscoine, (1989))

Fórmula: $\mu = A - N + G$

Limites: $0 \leq \rightarrow \infty$

Significado: Quanto maior o valor, maior o grau de coesão da rede. Significa que existem vários circuitos (caminhos alternativos) para ir de um nó *i* a um nó *j*.

Algoritmo: **Índice de Prihar (*Cst*)**

Fórmula: $Cst = \dfrac{n(n-1)}{2a}$, em que *n* representa o número de nós e *a*, o número de arcos da rede.

Limites: $n/2 < \mu \leq n/2$

Significado: Para valores $Cst >$ n/2, significa um grau de coesão máximo; para valores $Cst \leq$ n/2, significa que temos uma rede de grau de coesão mínimo.

Algoritmo: **Índice alfa (α)** ou índice de redundância (Haggett e Chorley, 1969:35)

Fórmula: $\rightarrow \alpha = \left(\frac{\mu}{2n-5}\right) = \frac{circuitosexistentes}{\max .circuitospossiveis}$

Limites: $0 \leq \alpha \leq 1$

Significado: Traduz a relação entre o número de ciclos observados e o número máximo possível. Numa rede cujo número de arcos é baixo, o índice assume valores próximos do zero, e à medida que o número º de arcos aumenta, aumenta o índice e por conseguinte a coesão da rede, até ao valor máximo de 1. Os valores baixos indicam que estamos perante uma rede em árvore (incoerente), típica de regiões subdesenvolvidas. Valores próximos da unidade, pressupõem redes complexas típicas de regiões desenvolvidas. Dá indicação do número de conexões alternativas entre quaisquer pares de nós, ou seja, o número de caminhos possíveis.

Algoritmo: **Índice Beta (β)**

Fórmula**:** $\beta = \frac{a}{n}$

Limites: $0 \leq \delta \leq (n-1)/2$

Significado: Os valores de zero, significam a ausência de conexão e coesão; para valores que podem ir até 3, em grafos planares, significam conexão e coesão máxima da rede. Através dele é possível extrair a ideia das conexões necessárias a incorporar na rede. Permite comparar graus de coesão de diferentes redes e dá indicações acerca da complexidade topológica da rede. Quanto maior o valor, maior a complexidade.

Algoritmo: **Índice do grau de desenvolvimento (*Gp*)**

Fórmula: $Gp = \frac{n^2 - n}{\frac{2-a}{n}}$

Limites: $Gp \geq 0$

Significado: é um índice combinatório, que indica o número de arcos que faltam para completar a rede, i.e., informa sobre as dimensões dos componentes que se tem de introduzir na rede.

Não obstante as medidas indicadas, segundo Taaffe, Gauthier e O'Kelly, as medidas de conectividade fundamentais para análise estrutural da rede são (Taaffe, *et al*, 1996:250):O diâmetro da rede, que denota o número de arcos ou ligações necessárias para ligar os nós mais afastados na rede. Quanto menor o seu valor, maior é a conectividade da rede. O conhecimento do diâmetro da rede é particularmente importante para o cálculo de matrizes, uma vez que indica o expoente a que se tem de elevar a matriz inicial (cf. 2.3.2);

O índice gama (γ), é a mais representativa das medidas topológicas da Teoria dos Grafos (Taaffe e Gauthier, 1973:158) que permitem avaliar a conectividade relativa da rede. Expressa-se pelo rácio entre o número de arcos existentes numa rede e o número máximo possível. Formalmente:

$$\gamma = \frac{a}{3(N-2)},$$

em que a representa o número de arcos existentes na rede.

Para uma melhor interpretação deste índice proposto por Kansky estabeleceram-se limites: 0.36 é o valor mínimo de γ e 1 o seu valor máximo. Para os diferentes valores compreendidos nestes limites, a rede pode classificar-se em três configurações possíveis:

Rede em espinha: quando a conectividade apresenta valores mínimos. Nestes casos, o índice traduz-se, para os grafos planares, no formalismo:

$$\gamma = \frac{N-1}{3(N-2)},$$

e pode variar o seu valor entre $1/3 \leq \gamma \leq 1/2$, quando $N > 4$. Significa que cada nó da rede está pelo menos ligado a um qualquer outro nó, facto que viabiliza a circulação entre quaisquer pares de nós, mas apenas por um único caminho, ou seja, não existem caminhos alternativos numa rede de conectividade mínima.

Rede em Delta: quando a densidade de arcos (ligações) é muito elevada face ao número de nós existentes. De notar que não se trata do oposto da rede em espinha, pois este não é um caso de conectividade quase máxima. É, no entanto, um caso de uma rede mais desenvolvida e madura. Para que a rede mantenha uma configuração em delta, sempre que um nó é adicionado à rede, dois novos arcos são exigidos ($a = 2N$-3) para valores do índice compreendidos entre $2/3 \leq \gamma \leq 1$, quando $N > 3$. Neste tipo de rede existem sempre caminhos alternativos para assegurar a circulação entre quaisquer pares de nós. A forma geométrica dominante é o triângulo e sempre que é adicionado um nó à rede, são necessárias 2 novas ligações para manter máximo o grau de conectividade e, consequentemente, a complexidade estrutural da rede no espaço.

Rede em Malha: trata-se de uma configuração intermédia, entre a conectividade mínima (espinha) inicial no processo de desenvolvimento da rede e a rede de maior densidade (delta), amais madura. Os valores do índice variam entre $1/2 \leq \gamma \leq 2/3$, quando $N > 4$.

Estas medidas baseadas no índice gama (γ) podem também ser usadas para identificar o momento a partir do qual a rede passa de uma configuração em espinha para uma configuração em delta, bem como para comparar diferentes estádios de evolução das redes, em regiões ou países diferentes (Taaffe *et al*., 1996:254).

O índice gama pode também aplicar-se a sistemas não-planares. Neste caso, o formalismo expressa-se da seguinte maneira:

$$\gamma = \frac{a}{a_{\max}} = \frac{a}{\left[N\left(N-1\right)/2\right]}$$

Tal como o índice gama (γ), também o índice alfa (α) pode ser utilizado de forma complementar para descriminar entre as 3 configurações de base no que respeita à estrutura da rede de transporte (Taaffe e Gauthier, 1973:111). Por definição, a rede com uma configuração em espinha caracteriza-se por uma conectividade mínima e pela ausência de circuitos. Tal facto significa que o valor do índice alfa (α) é sempre nulo,

$$\alpha = \frac{(N-1)-N+1}{2N-5} = \frac{0}{2N-5} = 0$$

Ao adicionarem-se arcos a uma rede em espinha, o resultado é sempre uma re-configuração da rede: em delta ou em malha, dependendo do número de circuitos que se criem.

Assim, para se definirem os limites para o índice alfa (α), tem de se descriminar entre:

- Configuração em Delta

$$\alpha = \frac{(2N-3)-N+1}{2N-5} = \frac{N-2}{2N-5}$$

- Para redes infinitamente maiores

$$\lim_{N\to\infty} \frac{N-2}{2N-5} = \left[\lim_{N\to\infty} \frac{N}{2N-5} - \lim_{N\to\infty} \frac{2}{2N-5}\right] = \frac{1}{2}$$

- Para redes pequenas, e no caso de o número de nós ser 3, o índice alfa (α) é 1.0.

TABELA 2 QUADRO SÍNTESE DE MEDIDAS DE CONECTIVIDADE PARA EXPLORAÇÃO DA TOPOLOGIA DA REDE DE TRANSPORTES

Configuração	ÍNDICE (γ)	Observação	INDICE (α)	Observação
Espinha	$1/3 \leq \gamma \leq 1/2$	$N \geq 4$	0	N=A+1
Delta	$2/3 \leq \gamma \leq 1.0$	$N \geq 3$	$0{,}50 \leq \alpha \leq 1{,}0$	$N \geq 3$
Malha	$½ \leq \gamma \leq 2/3$	$N \geq 4$	$0 < \alpha < 0{,}50$	$N \geq 3$

O contributo das medidas topológicas de conectividade para análise da estrutura da rede de transportes, quer através de métodos de comparação estáticos, quer através da fixação de limites aos valores dos índices para avaliação do estado de desenvolvimento das redes no tempo, em três configurações básicas (espinha, delta e em malha), permite estabelecer uma relação entre as propriedades topológicas da rede e o desenvolvimento regional (Garrison e Marble, 1961).

Mas ainda assim, o facto da análise de redes estar condicionada às medidas topológicas derivadas da Teoria dos Grafos constitui um forte condicionalismo a uma investigação mais ajustada à realidade, em que as variáveis como fluxo, capacidade, distâncias físicas, tipos de uso do solo, etc. não são consideradas. Para superar alguns destes obstáculos, a Geografia contribui para desenvolver e adoptar outras medidas capazes de introduzir maior realismo na análise da rede de transportes, nomeadamente, na análise interna da rede.

2.3.2. MEDIDAS DE CENTRALIDADE E ACESSIBILIDADE: ANÁLISE DE REDES PELO CÁLCULO DE MATRIZES

Para uma análise da rede de transporte e da sua influência na organização espacial, o analista não pode restringir-se às características estruturais gerais; o seu interesse tem de se estender às componentes que definem a estrutura espacial da rede, e.g., os nós e os arcos.

Enquanto as medidas de conectividade e de ligação se preocupam com o aspecto da rede, nas medidas de centralidade e acessibilidade o enfoque é sobre os nós. A matriz é um método matemático que permite trabalhar as relações num grafo, através de uma representação em forma de tabela composta por linhas e colunas onde se dispõem os nós. A tabela vai-se preenchendo através do tipo de relações que existem entre os nós do grafo, e que podem ir desde a existência de ligação directa ou não, até ao tipo ou intensidade de fluxo existente.

O cálculo de matrizes vai permitir uma análise individual dos grafos e, consequentemente, uma análise da acessibilidade e da centralidade de cada um dos nós. Contrariamente às medidas de conectividade e de ligação, que analisavam a estrutura geral da rede, as medidas de acessibilidade e centralidade, derivadas do cálculo de matrizes, permitem uma análise interna da estrutura da rede.

Esta é uma etapa fundamental para se examinar a relação entre a rede de transporte e a organização espacial. A este facto, Haggett e Chorley referem-se como "…the extra structural information that can be derived via matrix analysis (…) More efficient descriptions of the topologic structure of circuit networks may be obtained by treating the graph as a connectivity matrix." (Haggett e Chorley, 1969:33-35). Potrykowski e Taylor, por seu lado afirmam mesmo que alguns índices mais simples, como o número ciclomático, os índices (α), (β), (γ) e outros, nem sempre permitem diferenciar os grafos com diferentes estruturas, sendo necessário para isso o recurso à matriz, uma vez que a forma mais simples é uma matriz binária, de uns (1) e zeros (0), consoante se verifique a existência de ligação directa entre os nós ou não, respectivamente. (Potrykowski e Taylor, 1984:133)

A partir desta análise interna à componente nó-arco é possível examinar ligações e fluxos entre nós ou apenas referenciar os nós pelas suas funções e acessibilidades ao resto da rede, e daí interpretar acerca da dominância e competição entre eles. Efec-

tivamente, nos últimos anos, a noção de competição entre cidades e, particularmente, entre cidades europeias tem-se revelado de extrema importância (Rozemblat, 1995:22). Neste contexto, a posição de uma cidade na hierarquia da rede urbana, traçada a partir de uma rede de transporte e comunicação (estradas, ferrovias, portos, aeroportos, etc.) é um indicador precioso do seu grau de desenvolvimento (Dupuy e Stransky, 1996:107). De uma forma abstracta, por exemplo, sempre que uma nova ligação (arco) é adicionada à rede é possível que a acessibilidade ou posição relativa de cada nó no sistema seja afectado, havendo nós que são beneficiados e outros que são prejudicados.

O cálculo da acessibilidade individual dos nós é assim um método fundamental para a determinação da hierarquia dos nós da rede (países, regiões, cidades, lugares, estações, etc.) e para a verificação das configurações espaciais que se desenham. A Teoria dos Grafos providencia a algoritmia para medir as alterações hierárquicas decorrentes das relações nós-arcos, no decurso do tempo. A análise da acessibilidade e da centralidade da rede pelo cálculo de matrizes foi a forma que os investigadores encontraram para dotar os seus estudos de maior rigor e consistência científica (Shimbel, 1953:501).

Um grafo (G) pode ser representado matematicamente através de uma matriz (M) adjacente $[N]*[N]$. Mas existem vários tipos de matrizes, dependendo do tipo de grafo (orientado ou não orientado) e de se atribuir ponderações (matrizes ponderadas) ou não, aos arcos. Pelo meio é ainda possível analisar-se a acessibilidade de cada um dos nós e a acessibilidade geral do grafo (matriz da distância topológica), assim como derivar matrizes (matrizes derivadas) por operações de álgebra, a partir da matriz inicial de conectividade, de forma a melhor compreender a estrutura do grafo, no que respeita aos percursos necessários e possíveis a percorrer para chegar de um nó a todos os outros.

Em síntese, e para uma melhor compreensão do contributo do cálculo de matrizes na análise de redes, a rede vista e representada através de uma matriz permite evidenciar 5 aspectos (Taaffe *et al.*, 1996:256):

Posição: o número de arcos na rede é um indicador importante, conforme se viu pelas medidas de conectividade. No entanto, não é suficiente. Saber qual a posição dos arcos na rede, pelas ligações directas ou indirectas que estabelece entre quaisquer pares de nós, é fundamental.

Ligações directas e indirectas: saber se existe uma relação directa ou indirecta entre nós de uma qualquer rede é importante, na medida que vai afectar os valores dos cálculos e, consequentemente, a interpretação daí retirada.

Atenuação: trata-se da medida da diferença entre ligações directas e indirectas. Estas devem ser acauteladas e devidamente tratadas de forma a não enviesar os cálculos a efectuar através da matriz.

Redundância: remete para a determinação da duplicação de ligações, a qual deve ser considerada e eliminada por mecanismos de cálculo.

Ligações ponderadas: pensar que todos os arcos (ligações) da rede valem o mesmo pode ser um erro grave na análise de um sistema de transportes. Nestas situações deve considerar-se que existem ligações com mais importância relativa que outras, e devem ser levadas em consideração na altura dos cálculos da rede.

Com efeito, da análise de redes pelo cálculo de matrizes podem efectuar-se várias medidas e extrair diversas leituras acerca da rede. O grau de um nó, por exemplo, é uma medida que permite analisar a estrutura interna da rede mediante a medição da acessibilidade individual de cada nó. Esta medida é obtida mediante o cálculo da matriz de conectividade[25] (*C*). Trata-se de uma matriz binária de uma rede directa, em que as linhas representam os nós de partida e as colunas, os nós de chegada. Cada célula da matriz é preenchida com 0 (sem ligação directa) e 1 (com ligação directa).

A soma das linhas $\sum_{j=1}^{n} Cij$ representa o número total de nós na rede que estão conectados directamente com *i* e indica o grau de conectividade do nó respectivo.

Esta medida Esta medida permite, com mais precisão que a simples observação visual do mapa da rede, estabelecer uma hierarquia dos nós. Além disso, permite ainda a avaliação evolutiva do sistema de transportes[26] à medida que o *core* se vai alterando com o tempo, considerando que a rede *G* no tempo *t* é função das características dos seus nós nos tempos *t*-1, *t*-2, …, *t*-n. Assume-se que $G^t = f(n^t)$ e que a construção e reconstrução da rede G^t tem impacto nas características de n^t. Desta forma, a medida expressa-se formalmente por:

$G^1 = f(n^{t-1}, n^{t-2}, \ldots n^{t-n})$.

Todavia, o grau de conectividade de um nó (ou grau do nó) é uma medida de acessibilidade com algumas limitações que devem ser acauteladas e consideradas apenas como uma 1ª etapa de um conjunto de medidas mais versáteis, que contemplam algumas dessas limitações, nomeadamente a inclusão das ligações indirectas (Taaffe *et al*., 1996:259).

Efectivamente, apesar do grau do nó já acrescentar mais informação do que a retira-

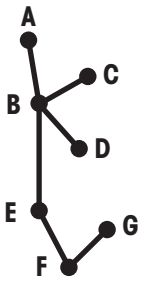
25 Para os grafos G orientados, *Mij* = verdadeiro se e apenas se (*Ni*, *Nj*) forem arcos (*A*) do grafo (*G*). Nestes casos existem pelo menos $(N)^2$ arcos. Para grafos ditos não orientados, como são os deste trabalho, *M*ij = *M*ji é verdade se e apenas se (*Ni*, *Nj*) são arcos de G e falso, em caso contrário. Nestes casos existem pelo menos [*N*]*([*N*]+1)/2 arcos, e *M* é simétrica. Tal permite uma melhor gestão de espaço na tabela e consequentemente em disco, uma vez que basta armazenar e computar a parte superior do triângulo da M (cf. Fig. 9), já que a diagonal também não precisa de ser preenchida, *Mij* quando *i≥j*.

26 cf. Black, W., 2003 – Transportation. A Geographical Analysis. The Guilford Press. London. pp. 57-58.

da do índice gama (γ), porque considera a posição dos arcos (ligações), deixa ainda de fora a importância relativa da existência de ligações directas e indirectas entre os nós. Para ultrapassar esta limitação, o recurso ao cálculo de matrizes é fundamental. O processo de multiplicação de matrizes vai permitir explicitar o número de ligações directas e indirectas ou o número de passos possíveis entre cada um dos nós.

A multiplicação de matrizes consiste numa multiplicação de elemento-a-elemento das linhas de uma matriz, pela coluna de outra matriz (cf. Figura 9).
Por exemplo, para se determinar o valor da linha A, coluna D da matriz $C^2 = C^2_{AD}$, tem

FIGURA 9 GRAFO E RESPECTIVAS MATRIZES C^1 E C^2



C^1	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	0	0	0	0	0
B	1	0	1	1	1	0	0
C	0	1	0	0	0	0	0
D	0	1	0	0	0	0	0
E	0	1	0	0	0	1	0
F	0	0	0	0	1	0	1
G	0	0	0	0	0	1	0

C^1	A	B	C	D	E	F	G
A	0	1	0	0	0	0	0
B	1	0	1	1	1	0	0
C	0	1	0	0	0	0	0
D	0	1	0	0	0	0	0
E	0	1	0	0	0	1	0
F	0	0	0	0	1	0	1
G	0	0	0	0	0	1	0

C^2	A	B	C	D	E	F	G
A				1			
B							
C							
D							
E							
F							
G							

Matriz de multiplicação. Permite verificar se existe ligação entre A e D com um máximo de dois passos. Para o exemplo, essa ligação existe. $C^2AD = (0*0)+(1*1)+(0*0)+(0*0)+(0*0)+(0*0)+(0*0)=1$

Fonte: Adaptado de Taaffe, et al, 1973

de se multiplicar o valor da primeira célula da linha A da matriz C^1, pelo valor da primeira célula da coluna D da matriz C^1, e assim sucessivamente. No final, somam-se os produtos e obtém-se o valor da primeira célula da linha A, coluna D da matriz C^2_{AD}.

Para avaliação da conectividade da rede tem de se multiplicar a matriz de conectividade C^1 por si mesma. A matriz C^2 ($C^{1*}C^1$) representa a conectividade de cada nó a dois passos (o que inclui o vaivém). A matriz C^3 (C^{1*} C^2) dá a conectividade de cada nó da rede em três passos, e assim sucessivamente. A matriz C^n é uma matriz de conectividade multi-passos que se obtém ao dar a C um expoente. O valor máximo do expoente corresponde ao diâmetro da rede, que é o número de passos necessários para ligar os dois nós mais remotos da rede.

A soma ($\sum_{n-1}^{n} C^{ij}$) das *n* matrizes de conectividade C vai resultar na matriz de conectividade T (total), cujos valores já são o resultado das ligações directas e indirectas. A matriz T calcula para uma determinada célula *ij*, o número possível de viagens de *i* para *j*, em *n* passos ou menos. Assim, ao invés de se ter de calcular várias matrizes C (tantas quantas o diâmetro da rede), processo pesado computacionalmente, demorado e desnecessário, para uma leitura fácil da acessibilidade de cada nó basta ter-se a matriz de acessibilidade total T. Formalmente: $T=C^1+C^2+C^3+\ldots+C^n$.

O somatório total das linhas da matriz ($\sum_{linha}{}^{T}$) dá o grau de acessibilidade do nó, ou seja o número de percursos possíveis de ir de *i* para *j*, num número de passos determinado pelo diâmetro da rede. Assim, quanto maior o valor obtido, maior a acessibilidade do nó. Uma vez mais, este exercício é possível de se fazer por observação directa se a rede em causa for pequena. Mas para uma rede complexa, com centenas de nós e arcos, a ajuda dos computadores é imprescindível tornando possível identificar e medir com rigor qual o nó mais acessível, assim como também permite comparar o grau de um nó com os restantes e hierarquizá-los. É ainda possível, caso se deseje, para além da avaliação individual, determinar a acessibilidade total da rede, bastando para isso somar todos os somatórios das linhas da matriz ($\sum \sum_{\text{linhas}}$ = acessibilidade Total), o que corresponde ao número de maneiras possíveis de cada nó estar ligado a todos os outros.

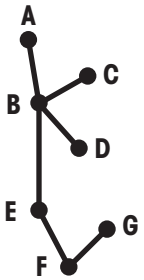
Matriz de Conectividade

A matriz de conectividade é representação mais simples das relações de um grafo. Numa matriz de conectividade[27] é representada a existência ou não de ligação directa entre quaisquer pares de nós. Uma matriz de conectividade é usualmente, do ponto de vista formal, representada por *C*. No entanto, como é possível efectuar operações algébricas de matrizes, a matriz inicial assume a designação de C^1, e designa-se de matriz de conectividade simétrica.

Conforme já confirmado, da análise e cálculo de matrizes podem-se retirar várias e muito úteis leituras acerca do grafo e das relações que nele existem. Uma dessas leituras responde por grau de um nó e indica a maior ou menor acessibilidade desse nó no grafo, o que é um registo da importância relativa de um nó no grafo. O grau de um nó corresponde assim ao número de arcos que convergem para o nó, e que se pode determinar pelo somatório de 'uns' (1), de cada nó na relação directa com os outros nós da matriz. Esta é uma medida facilmente determinada visualmente numa rede simples, mas quando se trata de redes complexas, com centenas ou mesmo milhares de nós e arcos, o recurso às matrizes é imprescindível. No exemplo ilustrado pela Figura 10, o nó mais acessível é o nó B, com um grau de 4.

27 É também usual encontrar-se na literatura da especialidade a designação de Matriz binária, por alusão à tipologia de código usada: 1, para a existência de ligação directa entre os nós; 0, para a situação inversa.

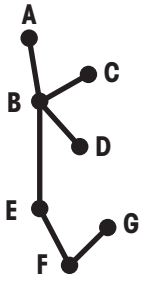
FIGURA 10 GRAFO E RESPECTIVA MATRIZ DE CONECTIVIDADE, C1



	A	B	C	D	E	F	G
A		1	0	0	0	0	0
B			1	1	1	0	0
C				0	0	0	0
D					0	0	0
E						1	0
F							1
G							

Numa matriz de conectividade, o grau de um nó é calculado facilmente pelo somatório da linha. No entanto, pode construir-se uma outra matriz: a matriz de distâncias topológicas (*D*), em que se representa para cada par de nós, o número de arcos necessários para que se liguem seguindo sempre o caminho-mais-curto (cf. Figura 11). Para se determinar o grau de acessibilidade dos nós a partir da matriz *D*, basta verificar na matriz qual o nó que apresenta maior número de mínimas distâncias topológicas, ou seja, o nó que tem mais vezes o número 1 repetido. Ao ler-se a matriz *D*, verifica-se que o nó B repete o valor 1 quatro vezes.

FIGURA 11 GRAFO E RESPECTIVA MATRIZ DE DISTÂNCIAS TOPOLÓGICAS, D



	A	B	C	D	E	F	G
A		1	2	0	2	3	4
B			1	1	1	0	0
C				0	0	0	0
D					0	0	0
E						1	0
F							1
G							

Mas, de uma matriz *D*, é ainda possível determinarem-se outras medidas topológicas de acessibilidade, como sejam:

$$Di = \sum_{n-1}^{n} dij$$

Algoritmo: **índice de acessibilidade de Shimbel (*D*)**
Significado: representa a soma das distâncias topológicas de um nó a todos os outros, do grafo, ou seja, indica o número de arcos a percorrer, num caminho-mais-curto, para se chegar de um nó *i* ao nó *j*.

Algoritmo: **índice de acessibilidade média de Shimbel (D_t)**

$$Dit = \frac{\sum_{j-1}^{n} dij}{n - 1}$$

Significado: representa a média do somatório das distâncias topológicas de um nó a todos os outros nós do grafo.

Algoritmo: **índice de acessibilidade geral do grafo ou índice de dispersão total (*d*)**

$$d = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} dij$$

Significado: representa o somatório dos somatórios das distâncias topológicas de todos os nós entre si, o que dá um valor indicador da dispersão total do grafo, ou seja, quanto mais alto o valor, maior a dispersão do grafo.

Algoritmo: índice de acessibilidade geral ou índice de dispersão médio (*D*)

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} dij}{(n - 1)^* n}$$

Significado: é a média dos somatórios das distâncias topológicas de todos os nós do grafo entre si, o que dá a indicação do valor de dispersão médio do grafo. É útil quando se quer comparar grafos de diferentes complexidades e geometrias da sua estrutura.

Da leitura destes valores é ainda possível retirar mais três indicadores que não só reforçam e complementam a interpretação que se pode retirar das medidas acima, como também contribuir, quer para caracterizar a estrutura do grafo, quer para identificar e classificar os nós do grafo, quanto à sua acessibilidade e centralidade, a saber:

Número associado ou índice de Koning – é uma medida da distância topológica mais elevada de um nó, ou seja corresponde à distância topológica de um nó ao nó que se encontra mais afastado topologicamente no grafo, através do caminho-mais-curto.

Nó central – é aquele que possuir um número associado mais baixo.

Diâmetro da rede – corresponde ao valor mais elevado determinado pela matriz D. Tendo como exemplo a figura 11, o grafo apresenta um diâmetro 4, que corresponde à maior distância topológica observada (cf. número associado).

Matrizes derivadas

As matrizes derivadas permitem ao analista obter grandezas da complexidade do grafo mediante o cálculo do número de percursos diferentes que é possível efectuar entre quaisquer pares de nós, usando um número de arcos igual a *i*. Formalmente, uma matriz derivada determina-se a partir da matriz inicial de conectividade e assume a designação de ordem superior: C^2, C^3, …C^n *ou* T^1,T^2, T^3, …T^n.

Matriz $C^2=C^1*C^1$ (matriz de segunda ordem), que indica o número de ligações possíveis entre quaisquer pares de nós, usando apenas 2 arcos.

Matriz $C^3=C^2*C^1$ (matriz de terceira ordem), que indica o número de ligações entre quaisquer pares de nós, usando apenas 3 arcos.

Matriz $C^n=C^1*C^1*C^1*\ldots*C^n$ (*n* vezes) que dá conta do número de ligações entre quaisquer par de nós, usando apenas *n* arcos.

Quanto às matrizes *Ti*, estas indicam quantas ligações diferentes são possíveis entre quaisquer pares de nós, usando *i* ou menos arcos.

Matriz $T^1=C^1$.

Matriz $T^2=C^1+C^2$ para se determinar o número de ligações diferentes entre quaisquer pares de nós, usando 2 ou menos arcos.

Matriz $T^3=C^1+C^2+C^3$ para se determinar o número de ligações diferentes entre quaisquer pares de nós, usando 3 ou menos arcos.

Matriz $T^n=C^1+C^2+C^3+\ldots+C^n$ para determinar o número de ligações diferentes entre quaisquer pares de nós, usando *n* ou menos arcos.

A importância e o contributo das matrizes T, para a avaliação da complexidade do grafo e de como isso se reflecte na acessibilidade e na centralidade, é medida a partir do número de ordem (*n*) que irá 'esgotar' a matriz, ou seja, permite saber qual o número de ordem da matriz T(*n*), em que deixam de existir zeros. Desta forma, é possível determinar a medida de acessibilidade dos nós (pelo somatório dos valores das linhas) e da acessibilidade geral do grafo (pela soma de todos os elementos da matriz). A medida de acessibilidade será tanto maior, quanto maior for o valor obtido. Esta matriz caracteriza-se por um refinamento da medida de acessibilidade aferida, face à matriz C, uma vez que analisa não apenas as ligações directas (como a matriz C), mas também as ligações indirectas. Desta forma, a hierarquia dos nós será mais descriminante e, por conseguinte, mais representativa da realidade. O grau de descriminação verificado entre a matriz C e a matriz T será tanto maior quanto mais complexa for a rede em análise, isto é, quanto mais nós e arcos existirem.

Não obstante a sua importância, às matrizes derivadas assiste o problema do seu crescimento rápido, a partir da matriz de conectividade *C*, o que condiciona o cálcu-

lo e respectivo processamento, já que da soma e da multiplicação dos valores iniciais chega-se rapidamente a valores muito grandes.

Para minimizar este problema, sem perca das vantagens inerentes ao cálculo de matrizes, Garrinson (1961) propôs as matrizes *TGi*, em que as sucessivas matrizes *Ci* são multiplicadas por um coeficiente *S* (com valores compreendidos entre 0 e 1, sendo que 0,3 é o valor mais vulgar), o que permite uma diminuição do condicionamento provocado pelas multiplicações mais longas em favor da obtenção de valores mensuráveis.

Matriz $TG^n=S*C^1+S^2*C^2+\ldots+SN*C^n$ corresponde de forma proporcional ao número de ligações diferentes possíveis entre quaisquer pares de nós, usando *n* ou menos arcos, multiplicados pelo coeficiente *S*.

Matrizes ponderadas

As matrizes ponderadas constituem uma outra forma de análise topológica, uma vez que permitem atribuir pesos aos arcos e assim colmatar algumas das deficiências existentes nas medidas topológicas dos grafos (Abreu, 2005):

Equivalência – todos os nós são considerados equivalentes e como tal, tendo importância equiparável, assim como os arcos;

Localização – também já identificado para este trabalho, a análise topológica dos grafos negligencia o 'onde?', em favor das relações entre os nós;

Atenuação – as diferenças entre ligações directas e indirectas (e entre diversos graus de indirectas) podem ser muito importantes, mas não são assumidas como tal;

Redundância – não se consegue eliminar os círculos, as viagens ida e volta, quer no todo, quer em partes do grafo, e que só geram 'ruído' e atrasam o processamento da algoritmia;

Ligações – embora assumidas como equivalentes, elas são muitas das vezes diferentes, no que respeita a distâncias, intensidades, etc.

Se o recurso aos SIG e à geocomputação constituem uma preciosa ajuda para ultrapassar algumas das deficiências das análises topológicas, as matrizes ponderadas (*Li*) vêm complementar e providenciar maior rigor, uma vez que com a matriz D, ainda que sejam eliminadas as redundâncias, a distância tem uma métrica topológica, medida em função do número de ligações entre os nós e, por conseguinte, atribuindo igual valor a todas as ligações (leia-se arcos). Com a matriz L, as distâncias são reais e cada ligação é ponderada em acordo com a distância física entre os nós, independentemente da unidade de medida.

De uma perspectiva gráfica, as matrizes ponderadas são igualmente compostas por linhas e colunas diferindo das outras apenas nos valores que preenchem as suas cé-

lulas, as quais correspondem a pesos que representam uma qualquer característica dos arcos. Esta característica tanto pode ser aditiva, como é vulgar no caso das distâncias, como multiplicativa, cujo exemplo típico é o do coeficiente de dificuldade, normalmente expresso em medidas de probabilidade, grau de aptidão ou nível de atrito, na comunicação e no fluxo entre quaisquer nós.

Assim como na matriz binária de conectividade ou na matriz derivada inicial, a matriz ponderada também principia pela ordem primária (L^1), de cargas do grafo. Sendo que para uma matriz ponderada L^2, tem-se:

$$L^2_{ij} = \min(L^1_{ik}(k = 1, ...n) + L^1_{jk}(k = 1,...n))$$

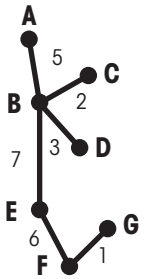
Consequentemente, os valores das matrizes L^n são também o mínimo da soma dos respectivos valores nas matrizes de ordem *n-1*, o que significa duas alterações relativamente aos procedimentos tidos para as matrizes anteriores:

Invés da multiplicação elemento-a-elemento, linha-vezes-coluna, tem-se agora um procedimento de adição elemento-a-elemento; e

Invés da soma dos resultados, o valor que se pretende é o valor mínimo [x+y=min(x*y)].

Para uma clarificação do que acima foi descrito, atente-se ao seguinte exemplo (Figura 12):

FIGURA 12 GRAFO E RESPECTIVAS MATRIZES L^1 E L^2



L^1	A	B	C	D	E	F	G
A	0	5	∞	∞	∞	∞	∞
B							
C							
D							
E							
F							
G							

L^1	A	B	C	D	E	F	G
A					∞		
B					7		
C					∞		
D					∞		
E					0		
F					6		
G					∞		

L^2	A	B	C	D	E	F	G
A					12		
B							
C							
D							
E							
F							
G							

Fonte: Adaptado de Taaffe, et al, 1973

Note-se ainda que sempre que não exista ligação directa entre quaisquer dois nós, a célula adquire o valor de infinito; caso contrário, isto é, caso exista uma ligação directa entre os nós, então a célula assume o valor da distância entre os nós respectivos.

Assim, a matriz L^2 representa a mínima ligação, a dois passos, entre A e E. Ou seja, o somatório dos percursos possíveis entre os nós A e E, a dois passos, um valor mínimo de 12. Senão veja-se:

$(A - A) + (A - E) = 0 + \infty = \infty$
$(A - B) + (B - E) = 5 + 7 = 12$
$(A - C) + (C - E) = \infty + \infty = \infty$
$(A - D) + (D - E) = \infty + \infty = \infty$
$(A - E) + (E - E) = \infty + 0 = \infty$
$(A - F) + (F - E) = \infty + 6 = \infty$
$(A - G) + (G - F) = \infty + 1 = \infty$

O objectivo das matrizes ponderadas é que o processo de matrizes continue até que fiquem preenchidos todos os elementos da matriz, com a excepção da diagonal. Note-se que a matriz L não vai providenciar mais informação acerca da estrutura da rede do que aquele que já se obtém pelas outras matrizes topológicas. Todavia, a vantagem da matriz L é que permite obter um valor referente à acessibilidade dos nós, baseado numa medida de distância mais refinada, porque assente em métricas físicas invés de topológicas.

Mas, se é claro, conforme o testemunham diferentes investigadores (Ascher, 2001; Haggett, 2001; Taylor, 2004 e Gaspar, 2006), apenas para citar alguns com obras publicadas mais recentemente, que as redes de transporte e comunicação são as artérias que alimentam os aglomerados populacionais, e que delas depende a vida, o crescimento, o declínio ou morte desses aglomerados, e sendo estes componentes de uma estrutura maior que é o território no seu todo, então é legítimo dizer que estas redes têm uma função estruturante no território, pois delas depende a articulação e o relacionamento entre os componentes. Está-se assim perante uma forma simplificada da realidade, com o território composto por redes.

Até meados do século XX, a Teoria dos Grafos baseou-se exclusivamente na tentativa de descobrir mais acerca das propriedades das redes e da beleza matemática que continham, do que propriamente da sua estrutura, dinâmica e aplicação. Só passados quase dois séculos é que os cientistas iniciaram uma nova abordagem com base empírica, e com as ciências sociais à frente: Sociologia e a Psicologia (Milgram, 1967; Travers e Milgram, 1969), mas também a Geografia. Só a partir desta data, embora de forma descontinuada (sobretudo no que se refere à Geografia), a investigação passa a centrar-se nas questões relacionadas com a génese das redes e do que releva das relações entre as suas componentes, ou seja, como se formam. Que leis estão na sua origem? Que leis regem a sua estrutura? Que tipo de relações estabelecem e se existem padrões ubíquos para todo o tipo de redes? Desencadeia-se um novo objecto de estudo interdisciplinar, e para alguns, uma nova ciência (Barabási, 2003) e uma nova metodologia.

Capítulo 3
Redes complexas

Após a 'descoberta' da Teoria dos Grafos, por Leonhard Euler em 1736, a mensagem que ficou foi a de que os grafos permitem evidenciar as propriedades, que as redes têm escondidas nas suas estruturas e que limitavam a forma como até aí eram vistas e trabalhadas. Todavia a história e a ciência têm um tempo próprio para avançar, e só após dois séculos de *status quo*, na passagem ao séc. XXI, é que a Teoria dos Grafos veio despoletar o desenvolvimento de uma nova teoria e uma nova forma de fazer ciência: a Teoria das redes[28] ou as Redes complexas[29]. "…the world has changed several times (…), and my world with it. (…) the world has learned the hard way that it is connected in a matter that few people had anticipated and no one understood. (…) a new science has been emerging – one that speaks directly to the momentous events going on around it (…) and unlike the physics of subatomic particles or the large-scale structure of the universe, the science of networks is the science of the real world …." (Watts, 2004).

A Teoria das redes, apesar de constituir matéria de investigação recente, tem sofrido significativos saltos teóricos, fruto de um forte investimento de recursos, de uma capacidade tecnológica evoluída e de grandes bases de dados (Cardillo, *et al*, 2006),

28 Teoria das redes ou redes complexas são ambos termos que é comum encontrar na literatura da especialidade e que significam o mesmo. Nesta dissertação, apesar de se ter optado pelo termo Redes Complexas para título de capítulo, faz-se uso de ambos consoante se considerou mais útil ao entendimento do texto.

29 Sistema complexo é aquele em que o todo é mais do que a soma das partes. Segundo Tenedório, um sistema complexo é "qualquer um que envolva determinado número de elementos, organizados em estruturas que podem existir em diversas escalas. Estes sistemas passam por processos de transformação que não são passíveis de serem descritos por uma única regra, ou seja, não podem ser reduzidos a um único nível de explanação" (2006). Utilizando uma analogia simples, não se pode compreender o cérebro através da análise de um neurónio, tal como não se sabe tudo acerca da rede urbana de um País só pelo estudo de uma cidade.

que têm providenciado sucessivas ondas de experimentações e a formulação de diferentes e novos modelos. Esta mudança de paradigma no estudo das redes, agora mais focada na dinâmica da sua estrutura interna (Watts; Strogatz, 1998) ou na estatística mecânica da sua estrutura colectiva (Barabasi, 2002), procura leis universais na evolução e dinâmica das redes, inclusive das redes geográficas (O'Sullivan, 2000; Batty, 2001; Jiang, 2006; Xu, 2007). Segundo Cardillo, *et al*, 2006, as redes geográficas (ou espaciais) são uma classe especial das redes complexas, cujos nós existem num espaço euclideano bi ou tri-dimensional, e cujos arcos não representam relações abstractas (como as relações entre indivíduos, nas redes sociais), mas sim relações físicas reais, nomeadamente redes de transporte.

Da teoria da aleatoriedade, passando pelas teorias do Mundo pequeno de Milgram (1967), com o coeficiente de *clustering* de Watts e Strogatz, baseadas nas redes sociais, até à teoria do efeito *hub* e das redes *scale free*[30] de Barabási e sua equipa, sobre a internet e a *www*, e seguindo pelas redes biológicas e químicas, a teoria das redes tem evoluído, dispersando-se por vários domínios científicos e caracterizando-se pela ubiquidade das suas propriedades (Strogatz, 2001). A Teoria das redes é o mais entusiasmante objecto de investigação científica do século XXI e representa a mais recente revolução científica: a ciência das redes (Dorogovtsev e Mendes, 2003; Barabási, 2003: 6-8). As redes são omnipresentes nas nossas vidas e desempenham um papel determinante, sobre a forma como nos relacionamos, como evoluímos geneticamente, como raciocinamos, como nos movimentamos no espaço, etc., sendo a ciência das redes por excelência uma ciência interdisciplinar. (Bersini, 2005).

Apesar do interesse dos geógrafos pelo estudo das redes de transportes e comunicação se manifestar com alguma intensidade desde a década de 60 do século XX (Shimbel, 1953; Kansky, 1960/3; Garrison, 1960; Nystuen e Dacey, 1961; Garrison e Marble, 1962: Taaffe *et al*, 1963; Haggett e Chorley, 1969), com o início da década de 70 e 80, ocorreu um afastamento não apenas do tema, mas também das metodologias de base matemática, resultado de uma dispersão dos geógrafos por outros assuntos. Assim, apesar da interdisciplinaridade dos estudos acerca desta nova ciência, o cunho que se lhe confere é dominantemente de base Matemática e de base Física, ficando a Geografia, mesmo nos estudos acerca das redes de infra-estruturas espaciais, isto é, redes de transportes e comunicações, ignorada (Gorman e Kulkarni, 2003; Gastner e Newman, 2006; Xu e Sui, 2006), no que respeita às propriedades Mundo pequeno e influência destas sobre o território.

Pelo carácter interdisciplinar e pelas descobertas que tem acumulado por diferentes áreas do saber, por ter uma base matemática originária na Teoria dos Grafos e sobretudo pela incipiente aplicação na Geografia – apesar do apelo de Michael Batty, que de resto constitui motivação suficiente para se abordar o estudo das redes como "contemporary geographical theory applicable and praticable" (Batty, 2003:3) –, a Teoria das redes e os modelos empíricos desenvolvidos são fundamentais para uma Geografia das redes, assente nas relações (Sui, 2004; Jiang, 2006), na dinâmica

30 De agora em diante passa-se a referir como Redes sem escala.

dos componentes, e na complexidade que as caracteriza, ao invés de uma geografia das localizações, estática e reducionista. Que percurso histórico as Redes complexas têm traçado? Quais os principais precursores das Redes complexas? Que modelos encerra e que descobertas foram sendo feitas? Que implicação e aplicação tem em Geografia? São algumas das questões que se propõe responder neste capítulo.

3.1. A TEORIA DA ALEATORIEDADE

Paul Erdõs e Alfred Rényi são dois matemáticos húngaros que em 1959 contribuíram para uma nova etapa na evolução da Teoria das redes, ao criarem a teoria da aleatoriedade (Barabási, 2003: 16-24; Watts, 2006:43), resultado da combinação entre o modelo dos grafos aleatórios e o conceito de probabilidade. O conceito de probabilidade, teve cronologicamente origem nos jogos de azar e tinha o propósito de medir a probabilidade de ocorrência, ou não, de determinado fenómeno através da aplicação do quociente entre o número de casos favoráveis e o número de casos possíveis.

O modelo dos grafos aleatórios consiste num conjunto de n nós a que se vão adicionando aleatoriamente arcos de forma a ligá-los. No entanto, diferentes grafos aleatórios produzem diferentes probabilidades de distribuição, ou seja, para um determinado grafo G ele é função de (n, p), em que n representa os nós e p, a probabilidade de um arco se ligar a um determinado nó. Para Erdõs e Rényi, as redes formam-se aleatoriamente. Os nós já existem ou podem ir surgindo posteriormente à medida que a rede aumenta (podem ser pessoas, no caso de uma rede social; podem ser células, no caso de uma rede biológica; podem ser computadores, no caso de uma rede informática, etc.) e os arcos que os ligam e formam as redes surgem casualmente.

As regras que gerem e estão na formação das redes, dos mais variados domínios (sociais, Internet, biológicas, económicas, transportes, geográficas, entre outros), são diversas e muito diferenciadas. Encontrar um modelo que sirva, não só para analisar e compreender os mecanismos estruturais e individuais que caracterizam as redes de um determinado domínio, mas sim todas as redes é o objectivo principal dos cientistas, a saber, a procura de modelos que demonstrem verdades universais, que é o mesmo que dizer, encontrar soluções simples para problemas complexos.

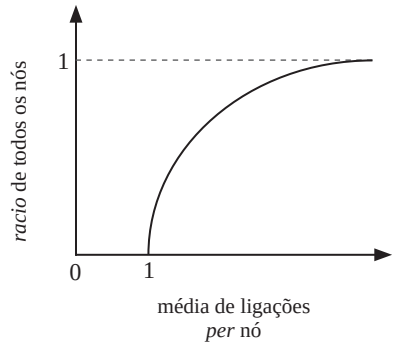
Quando Erdõs e Rényi propuseram a teoria da aleatoriedade estavam a propor exactamente isso. Uma solução simples, que o formalismo matemático podia suportar, para uma realidade complexa, cujas soluções tardavam. "Since different systems follow such disparate rules in building their own networks, Erdõs and Rényi deliberately disregarded this diversity and came up with the simplest solution nature could follow: connect the nodes randomly." (Barabási, 2003:17) Qual então a mensagem na teoria da aleatoriedade de Paul Erdõs e Alfred Rényi? A premissa da teoria reside em dois princípios:

- O princípio da igualdade, ou da democracia das redes. Considerando que os arcos ligam os nós ao acaso, formando assim as redes, pode conceber-se a ideia de que

todos os nós têm a mesma probabilidade de pertencer à rede (podem existir nós que não pertencem a nenhuma rede), i.e., serem conectados à rede. Num grafo aleatório não existe nenhum critério que privilegie umas ligações em relação a outras, logo caracteriza-se pela probabilidade *p* de se estabelecer uma ligação *n(n-1)/2* de quaisquer *n* nós. Formalmente, o número médio de arcos que um nó tem, expressa-se por *p(n-1)*, uma vez que cada ligação serve dois nós.

- O princípio, a que os físicos chamam de transição[31]. Considere-se uma situação em que existem mil botões no chão e que, ao acaso, se comece a ligá-los por fios. Quando se tem apenas um fio a ligar dois botões, significa que a rede terá apenas dois botões numa fracção de mil, o que dá um rácio de quase 0; pelo contrário, caso se ligue cada botão com todos os outros, então tem-se a rede completa e o rácio será de 1. A questão agora é: qual o rácio para todas as situações intermédias? Como será normal, no início vai ligando-se botão-a-botão, provavelmente botões isolados, mas a determinada altura, quando já se tiver um número significativo de fios a ligar botões, i.e., quando cada botão já tiver em média um fio que o ligue à rede, então a fracção do grafo passa subitamente de 0 (o que indicava desconectividade) para 1 (total conectividade). Este princípio da transição é consensualmente tido pela comunidade científica, como uma característica dos sistemas complexos.

FIGURA 13 PRINCÍPIO DE TRANSIÇÃO, NA TEORIA DA ALEATORIEDADE



Adaptado de Barabási, 2003

Apesar da simplicidade do formalismo, aTeoria dos Grafos aleatórios de Erdõs e Rényi está carregada de uma sofisticada componente analítica e serve de base de explicação para muitos fenómenos de sistemas complexos, e.g, difusão de epidemias, rumores, informações ou mesmo modas culturais e comerciais (Watts, 2004:46-47). De facto, o princípio de transição, ou seja o arco que liga os nós, e que permite que o grafo passe de uma fase de isolamento para uma fase de total conectividade, tem a particularidade de ser capaz de distinguir quais os nós que são componentes ou não de um determinado sistema (caso não se estabeleça uma ligação entre alguns dos

31 *Phase transition* (Watts, 2006:46)

nós existentes, então é porque esses nós simplesmente não faziam parte do sistema, i.e., da rede), assim como da velocidade e dispersão da informação, i.e., do fluxo da informação (doenças, pessoas, dinheiro, boatos, etc.) na rede.

Apesar do avanço dado na exploração de leis que as redes encobrem, a Teoria da aleatoriedade proposta por Erdõs e Rényi foi alvo de crítica pelos seus pares, com base no testemunho de que as ligações não ocorrem ao acaso; pelo contrário, as pessoas, por exemplo, tendem a estabelecer relações preferenciais. O mesmo se passa noutras redes, que não a social. Veja-se, por exemplo, o que se passa no domínio da biologia. As moléculas que compõem o corpo Humano, caso se relacionassem ao acaso, a informação que passa entre elas permitiria, por exemplo, que se escrevesse esta dissertação? Não.

A conclusão a que se chegou, é que as redes do mundo real não podiam ser explicadas com base apenas na teoria da aleatoriedade. (Watts, 2006:47). Mas então porque é que dois matemáticos brilhantes como Erdõs e Rényi não pensaram nisto? Porque ambos estavam mais interessados na beleza matemática e na descoberta feita do que na aplicabilidade que ela poderia ter para a compreensão e resolução de problemas reais (Barabási, 2003:23). É a propriedade da rede e a beleza do formalismo matemático que monopolizava o interesse dos autores e não a estrutura ou aplicabilidade real das redes e da teoria que encerra.

3.2. A TEORIA DO 'MUNDO PEQUENO' E DOS SEIS GRAUS DE SEPARAÇÃO

Em 1929, um jovem escritor húngaro de nome Frigyes Karinthy publicou um livro com uma série de pequenos contos. Um desses contos intitulava-se: "'Láncszemek' or 'Chains'" (Watts e Strogatz, 1998), onde o autor escrevia que qualquer pessoa no Mundo, está apenas a cinco conhecimentos-intermédios de qualquer outra. Um vendedor de gelados em Lisboa e um prémio Nobel da Física; um aluno de geografia da universidade de Lisboa e um cozinheiro *gourmet*, nos Estados Unidos. Todos separados por um máximo de 5 pessoas até encontrarem alguém que pudesse estabelecer uma ligação entre os dois. Esta tese de Karinthy, revolucionou a Teoria dos Grafos e deu o mote para o estudo empírico do psico-sociólogo Milgram, (1967): a teoria Mundo pequeno, que acabou por ficar célebre como, a teoria dos seis graus de separação[32].

Não é conhecido que o termo 'Mundo pequeno' tenha sido alguma vez proferido por Milgram. Segundo se sabe, o termo foi inventado por John Guare em 1991, quando deu o título a uma peça de teatro, de grande sucesso na Broadway e que mais tarde originou o filme de mesmo nome (Barabási, 2003:29). Não obstante, foram os estudos de Milgram que originaram a teoria, ainda que sem o cunho mediático que Guare depois lhe deu porque obviamente, existem muito mais pessoas a interessarem-se por teatro e cinema do que por artigos científicos sobre a teoria das redes.

32 Milgram, S. (1967) - The Small-World Problem. *In* Psychology Today, vol.1, nº1. Ver também: Watts, D. (2004) - Six degrees. The science of a Connected Age.

O empirismo dos estudos de Milgram pretendiam arranjar uma forma de demonstrar e verificar a distância, medida em número de pessoas, entre quaisquer duas pessoas nos Estados Unidos. A experiência baseou-se na seguinte metodologia (Milgram, 1967:64):

- Escolher duas pessoas-alvo (a esposa de um estudante graduado de Massachusetts, residente em Omaha, Nebraska, que representa a população de início; e um corretor da bolsa, a residir em Sharon, Massachusetts, que representa a população-alvo);
- Escolher as cidades para onde procuraria as pessoas-contacto (Wichita, Kansas, Omaha);
- Escrever e enviar cartas, para algumas pessoas escolhidas ao acaso, residentes nestas cidades. Nessas cartas, Milgram pedia às pessoas para participar neste estudo, sobre a sociedade americana, da Universidade de Harvard.
- As cartas continham uma pequena descrição do estudo, uma fotografia, nome e endereço das pessoas-alvo, e instruções de como a pessoa que recebesse a carta, devia proceder. As instruções eram:
- Adicionar o seu nome no rosto e fundo de página, da folha enviada na carta, para que a pessoa que em seguida recebesse a carta, pudesse identificar o remetente anterior e melhor perceber o propósito da experiência;
- Destacar um dos postais contidos na carta, o preenchesse e o reenviasse para a Universidade de Harvard. Isto era muito importante, porque permitia a Milgram seguir o percurso da carta;
- Caso conhecesse pessoalmente a pessoa-alvo identificada, pedia o favor de lhe enviar a carta directamente;
- Caso não conhecesse pessoalmente a pessoa-alvo indicada, então que fizesse seguir a carta para um conhecido seu, que considerasse poder conhecer pessoalmente a pessoa-alvo. Pedia o favor de não tentar contactar a pessoa-alvo.

Apesar de algumas mentes mais cépticas, a experiência de Milgram acabou por permitir-lhe concluir que, em média, apenas 5,5 pessoas-contacto ou seis graus de separação, intermedeiam quaisquer duas pessoas no mundo. Segundo Milgram, vivemos numa sociedade em rede, na qual ninguém está desconectado, antes pelo contrário estamos todos à distância de "…a few handshakes from anyone else". (Barabási, 2003:30) ie. vivemos num 'Mundo pequeno' (Watts e Strogatz, 1998).

Todavia, e apesar do sucesso da experiência e de vencido o cepticismo de alguns dos seus colegas, a teoria não estava imaculada de falhas e muito menos isenta de críticas. Alguns anos mais tarde, começam a surgir algumas questões sobre o que se passará noutras redes, que não as sociais. Será que a teoria dos seis graus de separação se aplica igualmente a outras redes, como por exemplo, a Internet? Será que uma rede gigantesca, como a da Internet, com biliões de nós, também se resume a um 'Mundo-pequeno'? Será que a Teoria das redes permite 'encolher o mundo'? Será que a teoria do Mundo-pequeno contém um formalismo adaptável à topologia da Teoria dos Grafos?

Se virmos a questão sob uma perspectiva puramente matemática, conforme Watts explica (2004:39), então o mundo em que se vive é efectivamente pequeno. Tem-se essa noção, e com frequência se diz, quando num evento de natureza social, alguém é apresentado a alguém, e menciona um amigo ou conhecido, que surpreendentemente (ou não) é também amigo ou conhecido de outra pessoa. Mas voltando à perspectiva matemática do Mundo pequeno, considere-se que uma pessoa tem cem amigos, e que cada um desses cem amigos tem também cem outros amigos. Segundo a teoria das redes (e dos grafos), a pessoa inicial estaria a apenas a dois graus (duas ligações) de cem vezes cem pessoas amigas, ou seja, dez mil pessoas; a três graus, seria amigo de perto de um milhão de pessoas; a quatro graus, cem milhões de pessoas, e a cinco graus, cinco biliões de pessoas, o que é mais ou menos a população do mundo.

Sintetizando, pode dizer-se que essa pessoa está a seis graus de distância de qualquer outra pessoa do mundo. Assim, apesar de o estudo ter base empírica, faltava-lhe profundidade científica, que só veio a acontecer com o formalismo de Watts com o recurso à Teoria dos Grafos (Watts e Strogatz, 1998). É a partir deste ponto que a Teoria das redes adquire no seu formalismo os princípios topológicos da Teoria dos Grafos e, simultaneamente, se percebe a falácia e dificuldade matemática do Mundo pequeno.

Por outro lado, se olharmos para a questão do Mundo pequeno, numa perspectiva social, então começa-se logo por achar estranho o facto de alguém ser amigo de cem pessoas. A amizade é rara, além de que a probabilidade de dois amigos de um amigo comum serem amigos não pode ser igual à probabilidade de quaisquer duas pessoas no mundo.

Considere-se então um número mais razoável, de dez amigos e pergunte-se a esses dez amigos para indicarem quais os seus dez amigos. A probabilidade de se encontrar amigos comuns é muito grande, como será natural. Além disso, a rede não é estática, ela tem tendência a desenvolver-se. Esta observação, apesar de não retirar a importância e validade da teoria do Mundo pequeno de Milgram, acrescenta uma nova visão das coisas. O Mundo é pequeno, mas é também altamente organizado em *cluster's* e varia com o tempo. Daqui se formalizou o que agora se designa na literatura da especialidade por Problema do Mundo pequeno: um mundo em rede, em que os nós estão em média a distâncias muito curtas uns dos outros (elevada conectividade), e que formam *cluster's* entre si (Watts, 2004; Jiang, 2006; Xie e Levinson, 2006; Xu e Sui, 2007).

Sobre a problemática do Mundo pequeno e da sua aplicabilidade geográfica, já Batty afirmava que aí poderia residir a chave para a compreensão do crescimento e do funcionamento das cidades. "No one so far as tried to develop small world theory for cities but, in the quest to see how our cities function and might function better, a new understanding is needed. The current fascination for network growth is general and small world theory in particular might hold the key." (Batty, 2001: 638), o que coloca o assunto como um problema interessante de um ponto de vista geográfica. A este

propósito, Sui explora a relação entre o Problema do Mundo pequeno e a Geografia, fazendo menção à Primeira Lei da Geografia ou *Tobler's Fisrt Law* (TFL). Segundo Sui, e do ponto de vista geográfico, Milgram apenas conseguiu imaginar o Problema do Mundo pequeno, por ter tentado, de forma empírica, verificar a veracidade de TFL, nas redes sociais (Sui, 2004:273).

3.3. A DINÂMICA DAS REDES: O MODELO DE WATTS E STROGATZ E O EFEITO DE VIZINHANÇA

A teoria do Mundo pequeno consistiu um avanço importante na ciência das redes, uma vez que permitiu adequar o formalismo matemático da Teoria dos Grafos às redes reais, mais particularmente às redes sociais, cujas ligações estabelecem métricas que permitem classificar a estrutura da própria rede. Estas ligações não-euclidianas, mas de uma métrica derivada das distâncias topológicas, são muito diferentes das dos trabalhos clássicos, essencialmente descritivos, e permitem descobrir padrões que até então estavam encobertos pela complexidade dos fenómenos (Potrykowsji e Taylor, 1982:16; Gorman e Kulkarni, 2003:3). A partir dela, vários modelos e métricas foram sendo criados e.g. "blokmodels, hierarchical clustering, and muldimensional scalling" (Watts, 2004:48), mas todos com um ponto e objectivo comum: fazer o mapa da rede, independentemente, do tipo de rede.

Marc Granovetter, um sociólogo das escolas de Harvard e da MIT, publicou em 1983 um artigo sobre a importância das ligações sociais fracas nas nossas vidas[33], onde teorizava acerca da relativa maior importância social das relações fracas entre indivíduos (os conhecidos, invés dos amigos) e da influência que têm na evolução e dinâmica das redes. Esta é uma sociedade bastante diferente daquela definida pela teoria Erdõs-Rényi.

Segundo Granovetter, um indivíduo possui um conjunto de amigos próximos, isto é, um *cluster* de amigos; por sua vez, esses amigos podem eles próprios terem um outro conjunto de amigos próximos e por sua vez, cada um deles pode ter um outro conjunto, não de amigos, mas de conhecidos, formando um outro tipo de *cluster*, agora de ligações mais fracas do que aquelas exibidas pelos *clusters* de amigos.

Nesta assunção da realidade, a rede social de Granovetter é, aquilo que na Teoria dos Grafos se apelida de grafos completos, ou seja, o *cluster* passa a ser constituído por um grupo de nós (indivíduos) ligados por arcos (revela a força das ligações entre os indivíduos) e em que cada par de nós distintos é adjacente. Formalmente, um grafo completo traduz-se por K_n, em que k significa completo e $_n$, o número de nós do grupo ou *cluster*. (Wilson, 1995:16)

Com esta teoria, Granovetter queria dizer que cada *cluster* estava ligado a outro *cluster*, por relações de conhecimento (não de amizade), ou seja, ligações a que chamou

33 Granovetter, M. (1983) - The Strength of Weak Ties. A Netowrk Theory Revisited *in* American Sociological Association, vol. 1:201-233.

de fracas. Nesta perspectiva, e segundo Granovetter, são as ligações fracas as mais importantes numa rede social, na medida em que são elas que permitem a comunicação para fora dos *cluster's* mais densos (onde as ligações são fortes). Sem elas, no limite, estes *cluster's* tenderiam a desaparecer, momento em que passasse a figurar apenas um indivíduo (ausência de rede).

A base empírica que permitiu a Granovetter testar a sua teoria, baseava-se na passagem de um inquérito junto de alguns jovens trabalhadores fazendo-lhes directamente a pergunta: Quem o ajudou a conseguir este emprego? Foi através dum amigo? As respostas, na sua maioria, foram: "No, it was not a friend. It was just an acquaintace." (Barabási, 2003:41)

Não obstante o facto de a sociedade de Granovetter se tratar de uma rede fragmentada de grafos completos ligados por fracos laços sociais, cujo modelo se provou ser bastante ajustado à sociedade que conhecemos, não permite responder de forma cabal a todas as questões e críticas levantadas à teoria da aleatoriedade de Erdõs e Rényi. Nomeadamente, sobre o facto de este modelo poder ser aplicado, não apenas às redes sociais, mas a todo o tipo de redes, assim como da explicação para o facto de terem de existir leis que governem as ligações entre os nós, negando a aleatoriedade.

A resposta para estas, bem como para outras questões ainda não pensadas à altura, surgiram quase trinta anos depois com Duncan Watts[34], quando numa conversa telefónica com o seu pai, este lhe falou do que era à data um assunto de café: a teoria dos seis graus de separação. O assunto despoletou o interesse de Watts, que decidiu propor ao seu orientador o abandono do projecto em curso, para se dedicar ao estudo das redes sociais. Steve Strogatz, seu orientador, acedeu à proposta sob a condição de essa aventura ser apenas uma paragem no projecto dos grilos, no caso de ao fim do semestre não haver nada de interessante nesse estudo das redes sociais, então deveria parar e voltar ao seu projecto de tese original. Tal não se verificou. Watts e Strogatz acabaram por contribuir para mais uma etapa na evolução da Teoria das redes ao introduzirem uma nova medida topológica: o coeficiente de *clustering* (cf. Tabela 2, em Anexo).

Apesar do total desconhecimento que alegaram (Watts, 2004:69) acerca das então teorias de Erdõs-Rényi, Milgram ou Granovetter, os estudos já realizados sobre o 'grilar' sincronizado dos grilos não foi de todo inútil. A questão de partida para o estudo das redes sociais foi o seguinte: como conseguem os sistemas demonstrar coordenação global, quando aparentemente não existe nenhuma força ou autoridade central que os impele? Veja-se precisamente o caso dos grilos; ou ainda, alguns tiques e expressões, que grupos de pessoas, que vivem durante muito tempo em conjunto, adquirem.

34 Jovem matemático a desenvolver a sua tese de doutoramento na Universidade de Cornell em meados da década de 1990, em que investigava sobre a razão dos grilos 'emitirem sons' de forma sincronizada.

Barabási refere-se a este fenómeno como tratando-se duma lei: a lei da auto-organização[35]; algo que tem despertado bastante interesse no seio da Matemática e da Física, na última década do século XX. "Spontaneous and mysterious, synchronized clapping offers a wonderfull example of self-organization…" (2003:45); enquanto Watts prefere falar de dinâmica: dinâmica da rede (que relaciona-se com a criação e a quebra de ligações e suas implicações na estrutura da rede) e dinâmica na rede (acerca do comportamento dos nós e da influência, quer de uns nós noutros, quer na estrutura da rede). "…how coherent global activities emerge from the interactions of peers, without any centralized authority or control? (…) network structure is critical to this question, but so is dynamics." (Watts, 2004:54)

À questão colocada: Qual a estrutura de uma rede, seja de grilos ou pessoas, em que os indivíduos influenciam-se mutuamente? Já a teoria da aleatoriedade de Erdos-Rényi tinha respondido com o acaso e a probabilidade. No entanto, Ganovetter provou posteriormente que a sociedade não funciona dessa forma. As coisas não acontecem simplesmente por acaso e com probabilidades equitativas, elas são levadas a portarem-se como se parecesse simplesmente casual. Segundo ele, os indivíduos fazem todos parte de *cluster's*, em que todos interagem com todos.

Tendo por referência uma teoria da conectividade de Anatol Rapoport[36], da década de 1950, e o modelo de rede aleatória (Watts, 2004:58), como explicação para a evolução das redes, Watts e Strogatz desenvolveram a sua própria teoria acerca das redes: O Problema Mundo-pequeno[37].

Publicado na revista *Nature* em 1998; o artigo de Watts e Strogatz tem a originalidade de conseguir conciliar a teoria da aleatoriedade de Erdõs-Rényi com a teoria de *cluster's* de Granovetter. O artigo apresenta ainda duas notas de referência (Barabási, 2003:51 e Miceli, 2006): o modelo de *cluster's* da rede, formalizado pelo coeficiente de *clustering*; e o facto de as redes não serem apenas estruturas de nós e arcos a ligá-los, mas sim estruturas de nós e arcos a ligá-los que evoluem com o tempo, devido à dinâmica dos nós.

A abordagem de Watts e Strogatz consistia no seguinte: Considere-se um modelo em círculo (Figura 14), com n elementos e que cada elemento se relaciona com k outros elementos. Que tipo de grafos se podem obter? Por um lado tem-se um grafo regu-

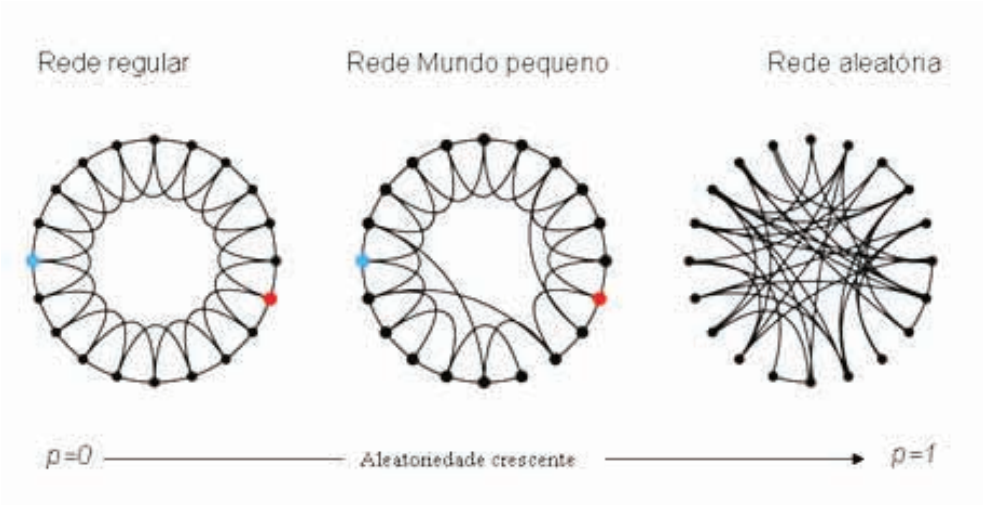
35 A auto-organização é definida como a emergência espontânea de estruturas macroscópicas organizadas em desequilíbrio, devido às interacções colectivas entre um elevado número de objectos microscópicos à medida que reagem e se adaptam ao meio ambiente. A dinâmica de um sistema não pode ser entendida através da decomposição do sistema nas suas partes constituintes. A teoria da auto-organização sugere que interacções locais insignificantes podem, eventualmente, conduzir a uma estrutura global qualitativamente diferente (Rocha; Morgado, 2007, cit. Wu, 1998; Batty, 1995)

36 Matemático da Universidade de Chicago, que durante a década de 1950 fez parte do grupo *Committee on Mathematical Biophysics*, e onde aplicou a teoria das redes e dos grafos, no estudo da dispersão de doenças num determinado contingente populacional. (Watts, 2004:54-61)

37 O Problema Mundo pequeno é diferente de Teoria do Mundo pequeno. O primeiro implica duas medidas estatísticas, nomeadamente a distância mais curta e o coeficiente de *clustering*; o segundo implica somente o conceito de número médio de arcos que intermedeiam qualquer ligação entre quaisquer pares de nós de uma mesma rede.

lar em que cada elemento se relaciona apenas com os elementos seus vizinhos. Por outro lado, temos um grafo aleatório, no qual as *k* ligações do grafo se distribuem aleatoriamente por cada elemento *n*-1, para diferentes valores probabilísticos *p*.

FIGURA 14 MODELO DE WATTS E STROGATZ E O EFEITO DE VIZINHANÇA



Adaptado de Watts, 2004

Segundo o modelo apresentado (cf. Figura 14), e verificando a rede regular com os nós dispostos ao longo do círculo, estabelecem-se relações locais entre cada nó e os nós vizinhos (os dois que o antecedem e os dois que o sucedem sobre o anel). Segundo a rede regular, com probabilidade *p=0*, substitui-se cada uma das ligações locais por ligações aleatórias e então passa-se a ter *p=1*. Pelo meio tem-se ligações locais que são parcialmente substituídas por ligações aleatórias.

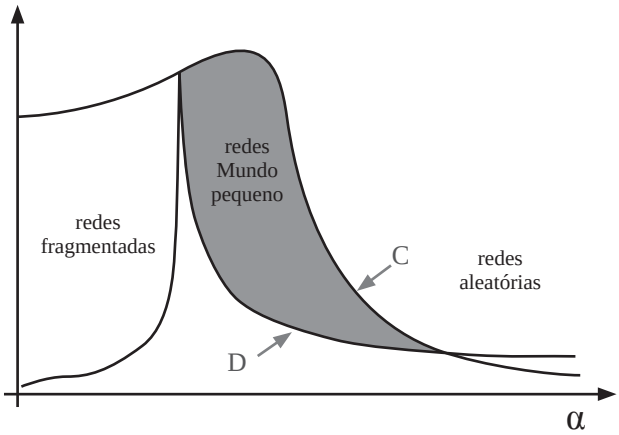
Em síntese, tem-se por rede Mundo pequeno, qualquer rede com uma certa ordem escondida entre um estado de aleatoriedade e de regularidade (Jiang, 2006:260), ou seja, que tem a particularidade de terem altos índices de 'clusterização', próprio das redes regulares e simultaneamente, distâncias mais-curtas entre os nós da rede, próprio das redes aleatórias. Estas são propriedades que muitas redes espaciais, ou seja, redes com os nós devidamente georreferenciados apresentam, mas que têm sido muito pouco estudados (Xu e Sui, 2007:190; Gorman e Kulkarni, 2003).

Todavia, aquilo que até aqui os autores conseguiram provar foi, que a teoria da aleatoriedade não servia para justificar a estrutura das redes sociais, apesar de as suas intenções serem bem mais ambiciosas. Foi perante tal situação, que Watts e Strogatz propuseram a conciliação entre a sua teoria de *cluster's* e a teoria da aleatoriedade

de Erdõs-Rényi. Ou seja, se se quiser contactar com alguém conhecido, mas que está do outro lado do mundo, não é preciso de ir de amigo em amigo; bastará apelar a outra rede e estabelecer uma ligação directa com o *cluster* de amigos, que entretanto o nosso amigo foi desenvolvendo. Graficamente, isto traduz-se no traçado de uns quantos arcos aleatoriamente no círculo.

O surpreendente é que esta forma expedita de resolver o problema vai, como é óbvio, diminuir drasticamente a distância topológica (*D*) entre os indivíduos, mas pouco interfere com o coeficiente de *clustering* (*C*), que se mantém quase inalterado (Figura 15), ou seja "Huge networks do not need to be full of random links to display small world features. A few such links will do the job." (Barabási, 2003:53).

FIGURA 15 COMPARAÇÃO ENTRE CAMINHO-MAIS-CURTO (D) E COEFICIENTE DE CLUSTERING (C)



Adaptado de Watts, 2004

Todavia, para que a teoria ganhasse espessura científica entre os pares, os autores decidiram que tinham de formular uma medida quantitativa de análise de redes. Foi criado o coeficiente de *clustering (Cc)*[38], medida que serve para determinar se um grafo tem a propriedade de Mundo pequeno e da coesão ou força das ligações na rede. Para aplicar o *Cc* tem de se considerar o conceito de vizinhança *(V)* de um nó *ni*, aos nós directamente conectados, de forma que:

$$Vi = \{n,\} : a_{ij} \in A$$

Em que *a* corresponde ao arco que liga directamente ao nó e *A*, o conjunto de arcos do grafo. Sendo que o grau *(ki)* de um nó *ni* depende do número de arcos que determinam a vizinhança de *ni* $|Ni|$.

38 Dorogovtsev e Mendes (2003).

Assim, o *Cc* de um nó *ni* é proporcional ao número de ligações vizinhas a dividir pelo número de ligações possíveis. Para um grafo não orientado, *aij* e *aji* são equivalentes, logo o nó *ni* tem *ki* vizinhos e,

$$\frac{k_i(k_i - 1)}{2}$$

são arcos passíveis de existir entre quaisquer dois nós vizinhos. Desta forma, o *Cc* para um grafo não orientado e não planar pode-se definir formalmente por:

$$C_{C_1} = \frac{2\,|\{a_{jk}\}|}{k_i\,(k_i - 1)} \; : n_j, n_k \in V_i, a_{ij} \in A$$

Para intervalo de valores compreendidos entre {0, 1}, sendo que 1 significa que qualquer nó vizinho *ni* está também conectado com qualquer outro nó do grafo; e 0, nos casos em que quaisquer nós *ni* não têm vizinhos e consequentemente não se ligam a nenhum outro nó do grafo (Dorogovtsev e Mendes, 2003). O *Cc* total de um grafo consiste na média dos *Cc* verificados para cada um dos nós do grafo.

Efectivamente, continuando a tomar por exemplo uma rede social, a probabilidade de dois amigos de um amigo comum se conhecerem tem de ser bastante superior à probabilidade de quaisquer duas pessoas se conhecerem. Na terminologia dos grafos, isto traduz-se em $Cc \leq 0{,}5$, o que significa que estamos na presença de uma rede em que os indivíduos denotam relações fracas; se, $Cc > 0{,}5$ ou $C = 1$, então significa que a rede evidencia relações fortes.

Todavia, esta fórmula está pensada apenas para grafos não orientados e não planares, ou seja grafos que permitem que os arcos se possam cruzar sem que se tenha de criar mais um nó. Para grafos planares, não orientados, teve de se adaptar a fórmula de acordo com o número de ligações máximas possíveis (cf. Cap. 2), a saber:

Nº máximo (C_{max}) de ligações possiveis:

$$C_{max} = 3\,(N - 2), \in N > 2,$$

em que N corresponde ao número de nós do grafo (cf. Cap. 2). Mas como, para além de planar, o grafo também é não orientado, então a fórmula passa a ser:

$$C_{max} = \frac{3(N - 2)}{2}$$

Neste caso, o *Cc* de um nó *ni*, com *ki* vizinhos, de um grafo planar expressa-se formalmente por:

$$C_{C_1} = \frac{Ki}{3(k - 2)}$$

Nota-se que o *Cc* foi sido criado para analisar e avaliar os nós da rede, e não a estrutura da rede. Contudo, do somatório das ligações entre os vizinhos mais próximos

e todos os nós da rede, permite determinar o *Cc* médio, e assim avaliar do grau de *clusterização* da rede. De salientar, a semelhança entre o *Cc* e a medida de conectividade índice gama (γ) de Kansky (cf. Cap. 2 e Cap. 6).

Em suma, a revelação científica de Watts e Strogatz do Problema Mundo pequeno baseia-se em duas medidas estatísticas: a média dos caminhos mais-curtos D (índice de Shimble, das medidas de acessibilidade, cf. Cap.2) e o coeficiente de *clustering* (Cc). O que lhes permitiu concluir, após vários estudos empíricos, que as redes reais não são, nem totalmente regulares, nem totalmente aleatórias. Pelo contrário, elas exibem propriedades de ambas, i.e., simultaneamente muito conexas, mas também com elevada 'clusterização' dos seus nós (Xu e Sui, 2007).

Outro grande contributo, da descoberta de Watts e Strogatz, foi o do terem retomado o interesse pelas redes, nos vários domínios científicos, o que levou a um significativo aumento, quer do número de trabalhos e, consequentemente, de artigos publicados, mas também da evolução mais acelerada das teorias, ao que não é também alheio o incremento da computação.

3.4. OS *HUBS* NAS REDES E O FIM DO MODELO ERDÕS-RÉNYI

Por altura da publicação, em 1998, do artigo de Watts e Strogatz acerca da teoria *cluster's*, estava a equipa de investigação de Barabási[39] ocupada a estudar a estrutura das redes complexas, tais como a *world wide web* (*www*), ainda sob orientação do modelo Erdõs-Rényi. No entanto, uma vez entendido o alcance da teoria conciliadora do Mundo-pequeno e da teoria da aleatoriedade, assim como as implicações que tem sobre a estrutura das redes, convenceram Barabási e sua equipa a re-orientarem a sua investigação.

Todavia, ao confrontarem os primeiros resultados obtidos pelo computador, acerca das suas redes *www* constatam que existem nós que têm bastantes mais ligações que a média verificada para todos os outros nós da rede. Tal resultado suscitou-lhes admiração, na medida em que isto era algo que, quer a teoria da aleatoriedade, quer a teoria de *cluster's* não permitiam. Ao contrário do verificado nas redes aleatórias e nas redes Mundo pequeno, em que existe uma certa homogeneidade nos graus dos nós, no que respeita à sua conectividade, tal não se constata na Web. Esta descoberta marcou, talvez depois da descoberta de Euler e da Teoria dos Grafos, o maior salto científico no estudo das redes.

Descartados os dois modelos anteriores, por não serem universais, havia agora que encontrar um novo modelo, que fosse capaz de explicar o sucedido e pudesse ser ajustado aos estudos de todo o tipo de redes, e não apenas as sociais, biológicas e tecnológicas. "Hubs (…) again challenge the status quo" (Barabási, 2003:64). Precisamente, quando a equipa de investigação se lançou para o estudo da estrutura da rede *www*, levavam com eles a ideia de que uma página electrónica representava o expoente máximo da democracia; o igualitarismo: toda a informação, acessível a todos.

39 Físico, herdeiro da Escola Húngara da Teoria dos grafos e actual director da equipa de investigação da Universidade de Notre Dame, sobre redes complexas. (Watts, 2004:104)

No entanto, a realidade era bem diferente. Não eram apenas os constrangimentos sociais (o défice de literacia tecnológica, os custos associados aos equipamentos, as assimetrias espaciais da disponibilização das infra-estruturas físicas de acesso à Internet, etc.), mas também os constrangimentos estruturais da própria rede *www*, conforme os primeiros resultados obtidos pela equipa evidenciaram. Existem páginas que têm mais ligações que outras e, por conseguinte, são vistas por mais pessoas. Quanto maior o número de ligações, maior o número de visitas e, consequentemente, maior a visibilidade de uma página.

Segundo os investigadores, a estas páginas (ou indivíduos, ou células, ou empresas, ou cidades, ou quaisquer outros nós, no sentido formal do termo) atribui-se o nome de *hubs* – nós com um número elevado de ligações. Esta é uma propriedade das redes (desde a biologia à economia), complexas e que continua a vigorar, e cujas questões suscitadas relançaram com reforçado vigor o interesse pela Teoria das redes, pelos vários domínios e ramos das ciências, promovendo acima de tudo a interdisciplinariedade (Xu e Sui, 2007). Os *hubs* têm a propriedade da ubiquidade nas redes.

Mas em que consistia a experiência de Barabási e sua equipa? Tratava-se de verificar, ainda sob a óptica do modelo de Erdos-Rényi, a estrutura da *www*, com base numa experiência feita em 325 000 páginas electrónicas. Os resultados obtidos, levaram não somente ao abandono dos modelos até à data vigentes, mas também a descobrir a existência de *hubs* nas redes[40], e que são esses poucos *hubs*, que dominam em cerca de 90% a estrutura das redes, iludindo assim os investigadores ao fenómeno do Mundo pequeno. Significa isto, que se retirarmos alguns destes poucos *hubs* da rede, a distância topológica, medida pela métrica do caminho-mais-curto, entre os nós aumenta consideravelmente, o que derrubaria fatalmente a Teoria do Mundo pequeno.

Em jeito de síntese, pode afirmar-se então que os *hubs* têm a propriedade da ubiquidade nas redes e por conseguinte, a teoria de Erdõs-Rényi não é mais válida. Efectivamente, os nós não são todos iguais, assim como também não têm todos o mesmo número de ligações; no entanto, a teoria de *cluster's* de Watts e Strogatz permanece, uma vez que continuam a existir pequenos mundos (*cluster's*) nas redes.

Quanto às questões que as verdades científicas sempre levantam, e são a única forma de se dar continuidade aos estudos e ao processo evolutivo da própria ciência, essas são agora: como se formam os *hubs*? Quantos *hubs* existem por tipo de rede? Como é que os modelos anteriores foram cegos aos *hubs*? Que outras leis universais, para além das já descobertas, podem estar encobertas?

Estas são algumas das questões que têm orientando a investigação acerca das redes nos últimos anos do século XXI e que mais, e mais rapidamente, têm contribuído

40 Alguns dos *hubs* encontrados são-nos sobremaneira conhecidos eg. Altavista.com; Google.com; Yahoo.com; Amazon.com; etc. Sobre alguns destes *hub*s, Barabási escreveu, aludindo à teoria do Mundo pequeno e dos seis graus de separação de Milgram, que "a giant hub, is reachable from most webpages in two or three cliks" (2003:64).

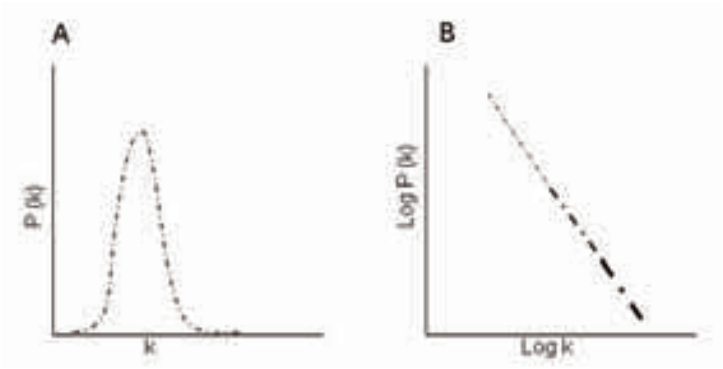
para o entendimento da complexidade dos sistemas que nos rodeiam, assim como para novas etapas na teoria das Redes Complexas.

3.5. REDES SEM ESCALA

Alertados pela descoberta da existência de *hubs* nas redes, e pela necessidade de confronto com outros modelos, bem como validação por testes em outras redes, Barabási e a sua equipa, começaram a definir um trilho de investigação que os conduzia a um processo que se estava muito rapidamente a tornar surpreendentemente profícuo em descobertas científicas. Ao terem verificado que - contrariamente ao esperado no início quando se baseavam no modelo de aleatoriedade de Erdõs-Rényi e do qual devia resultar uma distribuição dos nós na rede de forma igualitária –, apenas alguns nós da rede *www* detinham a maioria das ligações os investigadores procuraram produzir um gráfico de conectividade dos nós, a fim de avaliar a distribuição das ligações. Para o efeito, e dado o elevado número de ligações da rede *www*, decidiram-se por um gráfico log-log, tendo constatado que a distribuição das ligações respeita o princípio matemático conhecido por Lei de pesos[41], o que implica a existência na rede de muitos nós com poucas ligações em coexistência com poucos nós, mas com muitas ligações.

Tal constatação é ainda mais surpreendente quando se sabe que a maioria dos fenómenos segue uma curva normal (curva em sino), o que é o oposto à distribuição verificada nas quantidades na Lei de pesos (cf. Figura 16).

FIGURA 16 GRÁFICO DA DISTRIBUIÇÃO DO GRAU DOS NÓS DE UM GRAFO ALEATÓRIO (A) E DE UM GRAFO LIVRE DE ESCALA (B)



Adaptado de Barabási, 2003:71

41 Criada por Vilfredo Pareto (Engenheiro, sociólogo, político e economista), no século XIX, a Lei consistiu em verificar a existência de um rácio omnipresente nos vários subdomínios da Economia. Dos estudos empíricos que levou a cabo, Pareto verificou que existia sempre uma relação de 80/20 (a que chamou de Princípio 80/20), na distribuição da riqueza, ou seja que 80% da riqueza de um País, uma região, ou uma fábrica, residia apenas em 20% da sua população.

No gráfico da esquerda (A), referente a um grafo aleatório, verifica-se que a rede tem uma distribuição normal ou em curva de sino, o que significa que todos os nós têm aproximadamente o mesmo número de arcos a convergirem para si e o número médio (pico da distribuição) dá-nos a 'escala da rede'. No gráfico log-log da direita (B), verifica-se que a distribuição já não se processa assim. Efectivamente, não faz sentido falar-se de escala da rede ou do grau médio dos nós. Numa rede livre de escala ou sem escala, muitos nós têm poucos arcos a ligá-los ficando a maioria dos arcos que estabelecem as ligações, para uma minoria de nós.

Esta propriedade foi descoberta no estudo sobre a rede *Web*, pela equipa de Barabási, mas a verdade é que, posteriormente, ela tem-se vindo a revelar em outras redes, tais como: redes de ligações aéreas, algumas redes sociais, redes metabólicas, etc. (PRISMA:2008). Neste tipo de redes, alguns nós apresentam-se como *hubs*, regidos pela Lei dos pesos, o que explica a probabilidade $p(k)$ de um nó de um qualquer grafo G se ligar a k outros nós é proporcional a $1/x^2$, em que x corresponde ao número de ligações de um nó. O valor de x será tanto maior quanto menos nós apresentarem x ligações.

Isto significa que os grafos das redes em geral não apresentam uma topologia aleatória e uma estrutura marcada por uma ligação uniforme. Pelo contrário, a curva correspondente ao número de nós em função do número de ligações existentes deixou de se poder representar em forma de sino, para adquirir uma forma em curva, com cauda no final, ou no caso de um gráfico log-log, a forma de uma recta de diagonal invertida (cf. Figura 16).

Após a verificação empírica desta teoria, era preciso a fundamentação científica. Bela Bollbás foi o cientista que provou matematicamente a experiência de Barabási e sua equipa. Considere-se um grafo (G) composto por um conjunto de arcos (A), e um grau de conexão g para cada nó i e j $g(i,j)$, então tem-se que a escala E de G:

$$E(G) = \sum_{ij \in A} gjgi\,,$$

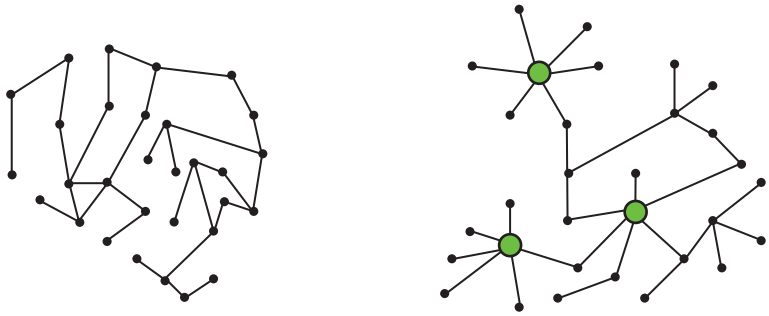
para valores máximos em que $n\ g(i,j)$ ligam com outros $n\ g(i,j)$ de forma a

$$E(G) = \frac{E(G)}{E_{max}}\ \text{, e}$$

de que resultam valores compreendidos entre {0, 1}, que permitem classificar o grafo com valores próximos de 1, sem escala (cf. Figura 17).

Tal como em outros sistemas regidos pela Lei dos pesos, a característica mais notável num grafo sem escala é o facto de alguns dos nós apresentarem um grau que excede largamente a média, e a que se chamam de *hubs*. Tal lei afecta assim a topologia de um grafo, na medida em que pressupõe a existência de uma hierarquia clássica, em que o *hubs* são precedidos por pequenos *hubs* e assim sucessivamente até aos nós isolados ou com menor grau. Esta é uma característica indicadora de tolerância comportamental de um grafo face a ataques ou falhas. (Xu e Sui, 2005).

FIGURA 17 EXEMPLO DE GRAFO ALEATÓRIO *VERSUS* GRAFO SEM ESCALA



a) Grafo aleatório b) Grafo livre de escala

Adaptado de PRISMA, 2008

Para casos em que os ataques ou falhas ocorram aleatoriamente e os nós tenham maioritariamente graus baixos, então a probabilidade de ser um *hub* afectado é muito reduzida, e consequentemente o grafo não sofrerá grandes alterações. Pelo contrário, se o ataque ou falha for propositado e orientado a um *hub*, então o grafo poderá sofrer graves alterações e no limite desligar-se. Os *hubs* constituem simultaneamente a força e o ponto crítico dos grafos sem escala.

Note-se ainda quanto à distribuição geográfica patenteada pelos grafos sem escala, em que é típico a colocação do *hub* principal no centro do grafo, com as ligações periféricas a constituírem camadas sucessivas de nós com menores graus, o que origina uma estrutura de grafo com um *core* protegido por várias camadas, de forma a tornar o grafo menos vulnerável ou instável a ataques e falhas (cf. Cap. 6).

3.6. OS RICOS FICAM MAIS RICOS

Na dinâmica das redes, o mecanismo sugerido por Barabási e sua equipa para as redes sem escala, nas quais estas não são construídas de uma só vez mas que vão surgindo ao longo do tempo, e embora se verifiquem processos aleatórios, são sobretudo as regras que determinam o seu crescimento, mais precisamente à medida que novos nós vão surgindo na rede, estabelecem-se ligações preferenciais entre elas ditadas pelo factor de atractividade que os nós já existentes exercem sobre os outros. Esses nós são aqueles que detêm um maior grau de conectividade. Esta foi a constatação inicial da equipa ao acrescentar à rede *Web* mais páginas electrónicas. Estas criavam ligações preferenciais com as páginas electrónicas que já estavam na rede e que detinham o maior número de ligações, como era o exemplo dos motores de busca Yhaoo, Google, Altavista, etc. A esta constatação apelidou-se de 'os ricos ficam mais ricos'[42], enquanto os pobres iam ficando mais pobres.

42 Também referido na literatura da especialidade como Efeito Mateus (PRISMA, 2008).

No entanto, esta característica acabou por não se revelar universal. Numa experiência em que a equipa fez crescer uma pequena rede adicionando um novo nó com *n* ligações, por cada unidade de tempo e tomando como hipótese a probabilidade de cada novo nó se ligar aos nós já existentes ser proporcional ao grau desse nó, acabou por verificar que a rede evoluía para uma rede sem escala, com uma distribuição de grau regida pela Lei dos pesos com uma probabilidade *p(k)* determinada pelo expoente -3, ou -2, seja $p(k) \sim k^{-3}k^{-2}$. Significava isto que havia variações no expoente da distribuição de grau, logo para além do grau de um nó, existe um outro parâmetro na equação que faz determinar a ligação de novos nós na rede. É o parâmetro 'ajustamento', que traduz uma certa preferência nas ligações para lá do grau do nó.

Esta propriedade foi evidenciada em várias redes, como por exemplo redes de amigos, redes de cidades, redes de comunidades electrónicas, redes de citações, etc., assim como também em algumas redes estáticas que desenvolvam características sem escala, nomeadamente as redes de linhas áreas (Galeana, 2004).

Daqui se conclui que as redes estão efectivamente presentes em tudo. As relações entre as unidades que compõem os sistemas, sejam simples ou complexos – como o são a maioria das redes reais (Barabási, 2003; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Watts, 2004; Xu e Sui, 2005; Jiang, 2006) – são um pré-requisito para se compreender e descrever a realidade. É no mapa das relações que os cientistas da actualidade acreditam estar as respostas para alguns dos problemas da sociedade actual, nomeadamente da crise económica, passando pelas epidemias e doenças infecto-contagiosas, da génese e desenvolvimento do sistema de cidades (Batty, 2001).

É com base nas métricas da Teorias do Grafos e das redes, complementadas por metodologias lineares e não-lineares que se fará uso de forma a criar e aplicar um modelo que permita melhor analisar o efeito estruturante das redes de transporte e comunicação no território.

Capítulo 4
Os Sistemas de Informação Geográfica para os Transportes (SIG-T)

O responsável pelo cunho do termo SIG foi Roger Tomlinsom, que no debutar da Nova Geografia, na década de 60 (Claval, 1976:153), ajudou a criar, para o governo Canadiano, a *Regional Planning Information System Division*, com o propósito de construir um inventário completo das aptidões do solo no território nacional (projecto *The Canada Land Inventory*). Foi do seio desta divisão, sob a liderança de Roger Tomlinsom (Wrigth *et al*, 1997:346) que foi constituído o primeiro SIG de dimensão nacional: *The Canadian Geographic Information System* ou *CGIS*; o termo SIG foi difundido à escala mundial. (Foresman, 1998:4; Tomlinson, 1998:21-32; Longley *et al*, 2001:10-12; Machado, 2000:256; Grancho, 2006:27-31).

Apesar de haver um consenso geral em se considerar Tomlinson como o fundador dos SIG (Coppock e Rhind, 1991:28; Foresman, 1998; Longley *et al*, 2001), a origem dos SIG está ligada a uma conjuntura de acontecimentos. Para alguns, os que identificam os computadores como o *backbone* dos SIG, a história pode dividir-se em dois momentos: o antes e o após a introdução dos computadores de forma sistemática nos processos de recolha, armazenamento e manipulação da informação georreferenciada (Machado, 2000:247); para outros, os que encontram as referências consoante as disciplinas e os avanços científicos e tecnológicos, a cronologia dos acontecimentos é avulsa e dispersa, quer disciplinar, quer geograficamente.

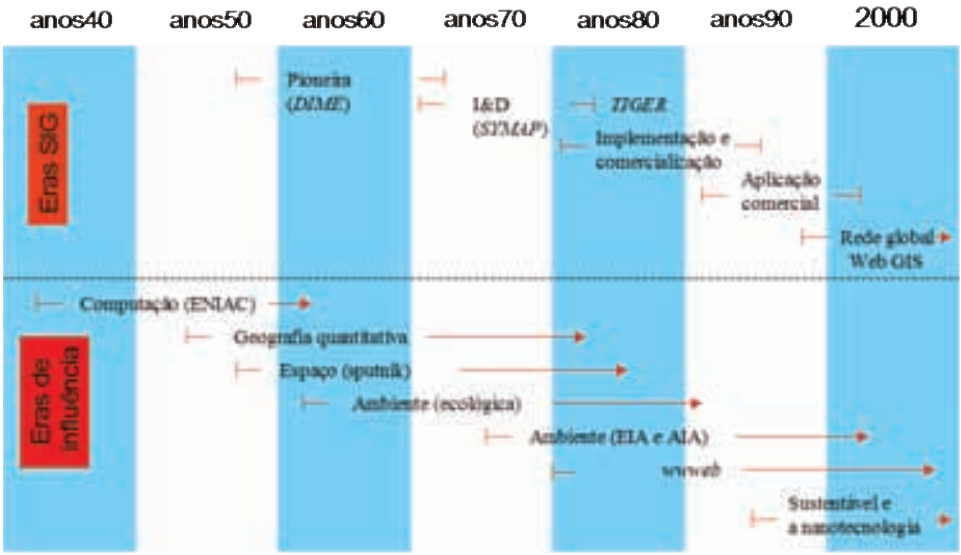
Com efeito, anote-se os diversos acontecimentos, as instituições, as organizações e as individualidades que se podem apontar a partir das obras mais referenciadas no que respeita à história dos SIG[43] e dos seus antecedentes[44]: a Universidade de Harvard e

43 Foresman, T. (1998). The History of Geographic Information Systems: perspectives from the pioneers. Ennglewood cliffs, NJ: Prentice-Hall.
Coppock, J.; Rhind, D. (1991). The History of GIS. In Geographic Information Systems: principles and applications, vol.1, editado por Maguire *et al*, Longman, London. 21-43.

44 Hagerstrand, T.; Gaspar, J. (1969). O momento actual da Geografia Humana na Suécia, in FINISTERRA, Vol. IV, nº7. Lisboa. CEG:5-30; Claval, P. (1964). Essai sur l'évolution de la geographie humaine. Les Belles Lettres. Paris. 201pp.

os trabalhos de métodos inovadores dos Arquitectos Paisagistas, com destaque para McHarg[45] e a técnica inventada dos *layers cake*; a emergência da Geografia quantitativa[46] e o início da experiência de um sistema geográfico de informação sueco (Gaspar, 1969); a cartografia automática, da Escola de Washington e Northwestern nas décadas de 50 e 60, polvilhada de geógrafos e investigadores dos transportes (Haggett, 2001:555); e os testemunhos que, ora sublinham a importância da teoria da computação de Alan Turing (o pai da informática e autor da *máquina universal*, 1936) e o aparecimento do primeiro computador, o ENIAC[47], sem mencionar as virtudes da Detecção Remota (Gaspar, 1969) e do primeiro satélite lançado ao Espaço, o Sputnik em 1957 (cf. Figura 18) (Foresman, 1998:5; Machado, 2000:249; Chrisman, 1998:36)

FIGURA 18 EVOLUÇÃO CRONOLÓGICA DOS SIG RELATIVAMENTE A OUTROS GRANDES ACONTECIMENTOS TECNOLÓGICOS



Adaptado de FORESMAN, T., 1998

45 O seu livro *Design with Nature* (1969), salientava a importância da leitura de mapas em camadas temáticas para o melhor exercício do planeamento

46 "Os princípios de análise espacial e de outros procedimentos de tratamento de informação geográfica, bem como algumas aplicações informáticas para os suportarem, foram desenvolvidos, entre outros, pela equipa de William Garrison na Universidade de Washigton, em Seattle, no final da década de 50 e início da década de 60." (Julião, 2001:87). A este propósito, também João Machado salienta o facto de que a maior parte dos SIG apoiados em computadores tenha surgido nos anos 50, muito pela iniciativa da da Universidade de Washington e da intervenção da escola de geográfica quantitativa e da engenharia dos transportes. (Machado, 2000:249). Jorge Gaspar faz ressalva da importância que o aparecimento de uma tecnologia moderna de tratamento da informação (data-banks), que conjuntamente com os computadores permitiu, em 1954 iniciar experiências de criação de um sistema geográfico de informação, na Suécia. (Gaspar, 1969:17).

47 ENIAC (*Electronic Numerical Integrator and Computer*), composto por 18.000 válvulas de 16 diferentes tipos, 6.000 comutadores, 10.000 condensadores, 1.500 relais, 50.000 resistências, ocupava 3 salas de 70m^2 e pesava 30 ton. Foi construído em 1946 e esteve inicialmente ao serviço do Exército dos Estados Unidos da América. (Campos, 1992:71)

Apesar da relação entre as redes de transporte e de comunicação e o território remontar ao tempo dos Romanos, há mais de 2000 mil anos, e de sempre ter sido apontado como um instrumento fundamental para o desenvolvimento e até para a formação de uma Nação (Cortesão, 1964), só a partir do aparecimento dos computadores e da Nova Geografia é que a relação transportes, SIG e território se inicia.

Todavia, esta não foi sempre uma relação estável e sólida. Pelo contrário, sofreu reveses e grandes avanços. Precisamente, se a década de 60 marcou o início da relação dos transportes e os primórdios dos SIG, nas décadas de 70 e 80, a relação foi perdendo fulgor e só mais recentemente, na década de 90 - com uma nova 'revolução' tecnológica e científica, fruto do amadurecimento e consequente reconhecimento da importância dos SIG na Geografia -, essa relação transportes, SIG e território se reatou com maior dinamismo, ao ponto de originar a criação de uma nova ferramenta aplicativa para a modelação de redes de transportes, uma nova área de estudo e ensino, e uma nova comunidade: os SIG-T. (Silva, *et al*, 2003; Miller; Shaw, 2001).

Para esta dissertação e no que respeita à análise histórica dos SIG e dos SIG-T, não se fará aqui mais do que uma breve síntese das suas origens e evolução, sublinhando apenas o que de mais relevante tem ocorrido, no período posterior ao aparecimento e ao uso do computador de uma forma sistemática nos estudos que envolvam informação geográfica. A razão pela qual não se faz aqui um estudo mais aturado e exaustivo sobre a matéria deve-se ao facto de o tema só ser pertinente para esta dissertação enquanto informação complementar e acessória e não enquanto informação estruturante. Crê-se que um trabalho sobre a História dos SIG (onde se inclui os SIG-T) só por si merece uma atenção mais exclusiva e dedicada, quer pela importância que os SIG têm desempenhado a nível científico e tecnológico, quer sobretudo pelo seu impacto na sociedade (Maguire, *et al*, 1991; Wrigth *et al*, 1997:347; Foresman, 1998; Machado, 2000; Goodchild, 2000; Longley *et al*, 2001).

Assim os pontos que compõem este capítulo são: A origem e evolução dos SIG e a emergência dos SIG-T. O que se entende por SIG-T? Quais os modelos SIG-T mais praticados e quais as principais aplicações e tendências dos SIG-T? Neles procurar-se-á responder a questões como: o que significa o termo SIG e SIG-T? De onde emerge a relação entre os SIG, os transportes e território? Que tipo de modelos comporta? Que implicações tem ao nível da investigação e do mercado?

4.1. ORIGENS E EVOLUÇÃO DOS SIG E A EMERGÊNCIA DOS SIG-T

Muitos dos trabalhos em SIG antecedem aquilo que Roger Tomlinson designou por SIG, quando criou o *CGIS* para o Ministério da Agricultura do Canadá, para que se realizasse de forma mais precisa, rápida e barata o inventário de aptidões do solo de todo o território. Todavia, é consensual entre os autores da literatura da especialidade, que, na década de 60, os métodos quantitativos da Geografia, e o uso dos computadores estiveram na origem e marcaram o arranque dos SIG (Machado, 2000:256; Goodchild, 2000; Yano, 2001).

A ideia da qual germinou o *CGIS* vai mais além da criação do acrónimo SIG. Quando Roger Tomlinson cunhou o termo, estava longe de imaginar o impacto que este iria trazer, quer para a Geografia, quer para as ciências em geral (Wright *et al*, 1997:346). O que estava originalmente na cabeça de Tomlinson e daqueles que o ajudaram, era sobretudo uma preocupação com a gestão e o tratamento de dados de forma a criarem informação, e a partir dele produzir mais e novo conhecimento sobre o território. Para eles, a solução passava impreterivelmente pelo uso da tecnologia mais avançada, e que à data eram os computadores que tinham substituído os tubos de *vacuum* pelos transístores, e assim ganho mais velocidade de processamento, mais memória e menor custo. O objectivo foi conseguido, independentemente das vicissitudes inerentes a um processo inovador, de cariz multidisciplinar e metodologicamente integrador. Mas o que realmente ficou para a história foi a criação do termo SIG.

Quanto aos acontecimentos que antecederam o *CGIS*, e que constituíram igualmente um marco importante nas fundações dos SIG, destaque-se o *The Atlas to Accompany the Second Report of the Irish Railway Commissioners*, publicado em 1838, e que dava já conta da relação de proximidade entre os transportes e o que viriam a ser os SIG. Anterior ao processamento de informação geográfica de forma analítica (Kao, 1963), ou seja, com auxílio do computador, o documento propunha já uma metodologia que constitui um dos fundamentos dos SIG: a referenciação espacial (georreferenciação) e a sobreposição de mapas temáticos, mais propriamente os temas da população, do fluxo de tráfego, da topografia e da geologia, com igual escala e limites, de forma a permitir aos técnicos uma melhor leitura da distribuição espacial dos fenómenos e assim elaborar um mais eficiente traçado da rede de transportes.

Contudo, como argumentam alguns autores (Potrykowski e Taylor, 1998:18; Foresman, 1998:3), dificilmente se podem considerar esses trabalhos como do foro da Geografia dos transportes ou tão pouco de SIG-T, tal como se veio a entender. As razões apontadas para esta consideração residem em dois factores: estes eram sobretudo trabalhos de teor descritivo, e o facto de a Geografia dos transportes não ser ainda uma disciplina organizada e autónoma, mas antes uma sub-disciplina da Geografia Económica, que de resto os modelos de interacção espacial da década de 20 do século XX deixavam já entender (cf. tabela 1, Cap.2).

Iniciada a era do digital ou era electrónica (Gaspar, 1969), inicia-se também a relação entre os transportes e os SIG, mediada pela Geografia. Precisamente, os geógrafos sempre tiveram como interesse principal o estudo das relações e distribuição espacial dos acontecimentos, o que pressupõe a existência, segundo Berry *et al*, de três ingredientes: informação, ideias e técnicas, sendo que a informação deve sempre preservar as suas coordenadas. (Berry *et al*, 1964).

Segundo Coppock e Rhind, 1991 e Chrisman, 1998, esta relação teve inicio na Universidade de Washington, na década de 50, quando o geógrafo Garrison e o engenheiro de transportes Horwood esboçaram os primeiros passos nos métodos quantitativos aplicados aos estudos de transportes (Coppock e Rhind, 1991:26). Da relação iniciada, resultou a fusão dos Departamentos de Engenharia Civil e de Planeamento Urbano,

que originou a *Urban and Regional Information Systems Association* (URISA), organização que veio amplamente a contribuir para a disciplina de Geografia dos Transportes e constitui uma alavanca determinante para a Geografia quantitativa e os SIG.

Efectivamente, é a partir da URISA de Horwood e Garrison, e outros que se lhes vieram juntar, como Tobler, Berry e Marble, que se estabeleceu uma sólida relação entre a Geografia, os Transportes e os SIG, constituindo os computadores a aliança que garantiu essa relação. Outro exemplo clássico dessa relação, foi o trabalho inovador de Garrison[48] sobre a influência da rede interestadual Norte Americana de auto-estradas nas mudanças de localização dos centros urbanos, com recurso ao formalismo métrico da Teoria dos Grafos, com chamada de atenção para a importância da variável localização.

Auxiliados pelo uso intensivo do computador, que veio permitir a aplicação do formalismo da Matemática e da Física aos estudos do território, com destaque para os problemas urbanos e dos transportes, o grupo permitiu-se construir uma base de dados e ligá-la ao território, num processo que designaram de geocodificação (Chrisman, 1998:36).

Daqui se pode afirmar que a relação entre os SIG e os transportes advém originalmente dos estudos de âmbito da Geografia dos transportes, ou seja, é a partir daí que se podem encontrar os antecedentes dos SIG e dos SIG-T, levada a cabo por geógrafos como Shimbel, 1953; Ulman, 1957; Garrison e Marble, 1960, 1961; Kansky, 1963; Morril e Gould, 1963, 1965; Haggett e Chorley, 1967; Wilson, 1969; Taaffe e Gauthier, 1973; entre outros, ou seja muitos dos precursores da Geografia quantitativa e igualmente dos SIG. (Thill, 2000:3)

Com efeito, atribui-se aos trabalhos iniciais de geocodificação (Chrisman, 1998:36) o evento que marcou a origem dos SIG aplicados aos transportes, ainda que indirectamente, já que o propósito era servir o projecto do *US Bureau Census*: DIME – *Dual Independent Map Encoding System*, para os Censos norte-americanos da década de 70. O processo de base consistia na digitalização (vectorização) da rede de estradas, e na sua transformação num modelo abstracto de arcos e nós (grafo planar) que ajudava na identificação de áreas censitárias e na delimitação de quarteirões, através das relações topológicas das ruas, fundamental para a organização do trabalho de campo. Este projecto foi de resto o precursor do *TIGER* (*Topological Integrated Geographic Encoding and Referecing*), da década de 90, uma referência na História dos SIG. (Thill, 2000; Tomlinson, 1998:21-32; Reis, 2000; Spear, 2004:311).

Para o sistema TIGER, embora o procedimento fosse igual, houve um refinamento quanto ao levantamento e armazenamento da informação geográfica, nomeadamente, com a integração adicional de linhas de caminho-de-ferro, da hidrografia, das redes de distribuição de água, dos equipamentos escolares, sociais e de lazer, que de alguma forma ajudassem ao referenciamento censitário. Assim, apesar de não se

48 Garrison, W. (1960) – Connectivity of the Interstate Highway System. Papers and Proceedings of the Regional Science Association, 6:121-137.

tratar de um SIG aplicado aos transportes, a verdade é que a necessidade de digitalização (vectorização) da globalidade da rede de estradas e de caminho-de-ferro constituiu um forte impulso aos SIG-T.

Um outro produto dos Censos americanos da década de 90, com igual ou superior impacto, foi o projecto *Census Transportation Planning Package* (CTPP). O procedimento que consistia na introdução de um inquérito destinado a aferir a mobilidade da população, com questões, entre outras, relativas à origem-destino, entre o local de trabalho e o local de residência, o tempo de viagem, o modo de transporte utilizado, etc. A informação obtida era depois arquivada e georreferenciada e, mediante um programa SIG próprio, podia ser visualizada e sobre ela realizada inquirições à base de dados e criados alguns mapas temáticos. Esta informação e o programa SIG foram compilados num *cd-rom* e disponibilizados gratuitamente. (Spear, 2004:313).

Entretanto, e aparentemente sem qualquer tipo de relação directa, em 1963 Howard Fisher, na Universidade de Harvard, um ano após a sua reforma, consegue obter financiamento para dar continuidade a um projecto que tinha iniciado anos antes no *NorthWestern Technical Institute*, que consistia em manipular dados e análise espacial através do uso dos computadores, mas que não tinha conseguido terminar com resultados substantivos. Com o financiamento obtido, Fisher funda o *Laboratory for Computer Graphics and Spatial Analysis*, a partir do qual, juntamente com seus colaboradores, cria um conjunto de programas de computador "…para análise e manipulação de dados por interpolação automática de isolinhas e coropletas" (Machado, 2000:251), que apelidaram de SYMAP (*Synagraphic Maping System*).

O sucesso do SYMAP pode ser medido pela sua difusão por todo o mundo[49], servindo o propósito de inúmeras organizações e investigadores, entre os quais, o Gabinete da Área de Sines (GAS), em Portugal, cujos trabalhos constituem umas das referências embrionárias da computação na análise espacial e, consequentemente, dos SIG[50] em Portugal. Tratava-se de elaborar um Plano Geral da Área de Sines para a "zona de actuação directa" (GAS, 1973), o que pressuponha, entre outros procedimentos metodológicos, a criação de um banco de dados referenciado por um sistema de coordenadas militares (Figura 19) devidamente armazenadas em discos e fitas magnéticas, fundamental para o modelo matemático de decisão e para a representação de resultados através da produção automática de cartografia. (GAS, 1973; Machado, 2000:314; Grancho, 2006:84).

Contudo, para uma melhor e mais extensiva compreensão acerca da importância do *Harvard Lab* de Fisher, não só no que respeita ao desenvolvimento dos SIG, mas também no desenvolvimento científico e tecnológico que o acompanhou, note-se que de entre aqueles que por lá passaram, trabalharam, estudaram e cooperaram, contam-

49 Com mais de 500 instituições a adquirirem o sistema, espalhado por vários países da Europa (inclusive Portugal), Japão, para além da América do Norte. (Machado, 2000:251)

50 O Plano de urbanização de Évora e o Atlas do concelho de Loures, são alguns dos projectos que marcaram os antecedentes dos SIG em Portugal, com a coordenação e participação de Jorge Gaspar. (Grancho, 2006:84).

FIGURA 19 MÉTODOS DE CARTOGRAFIA AUTOMÁTICA PARA O MODELO DE PLANEAMENTO URBANO DE SINES.

Fonte: Plano Geral da Área de Sines, 1973

se Sinton, Chrisman, Dangermond, Dutton, Morehouse, Peucker e muitos outros que são referências maiores na História e desenvolvimento dos SIG, assim como dos SIG-T e que contribuíram para revolucionar a forma de investigar e de fazer ciência a partir de dados geográficos.

Numa parceria entre a *Harvard Lab* e o gabinete de Arquitectura Paisagista, liderado por Steinitz e com o apoio fundamental de Sinton, conceberam o primeiro sistema capaz de sobrepor camadas de informação, separadas por diferentes níveis, sob uma estrutura celular, a GRID (*graphic display of rectangular grid information*), a partir de uma versão inicial do SYMAP. O programa foi largamente utilizado nos estudos e trabalhos dos Arquitectos Paisagistas, tendo continuado a ser alvo de aperfeiçoamentos de acordo com as necessidades dos seus utilizadores, o que fez com que se tenha evoluído para um produto mais robusto, mas também mais interactivo e simpático para o utilizador: o IMGRID (*interactive manipulation GRID*), com uma arquitectura programática orientada para *raster*, e que veio a constituir o 'esqueleto' de outros programas comerciais, como o IDRISI[51], mas também o ODYSSEY[52]. (Chrisman, 1998:37).

51 IDRISI é um programa criado pela Clark Lab (Laboratório sediado no Dep. De Geografia da Universidade de Clark), com vista ao apoio à decisão em matéria de Ambiente e Gestão sustentável de recursos. É um programa de base *raster*, concebido para análise espacial, classificação e processamento digital de imagem de satélite. Comercializado a partir de 1987, cobre hoje diferentes áreas e domínios sociais, comerciais e governativos em mais de 180 países. (http://www.clarklabs.org/about/index.cfm, visitado em Setembro de 2009).

52 Segundo Chrisman, 1998 o protótipo do SIG Vectorial.

Todavia, e apesar do sucesso alcançado pelo *Harvard Lab*, a equipa partia-se e dispersava-se. Jack Dangermond, que havia ingressado na Universidade de Harvard, para realizar o seu Mestrado, e aí colaborado e apreendido com a equipa de Fisher, regressou à Califórnia e fundou em 1969, a *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), que foi ao longo dos anos conquistando o mercado e incorporando alguns dos dissidentes do *Harvard Lab*, nomeadamente Scott Morehouse, em 1981. Morehouse, antes de sair para ingressar na ESRI, dirigia o projecto ODYSSEY. Coincidentemente, a ESRI, no ano seguinte (1982), apresenta um novo programa: o Arc/Info 1.0 (programa criado a partir da base conceptual do ODYSSEY) e consegue que este passe a operar em todo o tipo de plataformas, desde os computadores pessoais, passando pelas *workstations* até às grandes *mainframes*. De uma organização sem fins lucrativos de 15 colaboradores, a operar a nível local, a ESRI é actualmente uma empresa com lucros de milhões que estende a sua acção à escala global e conta com mais de 2700 colaboradores (Coppock e Rhind, 1991:32; ESRI, 2009).

Os SIG tornaram-se um caso de sucesso, quer na indústria tecnológica, quer nas ciências que trabalhavam com dados geográficos. Os SIG estavam a adquirir uma escala global e a contaminar vários países e seus respectivos governos, que reconheceram a importância dos computadores e dos SIG, quer para o armazenamento e gestão da informação, quer para o exercício de planeamento e da governação. O parlamento sueco foi um desses exemplos, que na década de 70 aprovou a substituição do sistema manual de registo predial pelo *Swedish Land Databank System* (SLDS). Este reconhecimento por parte do governo sueco é em parte fruto das influências de Torsten Hagerstrand e Waldo Tobler, cuja responsabilidade se fez notar na dinamização da Geografia quantitativa e dos processos de cartografia automática, respectivamente (Hagerstand e Gaspar, 1969; Coppock e Rhind, 1991). Torsten Hagerstand foi de resto um dos grandes responsáveis pela modelística em Geografia e o uso de computadores na análise espacial, ingredientes que contribuíram para a referenciação geográfica da informação através de procedimentos automáticos e, consequentemente, dos SIG.

Ainda no panorama Europeu, a Inglaterra só deu os primeiros passos no desenvolvimento dos SIG, por volta da década de 60. Todavia, contrariamente ao verificado nos Estados Unidos da América, o processo não se dá por via da criação de laboratórios e do desenvolvimento de *softwares*, isto apesar do reconhecimento da importância que os computadores e a digitalização da informação acarretavam. Aliás, o desenvolvimento computacional era encarado como um valor acrescentado para o planeamento do território, sendo aplicado em diversas áreas e diferentes agências estatais, como as *National Mapping Agency*, organismos municipais, universidades e politécnicos. No entanto, em Inglaterra, foi um relatório publicado em 1972, numa acção conjunta do governo local e central que despoletou a difusão e o desenvolvimento dos SIG. O relatório intitulava-se *General Information Systems for Planning* (GISP) e determinava a importância do recurso aos SIG por parte das autoridades, no exercício das suas funções na gestão do território.

É ao longo de todo este percurso, desde os antecedentes que constituíram as raízes dos SIG até à actualidade, que a ligação entre os SIG, os transportes e o território se

foi construindo e consolidando, de forma mais ou menos vincada. Existe de facto, uma coincidência temporal entre as origens dos SIG e os SIG-T, por via do formalismo dos métodos aplicados que vieram a constituir a algoritmia que integra alguns dos actuais programas de SIG (cf. Tabela 3).

Todavia, e de uma forma algo paradoxal, deu-se um hiato de mais de 30 anos entre a fase inicial de cooperação da década de 60 e a fase presente de consolidação e desenvolvimento dos SIG nos transportes. A explicação para este período de afastamento entre os SIG e os transportes deve-se ao percurso evolutivo de cada um. Por um lado, os transportes foram-se distanciando do seu original domínio científico, a Geografia Económica e Regional, e firmando-se cada vez mais como um domínio autónomo, ora no campo da Engenharia, com perda da sua componente espacial, ora preterindo os métodos quantitativos e focando-se numa geografia dos transportes baseada no 'behaviorismo'[53]. Por outro lado, os SIG, pelo seu sucesso científico e comercial à escala mundial, passam por um período de permanente revolução científica e tecnológica, mas também por uma crise existencial, fomentada em torno da sua definição.

Como consequência deste percurso diferenciado, e dadas as valências e características entretanto desenvolvidas, a cooperação dos SIG nos estudos dos transportes era mínima, e revelou-se pouco útil. Os transportes tinham perdido o seu pendor espacial e a sua natureza multidisciplinar, algo que só veio a ser retomado nos anos 90, década que marcou a reaproximação dos transportes aos SIG. Segundo Thill, o retomar e o reforço da multidisciplinaridade dos transportes prende-se com quatro aspectos fundamentais que ocorreram nos Estados Unidos:

- *The Clean Amendments*;
- *The Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*;
- *The American with Disabilities Act*;
- *The Transportation Equity Act for the 21st century.*

Todos estes documentos legislativos integravam recomendações explícitas para os governos locais e estaduais, para que os transportes passassem a ser abordados de forma interdependente com outros sistemas, e.g., natural, social e económico (Thill, 2000:4).

Foi ao abrigo destas recomendações com teor integracionista e inter-sistémico, que os transportes voltaram a aproximar-se dos SIG, enquanto sistema por excelência, melhor dotado para operar numa 'economia de escala' (Goodchild, 2000), para responder às necessidades de armazenamento, manipulação e análise de dados multifonte e multiescala de natureza geográfica. É nesta conjuntura que se afirmam os SIG na resolução de problemas de transportes ou os SIG-T.

53 Cf. Bailly, A. (1988) - Geography of transportation: a behavioral approach. La geografia española y mundial en los años ochenta, Universidad Complutense, Madrid: 237-245.

Assim, e após as três décadas de afastamento, os transportes e os SIG voltam a convergir e a cooperar. A reaproximação decorre por via do exercício da modelação, para que os modelos de transportes passem a constituir melhores sistemas de apoio à decisão (Fletcher, 1987), com capacidade de gestão de dados geográficos e funcionalidade de análise espacial. O enfoque é sobretudo posto na criação de cenários e na simulação de situações, com o intuito de produzir mecanismos de resposta em tempo-real e sempre com um referencial espacial (Thill, 2000). Em síntese, pode afirmar-se que são três os fundamentos básicos dos SIG, que inicialmente determinaram o interesse dos transportes:

- A capacidade de atribuir um referencial espacial (coordenadas) a qualquer atributo presente na base de dados.
- A possibilidade de efectuar sobreposição de temas;
- A capacidade de anexar vários atributos a qualquer elemento geométrico (ponto, linha e área/polígono);

4.2. O QUE SE ENTENDE POR SIG E POR SIG-T?

Independentemente das revolucionárias capacidades dos SIG para a análise científica a partir de dados espaciais, nomeadamente, o armazenamento, a gestão e a análise de dados, os SIG atravessaram uma crise existencial em torno da sua definição. A razão dessa crise pode ser atribuída a dois factores chave:

- A dificuldade em estabelecer uma definição consensual sobre 'o que é um SIG', dada as continuadas evoluções tecnológicas e científicas a nível computacional;
- A dificuldade de aceitação da sua importância científica junto da comunidade académica, com destaque para os geógrafos (Writh *et al*, 1997; Longley *et al*, 2001; Goodchild, 1998; Mark, 2003).

Esclareça-se então, o que se entende por SIG e, consequentemente por SIG-T, porque tal como Coppock e Rhind colocam "…the content of any history of GIS depends in large measure on the definition adopted" (Coppock Rhind, 1991:22), o que diz bem da sua importância para a compreensão do processo evolutivo dos SIG

Apesar da sua juventude, e não obstante o crescente fulgor dos SIG, que se afirma como uma indústria na área das ciências aplicadas (Yano, 2001), existe uma crise de identidade junto da comunidade SIG, que é simultaneamente causa e consequência da incapacidade de produção de uma definição clara e consensual.

O pluralismo que caracteriza os SIG, no que respeita às origens, áreas de aplicação e disciplinas envolvidas na sua concepção, constituem simultaneamente a sua riqueza e fraqueza conceptual. As múltiplas definições, dispersas por livros, relatórios, artigos, teses, crónicas de jornais e revistas, etc., reflectem bem o 'ruído' que existe em torno do conceito, e a dificuldade em estabelecer-se um consenso acerca de uma definição, que uniformize e permaneça (Maguire, 1991:9). As definições de SIG têm-

se alterado constantemente de acordo com a evolução dos próprios SIG e por isso, hoje, podem encontrar-se variadas definições distribuídas pela extensa literatura da especialidade (Simões, 2006).

Tal como a dualidade existente quanto ao período que marca a origem dos SIG (antes ou após do aparecimento dos computadores), também no que respeita às tentativas de estabelecer uma definição de SIG existe um conflito entre aqueles para quem a tecnologia (o *hardware* e o *software*) constitui a componente essencial, e aqueles que consideram o processamento da informação e as aplicações SIG, a fonte de vida dos SIG (Maguire, 1991:10: Malczweski, 1999:16). Apenas para ilustrar esse 'ruído', atente-se a algumas definições de SIG avançadas por organismos estatais, desde a sua existência:

- A definição inglesa, que figura no relatório do Comité Britânico sobre o tratamento de informação geográfica (Comité presidido por Lord Chorley em 1987), é a seguinte:
  "*A system for capturing, storing, checking, integrating, manipulating, analysing and displaying data which one spatially referenced to the Earth. This is normally considered to involve a spatially referenced computer database and appropriate applications software*" (Stefanovic *et al*, 1989: 452).

- A definição americana, com origem no Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography (FICCDC, 1988):
  "*System of computer hardware, software and produces designed to support the capture, management, manipulation, analysing, modelling and display of spatially referenced data for solving complex planning and management problems.*".

- A definição francesa, proposta pela *Société Française de Photogrammétrie et de Télédéctention* (S.F.P.T.), em 1989, é a seguinte:
  "*Système informatique permettant, à partir de divers sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace.*".

- A definição portuguesa, que parte do Centro Nacional de Informação Geográfica (CNIG), presidido pelo Engº Rui Gonçalves Henriques:

Em sentido lato: "*Um SIG é um conjunto de procedimentos concebidos com o objectivo de armazenar, aceder e manipular informação georreferenciada*.".

Em sentido restrito: "*Um SIG é um conjunto de programas residentes num computador, que permite introduzir, aceder, manipular e visualizar informação georreferenciada.*". (CNIG, 1990).

Do ponto de vista não-institucional, a profusão de definições é ainda mais extensa, muito embora pelo seu carácter não formal devam ser tidas em conta com maior precaução e até com algum cepticismo. Contudo, dependendo da fonte, a credibilidade

de algumas são irrefutáveis e merecem ser consideradas na mesma medida que as definições institucionais. Face ao exposto, apontem-se as definições assinadas por aqueles que estiveram nos movimentos embrionários dos SIG e que têm dedicado as suas vidas profissionais ao seu estudo, eg. Michael Goodchild, Jack Dangermond, Richard Tomlinson, Nicholas Chrisman, David Maguire, Stan Aronoff, entre outros.

- "Geographic Information Systems are integrated computer systems for the input, storage, analysis and output of spatially referenced data" (Goodchild, 1998:560)
- "Um SIG, no seu sentido mais amplo, é um conjunto de procedimentos manuais ou executados por um computador e que serve para armazenar e manipular dados georreferenciados" (Aronoff, 1989:39)
- "GIS are systems which deal with geographical information" (Maguire, 1991:11)
- "GIS is a computer-based information system that enables capture, modeling, manipulation, retrieval, analysis and presentation of geographically referenced data" (Worboys, 1995)
- "GIS – organized activity by which people measure and represent geographic phenomena then transform these representations into other forms while interacting with social structures." (Chrisman, 1999)

Outros, por uma questão de perfil de utilização e área de formação, ou simplesmente numa tentativa de forjar um novo acrónimo e assim ganhar o estatuto de 'Pai' dos SIG, alteraram a composição do termo, a saber: *Land Information System* (LIS), *Urban Information System* (URIS), *Environmment Information System* (ERIS) e *Cadastral Information System* (CAIS), como alguns dos termos mais referenciados na bibliografia e cujo impacto obtido foi pouco mais do que o de contribuir para a dificuldade no estabelecimento de uma definição universalmente aceite e estabilizada. (Julião, 2001).

Todas elas têm como denominador comum o facto de um SIG ser um sistema. Um sistema composto por um conjunto de técnicas, de métodos, de *hardware* e *software* que incorporam a estruturação, o armazenamento e o manuseamento e gestão digital de informação geográfica referente e referenciada (informação georreferenciada), no mínimo, a um ponto, a uma linha, a uma superfície ou a um volume.

Neste contexto, um sistema é um conjunto de elementos e de actividades ligadas entre si para atingir um objectivo comum: armazenar, tratar e gerir informação geográfica. Um sistema de informação agrupa um conjunto de processos que asseguram a recolha, a codificação, o armazenamento, a análise e a representação dos resultados.

Sintetizando, um SIG poderá ser entendido como um conjunto de *hardware*, de *software*, de métodos e de dados que permitem a uma pessoa (indivíduo ou instituição) a gestão dessa mesma informação de base geográfica.

Actualmente, e pelas diversas aplicações que os SIG têm conhecido (ambiente, planeamento, economia regional, telecomunicações, redes, estatísticas, análise sociológica, ecologia e urbanismo - a retoma dos modelos da escola de Chicago -, arquitectura, arqueologia, biologia marinha, agricultura, etc.), eles são mais do que o

simples acrónimo: os SIG são uma disciplina (Machado, 2000:222) que incorpora o conhecimento de muitos domínios científicos e a conjugação de diferentes tecnologias, contribuindo para o avanço nesses domínios científicos, testando e optimizando algoritmos, relacionando e combinando diferentes métodos (Painho, 2005).

Efectivamente, apesar da sua juventude, os SIG têm a particularidade de conseguirem pôr em discussão individualidades e organizações, da comunidade científica, técnica e até política, sobre se são uma mera ferramenta de análise de dados, uma tecnologia inteligente ou uma ciência ("*Geographical Information Science or GISc*"), tal como se lhe referiu pela primeira vez Goodchild, num artigo para o International *Journal of Geographical Information Systems*. (Goddchild, 1992; Wrigth *et al*, 1997; Thill, 2000:3; Mark, 2003).

Sobre SIG e CIG (Ciência da Informação Geográfica), desde então muita discussão tem existido e pouco consenso tem havido[54]. Segundo Fotheringham e Longley, grande parte da dificuldade em reconhecer a dimensão extra-ferramenta, e a importância real que os SIG desempenham na investigação e no apoio à decisão em planeamento, deve-se à sua má utilização, fruto da acção irresponsável de alguns utilizadores e especialistas, que fazem questão de lhe conferir um aspecto extra complexo, pejado de dificuldades e apenas acessível a técnicos sobredotados, ou seja apenas com o intuito de conferir um 'aspecto' mais sofisticado a projectos que são, quer cientificamente, quer na análise espacial, fracos e desinteressantes (Fotheringham, 2000; Longley, 2000).

É neste quadro situacional que a CIG tem um papel a desenvolver, uma vez que existe "something special about spatial" (Longley *et al*, 2001) e que os SIG podem ser acessíveis a todos e servir múltiplas aplicações, sempre que o manuseamento de informação espacial seja necessário.

Entre os vários domínios científicos e áreas de investigação em que os SIG têm sido aplicados e constituído matéria de análise, destacam-se os transportes. Os SIG, com aplicações exclusivamente desenvolvidas para a resolução de problemas espaciais, ligados ao sector dos transportes constituem um sub-domínio dos SIG que mais se tem desenvolvido na última década (Miller e Shaw, 2001), e que é uma consequência natural de três factores:

- A necessidade de dar uma resposta fiável aos problemas reais que se foram colocando, nomeadamente, a necessidade dos estudos de transportes em integrar mais informação, e.g., ambiental, urbanística, uso do solo, social, económica, demográfica, política, etc., do que aquela que usualmente eram tidos em conta quando os

54 Esta discussão levou mesmo ao aparecimento de um movimento iniciado na década de 90, designado de *Critical GIS*, em que o termo critical foi adaptado da teoria crítica desenvolvida pelos teóricos sociais da Escola de Frankfurt, eg. Theodor Adorno e Jurgen Habermas. In Encyclopedia of Geographic Information Science; Karen Kenp (editor); SAGE reference online, consulado em Setembro de 2009. url: http://sagereference.com/geoinfoscience/Article:n29.html?searchQuery=y%3D14%26quickSearch%3DGIST%26x%3D47)

estudos tinham um cariz dominantemente de engenharia, e sobretudo a adopção de uma componente espacial na informação de base;
- O facto de os pioneiros dos SIG terem sido os investigadores dos transportes, que acabaram por fundar a Escola de Estudos Regionais e Urbanos em Geografia (a URISA de Garrison e Horwood);
- A tecnologia, que foi proporcionada pelo desenvolvimento dos SIG, também possibilitou o desenvolvimento dos SIG-T, com destaque para o desenvolvimento ao nível dos SGBD e também da criação de programas *stand-alone*, para a realização de tarefas orientadas para a resolução de problemas específicos (Waters, 1999:828).

Contudo, e apesar do entendimento geral de que os SIG constituem uma ferramenta-chave no desenvolvimento dos estudos dos transportes e, consequentemente, na resolução de problemas ligados aos transportes, conforme se pode testemunhar das palavras de Black, "Very few contributions to transportation geography during the 20th century can match the importance of the development of geographic information systems devoted to transportation (GIS-T)" (Black, 2003:275), existem algumas vozes, que embora não pondo em causa a importância dos SIG nos transportes, discordam do facto de os SIG-T serem 'apenas' um sub-domínio dos SIG.

Segundo Thill e Fletcher, os SIG-T, quer pelo facto de os SIG convencionais não darem uma resposta cabal às necessidades dos estudos em transportes, quer pelos modelos de análise e gestão de dados específicos dos estudos de transportes, (Goodchild, 1998; Fletcher, 2000), mas também porque o seu sucesso e crescente procura (Waters, 1999) abriram lugar a um nicho de mercado e de investigação que alguns começam a reclamar (Thill, 2000; Gupta, 2003), são uma disciplina autónoma, ou então um subdomínio das CIG. As CIG-T (Ciências da Informação Geográfica para Transportes), conforme dizem Miller e Shaw são "…a subset of GISc[55] that develops theory and method for capturing, processing, analyzing and communicating digital transportation information" (Miller e Shaw, 2001:6).

A este respeito, também Fisher acentua o estímulo que a relação transportes e SIG e CIG concede para aqueles que constroem os modelos, afirmando que os SIG-T são uma aplicação dos sistemas e das ciências de informação geográfica para a resolução de problemas dos transportes, com maior importância actual no universo das tecnologias de informação geográfica (Fisher, 2003).

Ainda segundo Miller, os transportes beneficiaram muito dos SIG, nas suas componentes Sistema de Gestão de Base de Dados Espaciais (SGBDE) e de Sistema de Suporte à Decisão (SSD), mas pouco da sua componente de Análise Espacial, quando é desta que os modelos de transporte poderão retirar maior proveito, quer ao nível do planeamento, quer ao nível teórico e do conhecimento. Esta convergência, transportes, SIG e análise espacial ocorreu nos finais da década de 90, por acção de "new geocomputational tools that are emerging from geographic information science (GISc), a new interdisciplinary field that focuses on the theory and techniques behind GIS

55 Acrónimo para *Geographic Information Science*.

and related Technologies" (Miller, 1999:2), mas está ainda por desenvolver a total amplitude das funcionalidades que daí se podem retirar.

Está-se assim perante a designada 2ª geração SIG-T, que vem destituir algumas das aplicações iniciais da década de 70, eg. *Geodata Analysis and Display System* (GADS)[56], ou o caso daquela que foi uma iniciativa do governo sueco, na criação de uma base de dados rodoviária para alimentar um plano de transportes, muito rudimentares no que concerne às funcionalidades espaciais dos SIG actuais (Waters, 1999:828; Miller, 1999), negligenciando por completo a análise espacial, à semelhança do que foram os projectos antecedentes, como o DIME e mais tarde o TIGER, que privilegiavam o armazenamento e a gestão de dados, ou seja as funções de SGBD.

Actualmente, com a forte aposta no desenvolvimento de algoritmia específica para análise espacial aplicada à resolução de problemas de transportes, a 2ª geração SIG-T utiliza metodologias próprias e modelos de análise que não se encontram nos programas SIG convencionais, facto que lhes confere um distanciamento conceptual com os SIG, e um reforço da autonomia no âmbito da CIG (Fletcher, 2000; Miller, 1999).

Este processo de maturação dos SIG-T para a CIG-T, aliado à sua natureza interdisciplinar conduz – tal como sucede nos SIG e CIG – a algum 'ruído' e consequente proliferação de definições avulsas e opiniões divergentes (Fletcher, 2000; Miller e Shaw, 2001; Gupta *et a*l, 2003; Black, 2003).

Note-se ainda, a importância que tem a relação entre os SIG e os Transportes nos estudos e na investigação para o sector, podendo-se encontrar vários testemunhos a partir dos conceitos de sistema, de interdependência e de localização fundamentais na análise espacial, que Tobler sintetizou naquela que é a Primeira Lei da Geografia: "everything is related to everything else, but near things are more related than distant things." (Tobler, 1970:236). Daqui se explicam as relações espaciais inter e intra-fenómenos, cujos resultados se manifestam ao nível da dependência e da heterogeneidade espacial, bem como da resiliência e ou influência entre sistemas.

Em suma, os SIG-T são os SIG aplicados a problemas específicos dos transportes. Sendo que, segundo Shaw e Rodrigue, são três os tópicos específicos dos transportes que ocupam presentemente os estudos em SIG-T:

- Representação e visualização de informação - como podem vários componentes e temas serem representados e vistos num ambiente SIG-T?;
- Análise espacial e modelação - que tipo de metodologias, e como podem ser usadas em SIG-T? e
- Aplicações - que tipo de aplicações são ajustadas para os SIG-T? (Shaw e Rodrigue, 2009), ou por outras palavras, como podem os SIG ser adaptados em prol do desenvolvimento dos transportes. Uma das formas encontradas é a modelação.

56 GADS foi uma aplicação desenvolvida pela IBM, em meados da década de 70, especificamente para resolver problemas de policiamento e definição dos perímetros das escolas.

Precisamente, com a computação a potenciar cada vez mais as funcionalidades que os SIG vêm congregando e disponibilizando, as aplicações destes aos transportes estendem-se para lá do princípio básico da sobreposição e inquirição, para se focarem na modelação, na criação de cenários e nas simulações, com o intuito de constituírem melhores sistemas de apoio à decisão (Fletcher, 2000).

4.3. MODELOS SIG-T

A modelação é um exercício relativamente recente na política de transportes. A sua génese deve-se à necessidade de planeamento. Precisamente, a política que sempre foi um acto isolado e auto-gerido pelos políticos, só na pós-revolução industrial, por finais do século XIX, dada a necessidade de se deslocarem pessoas e bens (factor determinante na economia regional), é que permitiu e incentivou os primeiros trabalhos de planeamento em transportes, e com estes a modelação, como forma de representar e analisar o sistema de transportes.

Outro momento determinante no planeamento de transportes foi o aparecimento do automóvel. O impacto que o carro teve nos transportes, nos anos a seguir à primeira GG, fez-se sentir também a nível territorial e social (Ascher, 2001:12) o que despertou o interesse, não só dos políticos, mas também de académicos e técnicos. Os primeiros estudos sobre sistemas de transportes e os impactos que produzem no território têm lugar no início da década de 20; destacam-se por serem não somente descritivos e qualitativos, mas sobretudo quantitativos e analíticos e cujos fundamentos continuam a serem válidos e adaptáveis (Lay, 2005:166). Eram os primeiros modelos em transportes, ainda que tivessem uma base econométrica (cf. tabela 1).

Com efeito, a modelação em transportes é uma consequência da necessidade de planear o sistema de transportes, sendo que este deve ser um exercício integrador e holístico, pelas implicações que tem sobre outros sistemas e sub-sistemas, e.g., económico, urbano e regional, social, ambiental, etc. Contudo, os modelos em transportes nem sempre tiveram a capacidade de integrar este volume de dados multi-fonte e produzir análises multi-escala. Só com o aparecimento do computador, na década de 50, e o desenvolvimento tecnológico, é que foi possível constituir a modelação como uma componente do planeamento, conforme Richardson expõe: "With the advent of computers (…) it was realised that it was possible to process significant amounts of data, thus enabling quantitatively oriented planners to analyse trafic movement patterns in a systematic manner. The mathematical modeling of the transport system thus became an important feature of transport planning." (Richardson, 1990)[57].

No que respeita aos modelos SIG-T, a diferença quanto à sua génese e evolução difere apenas pela integração da componente SIG. Precisamente, é por via da ciência computacional e do uso dos métodos analíticos dos SIG, que a relação entre a Geografia e os Transportes se volta a intensificar após o primeiro terço do século XX.

57 Richardson, A. (1999 – Transport planning and modeling – A twenty year perspective. Australian road research, 20:9-21. Artigo citado por Lay, 2005:167.

Todavia, o reatamento desta relação não foi de um pleno entendimento, fruto das quase três décadas de caminhos separados. Os modelos de transportes que se foram concebendo assentam em algoritmia que ainda não foi totalmente integrada pelos programas SIG convencionais, assim como o oposto (os programas de transporte não têm conseguido aproveitar todas as capacidades de análise espacial dos SIG) também é verdade.

Os modelos SIG-T existentes mais não são do que modelos de transportes que passaram a adoptar algumas funcionalidades dos SIG, nomeadamente, a georreferenciação, a ligação entre uma base de dados alfanumérica e a representação gráfica, assim como a capacidade de sobreposição de temas, de que resulta a possibilidade de efectuar algumas operações de análise espacial. Resumindo, os modelos SIG-T são modelos de transportes com funções SIG, ou seja, em rigor, são modelos T-SIG (modelos de transportes com funções SIG), dado que a base algorítmica do modelo e a sua orientação sistémica, são os transportes.

Dos vários modelos identificados de SIG-T é possível agrupá-los de acordo com a faculdade que possibilitam aos analistas, em transformar um modelo do tipo vectorial, composto por linhas e pontos, num modelo topológico formado por arcos e nós, e a partir dos quais é possível aplicar algoritmia desenvolvida para análise topológica, especificamente, para verificar e caracterizar as propriedades da rede.

Assim, tal como não existe um SIG específico para todas as possíveis aplicações, também não existe um SIG específico que congregue todos os modelos de transportes existentes. O que se tem vindo a verificar é uma tentativa de concatenar as funcionalidades de análise espacial em SIG com a algoritmia específica dos modelos de transportes. A forma como se tem vindo a processar esta iniciativa é analisada em pormenor no ponto seguinte.

4.4. PRINCIPAIS APLICAÇÕES E TENDÊNCIAS DOS SIG-T

Na relação SIG-Transportes, e de acordo com uma visão mais generalista e conceptual, segundo Miller aquilo que os investigadores de transportes devem inicialmente entender é que os SIG podem ser tidos numa dupla perspectiva: enquanto Sistemas de Gestão de Bases de Dados (SGBD), cruciais no armazenamento, gestão e manuseamento de informação georreferenciada e enquanto Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), com funcionalidades destinadas à comunicação de resultados, obtidos a partir dos métodos de análise espacial, por meio do mapeamento e da criação automática de relatórios, para diferentes tipos de clientes, e para diferentes temáticas, nomeadamente, os transportes (1992:2 cit. Miller; Storm, 1996)

Reconhecido o mérito dos SIG e a importância da análise espacial para os modelos de transporte, há que criar condições para que os utilizadores, com destaque para aqueles que têm de decidir em função dos transportes, possam passar a dispor do melhor dos dois mundos, ou seja, de modelos de transporte específicos e das fun-

ções de análise espacial avançada dos SIG, face à riqueza dos dados existentes (atributos das redes).

Para atingir esse objectivo, os investigadores de transportes têm oscilado metodologicamente entre as seguintes opções:

- Programam para introduzir algoritmia de métodos de análise espacial, retirados dos SIG, em programas específicos para modelação de transportes (neste caso é mais uma situação de T-SIG, do que o contrário);
- Programam para introduzir algoritmia referente às funções que decorrem de algumas fases sequenciais dos modelos de transportes em programas SIG, ou;
- Concebem de raiz um programa que compile os métodos de análise espacial que o modelo sequencial de transporte necessite, com um único interface gráfico e autonomia processual. Trata-se de uma opção de programa *stand-alone*, que deve contudo garantir a integridade dos dados na migração entre programas, quer de SIG, quer de transportes.

Recentemente, com a maior capacidade tecnológica de que se dispõe, para ajudar a compreender e a medir a complexidade que caracterizam o sistema de transportes e a relação que estabelecem com outros sistemas (uso do solo, sociais, demográficos, económicos, ambientais, etc.), os analistas espaciais, com destaque para os geógrafos, têm reforçado e alargado a sua área de auxílio científico, socorrendo-se de teorias, métodos e técnicas de outras ciências, geográficas e não só, e.g., a Estatística, a Detecção Remota, a Geodesia, a Matemática, a Física, a Ecologia, a Biologia, a Sociologia, a Computação, etc., para potenciar a sua capacidade analítica de dados (p.ex. *Data minning*[58], autómatos celulares, redes neuronais artificiais e redes complexas, agentes e multi-agentes).

A este propósito, Miller classifica a situação como uma oportunidade para ultrapassar alguns das condicionantes que os geógrafos que se dedicam ao estudos dos transportes têm vindo a denunciar, nomeadamente, no que respeita ao volume de informação, à análise probabilística capaz de incorporar a incerteza e ao tempo disponível para obtenção de resultados (1999:20). Fisher, de forma assertiva, refere-se a este período como um avanço na análise espacial, libertando-a de assumpções e axiomas que eram um entrave ao desenvolvimento analítico, e que classifica de "Computational intelligent (CI) methods that can exploit the increasing power of computing plataforms to explore data and mathematical spaces with a minimum of *a priori* assumptions" (1997; cit. Miller, 1999:20).

58 O termo derivou do mundo empresarial, o qual tem sido o principal responsável pela aplicação e desenvolvimento da área de investigação que se tornou e que tem mais recentemente vindo a difundir-se por diferentes domínios do conhecimento. Segundo Bação, na génese e desenvolvimento do *Data minning* podemos encontrar "a Estatística, a inteligência artificial/reconhecimento de padrões, a ciência computacional (Bases de Dados), a optimização e o marketing, …" (2006). O termo é também, sobretudo no meio académico, conhecido por 'Descoberta de conhecimento', uma vez que explícita o que as ferramentas inerentes proporcionam: extrair informação escondida e encontrar padrões preditivos de volumosas bases de dados.

Uma vez mais, são os SIG e a CIG que melhor podem tornar esta metodologia possível mediante a disponibilização de um conjunto de métodos necessários à experimentação, visualização e análise em tempo útil e, de forma a poder dar uma resposta cada vez mais cabal na resolução de problemas espaciais, na medida em que conseguem lidar com a imprecisão e a incerteza, e serem simultaneamente preditivos, através da criação de cenários possíveis e de simulações.

A forma como se processam estes avanços nos SIG e nas CIG, quanto à integração de algoritmia específica para a criação de modelos que constituam um apoio à resolução de problemas espaciais específicos, podem categorizar-se em três níveis diferentes, de acordo com o mercado:

Nível 1 – Oportunistas: normalmente são as grandes empresas de programas SIG que, em acordo com determinadas universidades fazem rastreio e captação de técnicos (cientistas e investigadores) e potenciais projectos que possam vir a tornar-se comercias e concorrentes;

Nível 2 – Pioneiros: são os *free lancers*. Aqueles que não aliciados pelas grandes empresas ou que lhes escaparam, desenvolvem e disponibilizam um programa próprio.

Nível 3 – Utilizadores de rotina: todos aqueles que adoptam um programa já testado e com provas dadas na resolução de uma tipologia de problemas. Contribuem para o avanço nos programas enquanto clientes de versões Beta e clientes exigentes.

De acordo com Miller e Shaw, a Teoria dos Grafos é a base matemática para representar e modelar redes, e um método especialmente vocacionado para aplicações SIG e Transportes, segundo o modelo arco/nó (Miller e Shaw, 2001:458). Na realidade, são já muitas as aplicações que os SIG-T disponibilizam, que vão desde o trivial armazenamento e gestão de informação georreferenciada das redes de transportes, até aos modelos gravíticos, de gestão de tráfego e gestão de frota, ao associarem as funcionalidades SIG com a Detecção Remota, na aquisição de informação de grandes superfícies e com grande detalhe. "These GIS-T packages are capable of undertaking statistical analysis, including descriptive statistics and regression analysis. There is virtually no limit to what can be done with some of the software." (Black, 2003:278).

No entanto, este testemunho 'romântico' de Black não colhe consenso entre os profissionais da área, conforme se pode aferir através de uma abordagem e leitura acerca das funcionalidades de alguns dos mais comerciais programas SIG-T disponíveis no mercado. Para uma maior adequação dos métodos de análise espacial dos SIG aos modelos de transportes, um dos caminhos percorridos por alguns dos investigadores dos transportes, tem sido o da criação de um programa específico de análise de transportes, com algumas aplicações SIG.

Nesta perspectiva, mais do que a existência de alguns programas comerciais de SIG-T, o que se verifica é a existência de programas T-SIG, ou seja, programas de base dos modelos de transporte, que foram adoptar algumas das funcionalidades de aná-

lise espacial providenciadas pelos programas SIG. Apesar do sucesso comercial (a oferta condiciona a procura), a tarefa não tem sido totalmente bem sucedida, quer devido à incúria dos programadores, quer devido ao fraco apelo do mercado.

Como resultado tem-se a inexistência de um produto para os utilizadores de rotina, já devidamente experimentado, testado e que satisfaça as necessidades generalistas dos que trabalham com redes de transportes e comunicação e com métodos provenientes da Teoria dos Grafos e das redes complexas, combinada com algoritmia de análise espacial. A este propósito, não apenas geógrafos (Batty, 2003:3), mas também investigadores de outras áreas, como a Física, reparam que "We have not yet touched upon a factor which can seriously influence the structure of many networks: the geographic locations of vertices." (Dorogovtsev e Mendes, 2003:51).

Para uma noção mais prática e real acerca das aplicações SIG-T que os programas comerciais[59] do mercado disponibilizam, optou-se por fazer combinar algum conhecimento empírico com um pequeno trabalho de campo, marcado por algumas entrevistas a técnicos especialistas de algumas empresas nacionais a prestarem serviço na área dos transportes, e que operam com os mencionados programas SIG-T. Destas entrevistas duas notas de registo fazem a síntese das várias impressões obtidas:

- Os programas SIG-T no mercado não são auto-suficientes para dar resposta a questões que obriguem a uma análise relacional de transportes e do espaço. É frequente o recurso à migração de dados entre programas para completar tarefas (pe. 5Cube da CityLabs), o que se traduz em perda de tempo nos processos e perda de tempo em operações de certificação da integridade dos dados, que seriam dispensáveis caso fosse possível desenvolver todas as etapas processuais e de análise no mesmo programa, ou permite-se uma interactividade entre programas, através de funções *plug-in* (pe. *Plug-in* do ArcGIS para o EMME);
- Não existe ainda um mercado de *free software* na área dos SIG-T, quer seja para *download* directo da internet, quer seja para usar a internet como plataforma de base operativa (Web SIG-T). O que existe, é a disponibilização de *scripts*[60] e de pequenos e muito específicos programas para análise de redes, mas sem especificidade dos modelos de transporte ou dos programas SIG, e alguns apenas com um período gratuito para experimentação (p.ex. UCINET[61]; SANET[62]). Existem também algumas aplicações de transportes que podem ser operacionalizadas através da Web (p. ex., VISIUM-*on line* no módulo de gestão de tráfego ou o OmniTRANS Real Time edition para gestão de tráfego), mas que não são um Web SIG-T.

59 Os programas SIG-T mais comercializados são: VISIUM; TRANSCAD; EMME; CityLabs; Aimsun e OmniTRANS.

60 Texto que descreve os processos relativos à execução de um programa ou de uma determinada operação num programa. Caso um programa disponibilize um editor de script, significa que o utilizador pode adaptar o programa conforme as suas necessidades. Para estes casos é vulgar classificar o programa como de código aberto (*open source*).

61 Programa para análise de redes sociais e culturais, da *Analytic Technologies* (http://www.analytictech.com/).

62 Caixa de ferramentas para análise de eventos que decorrem numa rede, a partir de um plug-in para o ArcGIS 9.3. (http://sanet.csis.u-tokyo.ac.jp/sub_page/about_sanet.html).

Segundo Rodrigue e Andrey, são 4 as componentes que os SIG para transportes devem ter (cf. Figura. 20), a fim de poderem conceber modelos fiáveis da realidade:

FIGURA 20 QUATRO COMPONENTES DOS SIG-T

Adaptado[63] de Rodrigue e Andrey, 2009.

- Geocodificação – que significa a atribuição de códigos (espaciais e topológicos) para o armazenamento dos dados e respectiva representação.
- Gestão – a informação geocodificada é normalmente armazenada numa base de dados, com uma estrutura organizativa com base em referenciais espaciais (país, região, unidades censitárias, etc.); referenciais temáticos (rio, auto-estrada, caminho-de-ferro, etc.); ou referenciais temporais (ano, mês, semana, etc.). O importante é que a base de dados seja desenhada e organizada de modo a poder integrar grandes volumes de informação multifonte e multiescala, garantindo a sua integridade.
- Análise – que pode ir de uma simples inquirição à base de dados (distância-tempo entre um determinado troço de auto-estrada) até a uma pesquisa complexa de relações entre objectos do sistema de transportes (que impacto no uso do solo ou na estrutura da rede se um determinado troço for eliminado da rede de transporte).
- Saídas gráficas e visualização – trata-se de informar, sob a forma de mapa, gráfico, tabelas síntese e pequenos relatórios, os utilizadores acerca do que geralmente está encoberto nas relações espaciais dos objectos. Um SIG não é completo se não possuir ferramentas interactivas para tornar explícito e numa linguagem mais universal possível (o mapa) o que as bases de dados escondem, nomeadamente: a conectividade da rede, o estado do pavimento, as distâncias-tempo e distâncias-custo entre localidades, o risco de acidente por troço de estradas, etc.

63 url: http://www.people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch1en/meth1en/trspgis.html, consultado em Setembro de 2009

TABELA 3 FUNÇÕES SIG UTILIZADAS NAS DIFERENTES FASES DOS MODELOS SEQUENCIAIS DE TRANSPORTES

Funções SIG	**Fases dos modelos sequenciais de transporte**					
	Zonamento	**Geração de viagens**	**Distribuição de viagens**	**Opção modal**	**Afectação à rede**	**Análise de alternativas**
Gestão de dados espaciais						
Descrição						
Estrutura da rede						
Georreferenciação						?
Geo-relacionamento						?
Organização						
Codificação (índex)						
Gestão de dados espaciais e alfanuméricos						
Extracção de dados/criação de sub-esquemas						
Tamanho da base de dados						
Metadados						
Catalogação						
Manipulação de dados espaciais						
Conversão estrutura de dados						
Conversão geométrica						
Conversão de coordenadas						
Recuperação selectiva						
Classificação/análise por localização selectiva						
Simplificação						?
Agregação						
Desagregação						
Clustering						
Ligação						
Hierarquia da rede		?	?	?		?
Manipulação de dados espaciais e alfanuméricos						
Relação nó/arco						
Segmentação dinâmica						
Análise Espacial						
Medidas geométricas e topológicas						
Estatísticas descritivas						
Estatística dedutiva ou inferencial					?	
Operações de sobreposição						
Índices topológicos de redes						
Routing						
Simulação						
Linguagem de programação						

muito útil útil ? com potencial

Adaptado de McCormack e Nyerges, 1997

Sem estas componentes, os SIG-T não estão dotados de capacidade funcional para a realização de modelos de transportes. "A large gulf exists between the rich features and attributes of transportation systems in the real world and the data models used for their representation within a computer". (Miller e Shaw, 2001:53). Ainda a este respeito, McCormack e Nyerges referem que existem algumas funcionalidades SIG e.g., armazenamento, edição e saída gráfica que estão melhor dotadas para apoiar a modelação em transportes que outras, e.g., gestão, manipulação e análise. (McCormack e Nyerges, 1997).

Na realidade, o que é mais comum é a existência de programas SIG que vão contribuindo, pelas funcionalidades que os investigadores de transportes lhes reconhecem, para algumas fases de modelação em transportes (cf. tabela 3), mas poucos são os casos em que os SIG são parte integrante da investigação em transportes, para o desenvolvimento de modelos de análise. Assim, dos vários modelos de transportes (localização, uso do solo, grafos, optimização, gravítico, entropia, etc.), o que se permite verificar é uma ainda parca contribuição dos SIG (Andrey e Rodrigue, 2009; Shaw e Rodrigue, 2009).

Da leitura à tabela 3 pode-se verificar que as funções SIG são mais úteis na fase inicial (definição de zonas de análise) e final (afectação à rede) dos modelos clássicos de transportes. Nas outras fases, as suas potencialidades, segundo a comunidade dos transportes, são pouco desenvolvidas para darem o apoio necessário denotando dificuldades no manuseamento de atributos específicos, como fluxos destino, caminhos complexos e modificações temporais (Goodchild, 1998), e com algoritmos de análise espacial pouco sofisticados face à complexidade da informação afecta à modelação da rede de transportes (1999).

Também se podem interpretar os factos na perspectiva de que são os produtores de programas para análise de sistemas de transportes, que não exploram o suficiente as funcionalidades de análise espacial que os SIG têm para oferecer. Por parte dos utilizadores, a nota registada é que da relação cada vez mais próxima entre transportes e território, os estudos e projectos que académicos e profissionais têm desenvolvido, há uma maior exigência e necessidade em SIG-T mais evoluídos, já que o mercado verifica uma insuficiência.

Um problema típico, que espelha bem essa nota de insuficiência apontada aos programas SIG-T e que preocupa os analistas espaciais, prende-se com a determinação das fronteiras e das amostras, não obstante existir consenso sobre o facto dos fenómenos espaciais serem de natureza contínua e como tal, sem fronteiras fixas e radicais, mas sim *fuzzy*.[64] Segundo Burrough, os limites desenhados em mapas temáticos e.g., solo, vegetação, geologia, etc., raramente são precisos, e representar as suas fronteiras com linhas finas conduz a erros topológicos e a uma incorrecção grosseira da realidade. (Burrough, 1989:477)

64 O termo *fuzzy* representa um método para modelar fenómenos que se encontram numa situação de impasse classificativo, mediante uma escala de probabilidade / graus de pertença ou de aptidão.

Para esta dissertação foi criado um modelo com aplicações específicas, ou seja um modelo 'à medida' das necessidades que os objectivos traçados colocaram (cf. Introdução). Para tal, foi forçoso o recurso à programação (cf. Cap.5), com a declaração da algoritmia à máquina a partir de um programa embutido (*VBA*) num programa anfitrião de ambiente SIG (*plug-in* para o ArcGIS 9.* e a precisar do módulo *Network Analyst*), de forma a poder integrar-se no modelo criado a variável localização (georreferenciação) e a combinar a algoritmia de análise de redes, com as aplicações de análise espacial e estatística, bem como a visualização e a cartografia.

Em síntese, dir-se-ia que se desenvolveu um SIG-T, isto é um programa de base SIG, apostado nas funcionalidades de análise espacial e na georreferenciação, mas que integra e combina algoritmia de análise topológica dos modelos de transportes.

Capítulo 5
Modelo de Análise do Efeito Estruturante das Redes de Transporte no Território

A palavra modelo provém do italiano *modello*, uma derivação do Latim *modulus*, cuja raiz é *modu* que significa medida, o que confere ao conceito de modelo um teor de avaliação e de rigor. Mas falar-se de modelos para análise do território, implica falar de modelos em Geografia e, consequentemente, da sua importância no fazer Geografia, assim como dos problemas que foram persistindo, desde que os modelos foram usados de forma constante e sistemática nos estudos geográficos até à actualidade.

Desde as teorias economicistas de Adam Smith[65] (1776), às teorias de Thomas Malthus[66] (1805), que o espaço é considerado um recurso, um capital que precisa de ser bem gerido. É neste contexto, do espaço-recurso e do espaço-suporte físico, que a organização do território e a estruturação do espaço se assumem como vectores fundamentais para o desenvolvimento, e justificam a importância dos modelos espaciais.

O recurso aos modelos como forma de analisar, compreender, representar e explicar a natureza das interacções e dinâmicas dos sistemas decorrentes do espaço geográfico, continua hoje tão fundamental, quanto o foram os modelos matemáticos da década de 1960 (Wilson, 2000:60).

No contexto desta dissertação, a complexidade da análise do sistema da rede de transportes requer o uso de uma geografia computacional, que embora ainda não se encontre conceptualmente bem definida na história fragmentada da Geografia moderna (Haggett, 2001:25), está já fortemente radicada, quer a nível profissional, quer a nível académico, no ensino das Ciências Geográficas.

---

65 Considerado o pai da economia moderna e o mais importante teórico do liberalismo económico. Em "A Riqueza das Nações", criticava o mercantilismo e defendia a doutrina da livre iniciativa, como forma de promoção do crescimento económico e bem-estar social.

66 Apesar de economista, é também considerado um dos primeiros demógrafos. Dois dos seus mais conhecidos estudos: "Um ensaio sobre o princípio da população na medida em que afecta" (1798) e "Um ensaio sobre o princípio da população ou uma visão de seus efeitos passados e presentes na felicidade humana", incluíam uma análise relacional entre demografia e economia, na perspectiva da escassez dos recursos.

Neste capítulo procura criar-se um novo modelo de análise espacial para verificação e medição do efeito estruturante que as redes de transporte têm no território. Para o efeito, o recurso à computação torna-se um imperativo técnico e científico, uma vez que só assim é possível superar o conjunto de obstáculos que condicionam o trabalho de investigação dos investigadores que estudam o território, nomeadamente grande volume de informação, combinação de cálculos, abstracção dos métodos matemáticos, experimentação de hipóteses em tempo útil, construção de cenários, confronto com outros métodos, e ao mesmo tempo combinar teoria, dados e algoritmia para obtenção de uma representação espacial que responda sobre as características, propriedades e estrutura da rede de transportes e comunicação (Torrens, 2000:6). Alguns autores designam esta Geografia fortemente alicerçada no uso dos computadores chamou-se de Geocomputação (Openshaw, 1996).

Este capítulo trata da modelação em Geografia. Mais concretamente, apresentam-se os procedimentos necessários à criação de um modelo de análise do efeito das redes de transportes e comunicação sobre o território. Para realizar este objectivo, o capítulo está dividido em três partes: uma primeira, de cariz conceptual e teórico, que versa sobre definições e conceitos fundamentais na modelação em Geografia e como têm evoluído ao longo do tempo, face às transformações científicas e tecnológicas que têm ocorrido, não apenas no seio da Geografia, mas também noutras ciências com as quais a Geografia tem sabido trabalhar. Uma segunda parte, mais computacional, em que se ensaia a pré-modelação, ou seja, em que se avalia e realiza a aquisição, o armazenamento, a edição e se valida a informação geográfica que irá alimentar o modelo computacional. E, finalmente, uma terceira fase, que consiste na formalização do modelo e na sua operacionalização através de uma linguagem de programação orientada a objecto.

5.1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Para explicarem o que entendem por modelo, é frequente os geógrafos recorrem à definição de Haggett e Chorley: "a simplified version of reality, built in order to demonstrate certain of the properties of reality" (Haggett, 1965), completada dois anos depois "(…) Models are made necessary by the complexity of reality" (Haggett e Chorley, 1967). Posteriormente, já no século XXI, Haggett reedita uma nova versão da sua obra 'Geography: A Global Synthesis' em que acrescenta à definição a seguinte informação: "They are prop to our understanding and a source of working hypotheses for research. They convey not the whole truth, but a useful and apparently comprehensible part of it" (Haggett, 2001).

Numa tentativa de trazer consenso sobre a forma como os modelos podem ser classificados, Haggett sugere que os modelos podem ser vistos segundo três perspectivas diferentes: 1) a perspectiva substantiva, para se referir a uma representação pura; 2) a perspectiva adjectiva, quando se refere a uma representação ideal e, 3) o modelo como um verbo, para se referir a uma demonstração-tipo, como seja "…a model railway or a model husband…" (1965:19; 2001:23).

Outros autores (Ackoff *et al*)[67] advogam que os modelos podem ser vistos como icónicos, análogos e simbólicos, em que cada um deles representa um grau maior de abstracção da realidade. Nesta perspectiva, os modelos de dados podem ser classificados de acordo com o nível de abstracção devem ser considerados em quatro níveis distintos:

Nível do mundo real – Contém os fenómenos geográficos reais a representar, tais como rios, ruas, topografia, uso do solo, etc.;

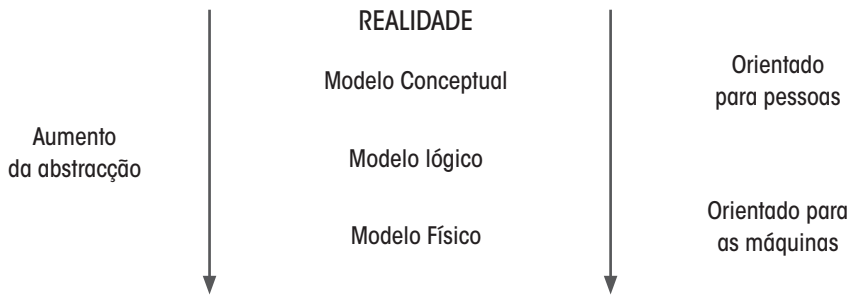
Nível conceptual – Teoria. Descreve o Mundo real a partir de um conjunto de conceitos formais com os quais as entidades geográficas podem ser modeladas;

Nível de apresentação – Oferece as ferramentas com as quais se pode especificar os diferentes aspectos visuais que as entidades geográficas têm de assumir ao longo do seu uso nas diferentes aplicações. É ainda neste nível que são definidas as categorias e classes de dados, o tipo de variáveis (contínuas ou discretas) e que são desenhadas as bases de dados;

Nível de Operacionalização - Define os padrões, as formas de armazenamento e as estruturas de dados a aplicar. É ainda nesta fase que se definem os tipos de relações entre as camadas de informação geográfica, as funções necessárias e os métodos utilizados.

Tal como Haggett e Ackoff, também Longley *et al* propõem uma forma de classificar os modelos, a saber: os modelos classificam-se de acordo com os níveis de abstracção que vão realizando, e que segundo eles são três os níveis de abstracção: modelos conceptuais (mais descritivos e orientados para serem compreensíveis por todos); modelos lógicos (menos generalistas, mas já detalhando níveis ou camadas de informação e a forma como se devem cruzar por etapas do modelo) e modelos físicos (abstractos e unicamente orientados para a sua operacionalização computacional). (Longley *et al*, 2001).

FIGURA 21 NÍVEIS DE ABSTRACÇÃO DOS MODELOS

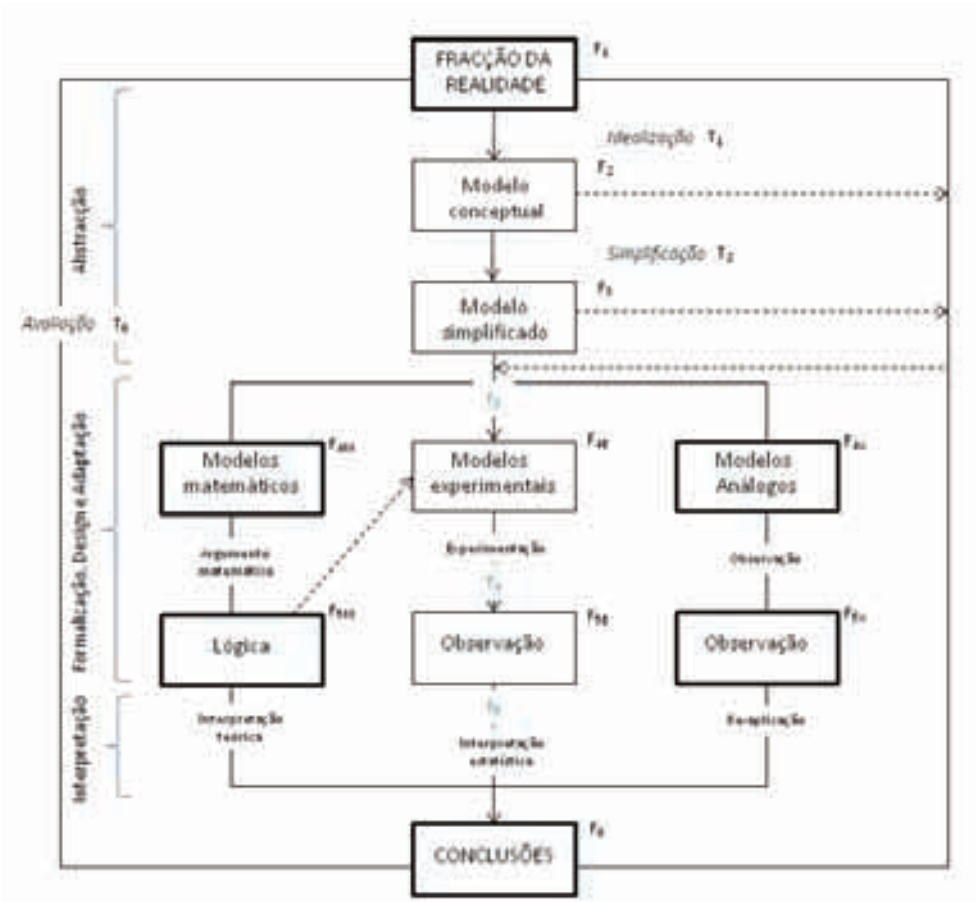


Adaptado de Longley et al, 2001

67 Citado por Haggett, 1965 *in Locational Analysis in Human Geography*. London. Edward Arnol:19

Com o intuito de criar um modelo dos modelos em Geografia, Chorley, em 1964 desenhou um diagrama onde expôs uma metodologia que deveria ser comum a todos os modelos espaciais (geográficos) e temporais (históricos), em que cada fase (F_i) do modelo é ligada sequencialmente por processos de transformação (T_j).

FIGURA 22 MODELO DOS MODELOS



Adaptado de Chorley, 1964:129

Na primeira secção, referente à abstracção, a preocupação relaciona-se com os processos de adequação à realidade, que devem ser ao mesmo tempo, complexos o bastante para que se possa melhor compreender a realidade, mas suficientemente simples, para que mantenha a exactidão e a veracidade. Um aspecto importante que Tobler refere, sobre o objectivo da modelação, é que todos os modelos procuram soluções simples para problemas cada vez mais complexos (Tobler, 1970).

A segunda secção integra três etapas fundamentais: o formalismo dos modelos matemáticos, o experimentalismo na modelação e a adaptabilidade dos modelos. Nesta secção, a principal preocupação apontada por Chorley consiste em conseguir modelos que sejam capazes de representar parte (a que interessa) dos sistemas idealizados.

Por fim, a terceira secção congrega os processos de transformação (interpretação teórica, interpretação estatística e reaplicação dos resultados ao sistema original), isto é os processos que permitem o confronto com a realidade, e a verificação teórica (lógica).

Aludindo à importância que os modelos têm na ciência, e particularmente na Geografia teórica e quantitativa, Wilson[68] (1972) salienta a mudança radical que a introdução dos computadores veio trazer para a prática dos trabalhos geográficos.

O período anterior aos computadores é marcado pelos grandes obreiros dos primeiros modelos de localização espacial, e.g., Von Thunen (modelo lógico matemático), A. Weber (modelo analógico); W. Christaller e A. Losch e também aqueles que, sob o chapéu da Física social e mais focados na problemática das interacções entre fenómenos, desenvolveram modelos do tipo gravítico (W. Reilly; K. Zipf e J. Stewart), e das migrações (E. Ravenstein e S. Stouffer).

Após o aparecimento dos primeiros computadores, por volta da década de 1950, Wilson identifica duas revoluções que contribuíram para o desenvolvimento da teoria em Geografia: a revolução estatística e a revolução modelística. Ambas são um reflexo da maior facilidade providenciada pelos computadores na operacionalização da informação espacial mediante o uso de técnicas de análise apoiadas em fundamentos teóricos.

A análise de redes é apontada por Wilson como um paradigma da revolução modelista (Wilson, 1972).

Enquanto na revolução estatística, Garrison e a escola de Washington da década de 1960 constituíram o marco mais relevante, na revolução modelstíca foram os trabalhos iniciais de Haggett e Chorley, mais precisamente, *Locational Analysis in Human Geography* (Haggett, 1965) e *Models in Geography* (Hagget e Chorley, 1967), que constituíram as principais referências.

Todavia, apesar do esforço de Wilson para dissipar alguma da 'névoa' que envolvia as denominações de Geografia teórica, Geografia quantitativa e modelos, um outro tipo de 'ruído' permanecia (provavelmente por ambos os conceitos aparecerem muitas das vezes associados), mais precisamente entre o conceito de modelo e o conceito de sistema. Numa tentativa de clarificação, alguns autores aproveitam a definição de modelo para estabelecer a diferença e sublinhar o que os relaciona. Odum, ao introduzir o conceito de ecossistema (sistema constituído pelas componentes bióticas

68 Wilson, Alan (1972). Theoretical geography: some speculations. Transactions of the Institute of British Geographers, nº 51: 3-44. JSTOR.

e abióticas), foi provavelmente um dos primeiros a fazer essa ressalva ao mencionar que "Um modelo é uma formulação que imita um fenómeno do Mundo real…", e que o Mundo real era o resultado da interacção dos sistemas. (Odum, 1988:9). Mas Odum não era geógrafo e o problema persistia no seio da Geografia.

Chisholm, aponta a ligação entre a Teoria Geral dos Sistemas[69] (desenvolvida em torno do conceito de sistema) e a Geografia, identificando Chorley (1962) e Haggett (1965) como os principais responsáveis pela introdução do termo 'teoria geral dos sistemas' na literatura geográfica, sendo os exemplos sugeridos por Haggett um sustento desta sua afirmação (Chisholm, 1967).

Com efeito, Haggett apontava para a Geografia Física o exemplo de um sistema de erosão, cujas componentes eram os declives, as linhas de água e as bacias hidrográficas, que em interacção se manifestavam através da circulação da água, arrastamento de terra e da sedimentação. Como *input* do sistema apontava a chuva. Para a Geografia Humana, Haggett sugeria o sistema da região nodal; as componentes são as cidades, vilas, indústrias, etc., que manifestam a sua interacção pela circulação (possível pelo sistema de transportes) de pessoas, de dinheiro e de bens. O *input* energético do sistema era as necessidades biológicas e sociais das comunidades. (Haggett, 1965:17).

Sobre os modelos e modelação é correcto afirmar-se que existe sempre uma certa subjectividade, na medida em que os modelos são orientados para o problema que procuram resolver e condicionados, quer pela informação possível, quer pela formação científica dos autores. Os modelos podem ser abordados e concebidos a partir de várias perspectivas e de múltiplas formas. Contudo, são os modelos que permitem aos investigadores focarem a sua atenção sobre aquilo que é substantivo no problema em causa, e filtrar o 'ruído' de forma a extrair as respostas às questões que levaram à sua criação.

Sobre a importância de se conhecer melhor o que são e perceber qual o papel que os modelos assumem, em particular nas ciências geográficas, Kuby *et al*. (2005:3) sublinham a necessidade de se criar uma classificação, com base em oito parâmetros:

- [1] A função (o que faz?): trata-se de saber exactamente aquilo que o modelo faz, e não tanto aquilo para o qual foi construído. Neste ponto, os autores indicam que os modelos podem ainda dividir-se em quatro tipos de acordo com a sua função:

  a) Modelos descritivos - modelos que têm por objectivo representar a realidade e.g., mapas, redes, índices, diagramas e gráficos;
  b) Modelos explicativos ou interpretativos - modelos que tentam responderem à questão: porquê?

69 Cf. BERTALANFFY, L. (1950) – An Outline of General System Theory. The British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1, Nº2 :134-165.

c) Modelos preditivos[70] - modelos que procuram prever o(s) resultado(s) com base num determinado conjunto de variáveis de entrada. Tentam responder à questão: e se?
d) Modelos determinísticos - modelos que determinam qual a melhor forma de actuar, face a um determinado problema.

- [2] A composição (de que é feito?): remete-nos para categorias de modelos que relevam da sua natureza, i.e., modelos físicos, modelos conceptuais ou como os autores afirmaram "as nearly all models of transport network topology are mathematical and/or graphical". Kuby *et al.* (2005).
- [3] O mecanismo (os procedimentos causa-efeito estão incluídos no modelo?): Trata-se de diferenciar os modelos 'processo-resposta' dos modelos 'caixa-preta'. Nos modelos 'processo-resposta', as componentes e as relações causa-efeito estão representados de forma explícita. Nos modelos 'caixa-preta', a relação causa-efeito está presente, mas não integra explicitamente o processo. Para melhor entendimento, considere-se como exemplo de um modelo 'caixa-preta', um grafo da relação entre o volume de tráfego e a velocidade média numa auto-estrada. A relação está implícita. Por outro lado, um modelo que procure simular o comportamento de um condutor é um modelo 'processo-resposta', em que a relação causa-efeito está explícita nos procedimentos do modelo. Ambos os modelos apresentam vantagens e desvantagens[71], pelo que a decisão passa por saber o que melhor se adapta à natureza da informação e ao problema a resolver. Em muitos casos, recorre-se a modelos híbridos.
- [4] O Espaço (como considerar a dimensão espaço geográfico?): Nem todos os modelos consideram a dimensão espacial (p.ex. os modelos microeconómicos de oferta-procura), muito embora esta seja uma componente fundamental em muitos processos, especialmente nos que interessam aos geógrafos. Apesar da generalidade dos modelos sobre transportes serem explicitamente espaciais, a forma como tratam o espaço é um factor de distinção. Efectivamente, os modelos de transportes podem encarar a dimensão espaço de diversas formas: numa perspectiva gráfica: espaço linear (função distância a partir de um aeroporto, ou estação caminho-de-ferro), espaço topológico (grafo), espaço bidimensional (2D, mapa) ou tridimensional (3D, uma maqueta); numa perspectiva computacional (p.ex em ambiente SIG): espaço contínuo, ou espaço discreto; espaço vector ou espaço matricial. Uma vez mais, as decisões passam, quer pela natureza da informação disponível, quer pelo tipo de problema a resolver ou a representar, sendo que tanto a complexidade como adequação do modelo são afectadas pela decisão tomada.

70 Um modelo preditivo também pode ser um modelo determinístico (quando apresenta uma solução face a um dado conjunto de valores das variáveis de estudo) ou um modelo probabilístico (quando apresentam uma série de soluções possíveis – com os respectivos valores de probabilidade associada - para o tal conjunto de valores das variáveis de entrada).

71 "process-response models tend to be more complex, but not necessary more realistic because …depend on accurate depiction of the underlying mechanisms whereas black-model can be finely tuned to the outcomes that one is trying to model. On the other hand, black-box models may be less generalizable outside of the context in which they were fitted, whereas process-response models may do far better and understanding interactions in a complete new context for which they are no data yet" (Kuby, *et al.*, 2005:4)

- [5] O tempo (como considerar a dimensão histórica?): Os modelos podem ser estáticos ou dinâmicos. Os modelos estáticos não conseguem considerar mais do que um período temporal, ao invés dos modelos dinâmicos que representam explicitamente vários períodos ao longo de uma determinada linha temporal. Os modelos dinâmicos podem ainda subdividir-se em modelos contínuos, permitindo a qualquer instante a ocorrência de um evento e os modelos discretos, que fazem quebras temporais entre várias representações de evento.
- [6] A certeza (os valores de *input* para o modelo são conhecidos com que grau de precisão?): Trata-se aqui de uma distinção entre modelos determinísticos e modelos probabilísticos ou estocásticos. Para os primeiros, conhecem-se bem os valores de *input*, pelo que para os mesmos dados de *input*, o modelo dará sempre as mesmas respostas. Nos segundos, para alguns valores existe incerteza, pelo que se lhes atribui um valor de distribuição probabilístico em vez de um valor exacto. Para estes modelos, ditos probabilísticos ou estocásticos, os resultados vêm sobre a forma de uma série de valores, cada um associado a uma probabilidade ou dão resultados ligeiramente diferentes sempre que o modelo for processado, independentemente de serem sempre os mesmos *inputs*, razão pela qual são processados diversas vezes, como é o caso dos modelos do tipo Monte Carlo.
- [7] As relações matemáticas (está-se presente um modelo linear ou não-linear?):
  a) As relações matemáticas nos modelos podem ser lineares ou não-lineares. As funções lineares são vulgares, quer por produzirem resultados que são razoáveis aproximações da realidade, quer pelo manuseamento menos complexo dos métodos que integram. Para a construção de algoritmos, uma linguagem de programação linear, com valores inteiros, permite facilmente modelar situações binárias (0, 1) como um sistema de apoio à decisão (p.ex. um modelo de decisão de redes de transporte, permite determinar se é viável ou não o investimento na infra-estrutura.).
  b) Todavia, existem problemas que são não-lineares (p.ex: custo inerente a determinado traçado rodoviário) e cujas variáveis são muitas e nem sempre discretas. Estes são problemas que requerem um modelo não-linear de apoio à decisão.
- [8] A resolução ou escala (qual é a unidade mínima de análise?): A este nível, a grande distinção que se faz em modelos de transportes, é entre modelos agregados e modelos desagregados. Os modelos agregados modelam um conjunto de aspectos do sistema de transportes numa determinada área, e.g. concelho, região, metrópole, país, estado, etc. Os modelos desagregados, por outro lado modelam aspectos específicos e individuais, baseados na localização ou em características socioeconómicas, sem fronteiras administrativas ou estatísticas definidas.

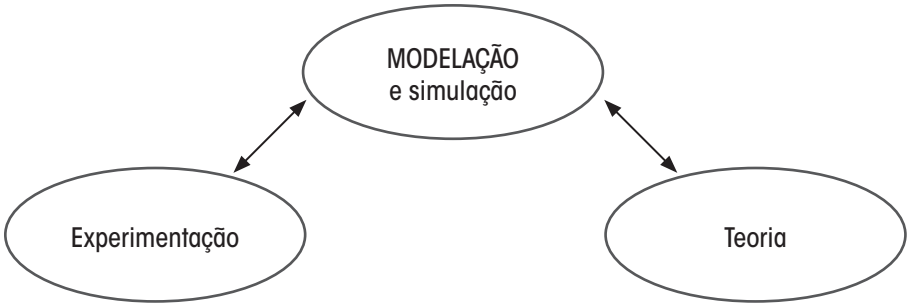
Sobre os modelos em Geografia, a história diz que foram os modelos de sistemas de transporte ou os modelos territoriais dependentes do sistema de transporte (as variáveis, acessibilidade e mobilidade), os que inicialmente mais se destacaram (cf. Tabela 1) e que, segundo Chisholm, eram um bom exemplo do princípio geral que refere na teoria geral dos sistemas, de que todas as coisas estão relacionadas umas com as outras (Tobler, 1970) e que o significado de uma depende da sua relação com as outras (Bertalanffy, 1950).

Actualmente, com as tecnologias de tratamento de informação e, particularmente, com a capacidade de computação, a dominarem os mecanismos de desenvolvimento e de tendências sociais e científicas, novas disciplinas surgem a partir de outras mais clássicas e, contrariamente ao que seria esperado - mais disciplinas, mais opiniões, mais 'ruído' -, a verdade é que estas novas disciplinas e.g., SIG, CIG e a Geocomputação ajudaram a concertar divergências e a atingir consensos acerca de algumas questões sobre conceitos (como são os casos das interrogações em torno do conceito de modelo e da interacção entre Geografia teórica e Geografia quantitativa actual) ao levantar de novo a discussão.

A este respeito, Fotheringham, Brunsdon e Charlton consideram que, apesar da geografia teórica e quantitativa ser considerada, por parte dos que estão fora da comunidade, como uma área estática de estudo, a verdade é que se tem verificado na última década um crescente e renovado interesse, não apenas metodológico e tecnológico que está obviamente implícito e é importante, mas também de base intelectual e formal, que reflecte as mudanças filosóficas na abordagem que os SIG e outras tecnologias de informação geográfica vieram trazer para a Geografia teórica e quantitativa (Fotheringham; Brunsdon; Charlton, 2000).

Neste renovado interesse podemos incluir métodos de análise espacial, a inteligência artificial, a modelação dinâmica espaço-tempo, a visualização e a análise espacial, as probabilidades e a incerteza, a estatística linear e não-linear, numa discussão em que Armstrong (2000) apela à relação entre a Geografia e a Ciência computacional[72], sublinhando o papel que a modelação reassumiu nesta 'nova Geografia', computacionalmente intensiva no que toca aos métodos, à gestão e análise de informação, à modelação e simulação (cf. Figura 23), fecunda no que toca à teorização, sublinhando, assim, a definição de modelo já proposta por Wilson: "…a formal representation of a theory…" (Wilson, 1972:37).

FIGURA 23 RELAÇÃO ENTRE A GEOGRAFIA E A CIÊNCIA COMPUTACIONAL



Adaptado de Longley et al, 2001

72 "…it is important to draw a distinction between computational science and computer science. Through they are related, computational science is concerned with the application of computer technology to create knowledge in a particular problems domains" (Armstrong, 2000:146)

Ainda sobre a computação no exercício da Geografia, Armstrong faz notar que muitos dos modelos existentes e praticados são de base espacial e são computacionalmente intensivos, e se os geógrafos 'falharem' na sua contribuição para este domínio, outros investigadores irão aproveitar e desenvolver métodos, fundamentalmente, espaciais e que são familiares à Geografia, apropriando-se deles e reinventando-os, criando novos conceitos e teorias. São estes os argumentos apresentados por Armstrong para sublinhar a razão pela qual os geógrafos se devem preocupar em desenvolver o seu trabalho numa perspectiva computacional (Armstrong, 2000).

No que se refere ao uso intensivo da computação e à importância dos modelos na análise de informação geográfica, novas disciplinas têm surgido. Uma das disciplinas que mais força tem vindo a assumir no seio da Geografia, tem sido a Geocomputação, cujo termo se atribui a Openshaw que o terá usado pela primeira vez em 1996, no intervalo de uma reunião preparativa para a organização de uma conferência intitulada Geografia Computacional, para promoção do recém-criado Centro de Geografia Computacional de Leeds (Openshaw, 2000).

A Geocomputação começou a conquistar maior popularidade a partir da década de 1990 e é apontada como a legítima herdeira da "Nova Geografia" ou da Geografia teórica e quantitativa[73] surgida na década de 1960 (Openshaw, 1996; Abrahart, 1996; Anselin, 1998; Longley, 1998; Batty, 2001; Sui, 2004), e embora se reconheça que a sua afirmação se deva aos SIG – Geocomputação é aquilo que sucede à criação da Base de Dados SIG e à representação de praticamente tudo o que pode ser representado a 2D e a 3D (Openshaw; Abrahart, 2000) –, mais concretamente ao facto de os SIG terem criado um ambiente mais 'simpático'[74] para a geocomputação, são domínios diferentes e portanto recorrem a conceitos diferentes.

A respeito desta diferenciação, Longley faz a ressalva de que: "The environment for geocomputation is provided by geographical information systems, yet what is distinctive about geocomputation is the creative and experimental use of GIS that entails. The hallmarks of geocomputation are those of research-led applications which emphasize process over form, dynamics over statics and interaction over passive response." (Longley, 1998:3).

Para Torrens, a Geocomputação é composta por três componentes inter-relacionadas, que a definem:

- Trata a informação de base geográfica, sem constrangimentos de fonte ou formato (não precisa sequer de vir de um ambiente SIG);
- Utiliza tecnologias computacionais capazes de formular matematicamente um

73 Diz-se teórica e quantitativa porque é uma teoria construída a partir de métricas eg. repetidos processos, observações, hipóteses, modelos, validação e calibração até à re-formulação de princípios e ao re-início de todo o processo, para testar novas hipóteses.

74 O termo simpático (ou amigável), em computação significa a existência de um interface gráfico acessível a utilizadores menos experientes na computação e programas de código aberto.

problema geográfico e de criar possíveis soluções, quer sob a forma gráfica (mapa, estatística, gráfico, imagem), quer sob a forma alfanumérica (tabela, texto).
- Tem elevada performance de processamento computacional (Torrens, 2004).

Pode afirmar-se que a geocomputação veio permitir a integração dos métodos da Geografia quantitativa com a mais evoluída tecnologia de análise espacial (Ono e Murayama, 2003:1), o que tem conduzido a um retomar da modelação nas ciências geográficas, com particular destaque para a Geografia.

No caso concreto dos modelos para estudar a topologia de uma rede de transportes, consoante os autores, os modelos construídos e aplicados são diversos e estruturam-se de forma diferente (Kuby; Taaffe; Gauthier; O'Kelly; Haggett). Tentando sintetizar as diferentes posições expostas na literatura da especialidade podem definir-se duas grandes linhas de abordagem: uma, que identifica sem nenhuma ordem ou hierarquia aparente, uma lista discricionária de modelos; outra que estrutura os modelos em categorias, classes e sub-classes.

A ilustrar estas duas diferentes abordagens veja-se o trabalho de Kuby *et al* (2005) para a primeira das situações em que identificam em forma de lista, seis grandes classes de modelos para o estudo da topologia das redes de transportes, a saber: SIG; Teoria dos grafos; Redes complexas; Programação matemática; Simulação e Agentes e Multi-Agentes. Para o segundo caso, o trabalho de Taaffe, Gauthier e O'Kelly divide os modelos em descritivos e analíticos (Taaffe *et al*, 1996).

Sobre a relevância do formalismo da Teoria dos Grafos, nos estudos de transportes, Haggett (2001:412) refere que estes providenciam apenas um passo inicial, e que as ferramentas mais evoluídas para uma análise do sistema de transportes são o ratio custo-benefício e os modelos de localização e alocação. Mas esta dissertação não trata de uma análise ao sistema de transporte, mas sim ao efeito das redes de transportes e comunicação sobre o território, mais precisamente sobre o sistema urbano. Nesta perspectiva, Haggett diz ainda que os grafos prestam-se a avaliar o delicado equilíbrio entre o sistema urbano e a rede de transportes, que lhes permite comunicarem e, consequentemente, ganhar vantagens relativas.

É neste enquadramento teórico, que se propôs criar um modelo SIG-T, cujo objectivo principal reside na capacidade de análise do efeito estruturante das redes de transportes sobre o território, constituindo-se assim, simultaneamente, como um precioso instrumento de apoio ao exercício do planeamento e ordenamento territorial, e um instrumento de apoio à tomada de decisão fundamentada, por parte de gestores e outros intervenientes no território.

À parte do objectivo principal, o modelo criado (modelo *geo_grafo*) vem permitir a representação e uma melhor compreensão da relação entre os sistemas de transporte e o território, cuja escala ou complexidade da rede poderiam, de outra forma, colocá-los fora do nosso alcance de compreensão. Trata-se de um modelo geográfico - no que respeita ao seu objecto de estudo e natureza aplicativa -, de base matemática,

formulado e compilado para correr num ambiente SIG, ou seja, para se programarem os algoritmos para serem aplicadas a qualquer conjunto de dados geográficos topológicos e georreferenciados, mediante uma aplicação *plugin*[75], num programa SIG hospedeiro.

5.2. CONCEPTUALIZAÇÃO DO MODELO

A conceptualização do modelo consiste em estabelecer as relações fundamentais entre as diferentes fases processuais, que respeitam à categoria de fenómenos que se quer compreender. É geralmente apresentado e explicado mediante um esquema, de forma a tornar mais compreensível a arquitectura do projecto e o entrosamento das várias etapas que o estruturam. Deve ser acessível a um leitor menos familiarizado com linguagem técnica, e orientado numa lógica sequencial de etapas processuais desde a aquisição da informação, passando pelo armazenamento e a gestão da informação até à etapa da obtenção e visualização dos resultados, sempre em torno de um (ou mais) objectivo(s). (Longley *et al*, 2001; Matos, 2001).

Conscientes de que o espectro de aplicabilidade de um modelo é inversamente proporcional à sua especificação, a algoritmia programada invoca a Primeira Lei de Tobler (*TFL)* (Sui, 2004) permitindo a análise de quaisquer redes geográficas, embora o ensaio seja feito sobre as redes de transporte.

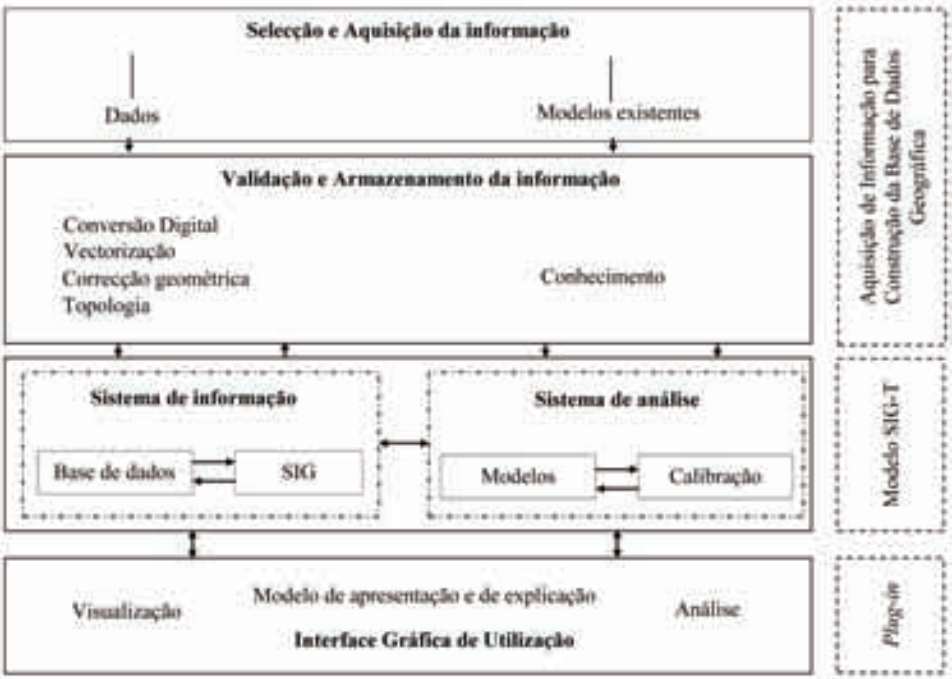
A fase de conceptualização do modelo antecede as fases de operacionalização do modelo e serve de guia ao desenvolvimento de todo o projecto, o que a transforma na mais determinante das fases, uma vez que é, simultaneamente, aquela que é mais consumidora de tempo (implica pesquisa da informação, verificação das suas características e compatibilização de forma a integrar o sistema), e que é mais onerosa (apesar de cada vez mais existir informação digital disponível gratuitamente na internet, ainda não existe informação suficiente para se poder desenvolver um projecto técnico/científico; esta tem de ser adquirida nas instituições produtoras, que a vendem a valores proibitivos para particulares não financiados).

Para esta dissertação, o modelo geográfico conceptual estruturou-se em quatro módulos sequenciais que estão agrupados em três blocos operativos (Figura 24), segundo uma hierarquia funcional vertical, de cima para baixo, com níveis de complexidade cada vez maiores.

O primeiro bloco do modelo conceptual (Aquisição de Informação para Construção da Base de Dados Geográfica) corresponde aos módulos 1 (selecção e aquisição de

75 Uma aplicação (programa de computador) que pode ser adicionada ao programa hospedeiro, para colmatar funcionalidades necessárias ao exercício de análise pretendido, e inexistentes no programa de base hospedeiro. É normalmente um programa mais leve e só é acrescentado ao programa base, quando o utilizador o requerer, mediante opção menu ou botão, no interface do programa hospedeiro. Pode dar acesso a um interface gráfico próprio, com campos de preenchimento para o utilizador (ordens opcionais que determinam as variáveis para o algoritmo analisar), ou ser apenas um botão de execução directa.

FIGURA 24 BLOCOS DO MODELO CONCEPTUAL



Adaptado de Longley et al, 2001

informação) e 2 (Validação e Armazenamento da informação geográfica). Trata-se, de uma forma sintética, de pesquisar fontes de dados possíveis para aquisição de informação que posteriormente possa alimentar o segundo bloco, suportando o sistema de informação e constituindo matéria-prima para ser operacionalizada.

A importância deste bloco, na estrutura do modelo e, consequentemente, no projecto, é fundamental, pois é da qualidade e adequação da informação que todo o modelo depende.

Na selecção da informação não pode haver lugar a equívocos ou ambiguidades. Todas as questões que se colocam à partida devem ser respondidas de forma cabal, nomeadamente, Que tipo de informação seleccionar? Que volume de informação? Quando é suficiente? Qual o estado (analógico ou digital) em que se encontra a informação? A que escala foi produzida? A que período temporal e espacial corresponde? Qual o sistema de projecção da informação cartográfica e que *datum* foi utilizado para a sua georreferenciação? Qual a entidade produtora? São apenas alguns exemplos das questões a que é necessário responder.

As características da informação têm também de estar conforme os objectivos do modelo e adequadas entre si, pelo que se tem de dar especial atenção às características da própria informação espacial ou seja aos metadados[76]. Existem dois níveis de informação sobre a informação, que devem ser acautelados logo na fase inicial de selecção. O primeiro constituído pelas informações de carácter geral que, independentemente da temática e objecto de estudo devem ser sempre consideradas (as questões acima mencionadas representam claramente este grupo); o segundo, com as informações de carácter particular, condicionadas à temática investigada e ao objecto de estudo. O ponto seguinte esmiúça algumas dessas questões, que se consideram fundamentais.

5.3. BASE DE DADOS DE *FEATURES*[77] LINEARES EM SIG PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO

Nesta fase inicial da construção de conhecimento no domínio dos SIG existe na bibliografia, uma certa ligeireza no uso e na aplicação dos termos dados, informação, objecto, entidade, característica, indicadores e índices. No âmbito desta dissertação, importa saber o que se entende por cada um destes termos:

Dados – informação no seu estado bruto, ou seja, sem tratamento específico. Normalmente, os dados resultam de uma primeira pesquisa e por isso, não estão em condições de poder integrar um SIG. São valores indicativos que vão permitir optar pelos tratamentos posteriores.

Ex: os mapas das redes de transporte; as tabelas dos recenseamentos gerais da população; etc.

Entidade, objecto e *característica* – designações que decorrem da tentativa de tradução do termo inglês *feature*, vulgarmente utilizado em CIG. Segundo Matos (2000) por entidade, entende-se qualquer fenómeno do 'mundo-real' não divisível em fenómenos semelhantes, e por objecto, a representação física (digital) dessa entidade, com a informação alfanumérica que lhe está associada. Ex: estrada; ferrovia; lugar.

Indicadores – parâmetros que, isolados ou combinados, permitem os tratamentos de estatística e de espacialização referenciada pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG), com vista à análise e produção de informação nova. Não sendo obrigatoria-

76 "Os metadados de informação geográfica não são mais do que uma descrição textual, de forma normalizada, da informação geográfica. A sua documentação é indispensável para a identificação e avaliação técnica (escala, sistema de referência, qualidade, extensão geográfica e temporal) dos conjuntos de dados geográficos (CDG), assim como aspectos ligados ao acesso a serviços e dados e contactos dos responsáveis." (Silva, 2009:1).

77 Por força de muitos dos programas e literatura da especialidade ser maioritariamente produzida em língua inglesa, a terminologia corrente e mais universal é também inglesa. Contudo, alguns autores (Matos, 2000) têm defendido a tradução e adaptação dessa terminologia à língua materna. No caso português, a tradução possível é *característica*, termo que será usado em itálico, sempre que nos referirmos a *feature*.

mente numéricos (embora nesta dissertação sejam usados estritamente nesse sentido), os indicadores são de grande importância, na medida em que são sobretudo qualificativos.

Ex: grau de coesão de uma rede; potencial de interacção entre lugares; nível de acessibilidade de um nó.

Índices – resultam da agregação ou combinação dos indicadores, segundo vários métodos ou processos.

Ex: índice de dispersão da rede; índice de desenvolvimento de uma determinada região (inclui indicadores de conectividade e ligação da rede); índice de eficácia.

Geralmente acontece que os dados existentes (sobretudo quando são dados anteriores ao período de digitalização da informação geográfica)[78] encontram-se desestruturados e desorganizados, não estando em condições de integração directa num SIG (estão em formato analógico, ficheiros CAD, formato dxf, etc.). É a forma como os dados se vão organizar, e como serão definidas as relações entre eles, que vai definir o modelo de dados geográficos.

Desta forma, para que os dados possam constituir informação geográfica válida para SIG, devem reunir três condições essenciais, que os distinguem de outros tipos de dados:

- Referenciação geográfica (georreferenciação): os dados geográficos devem estar localizados no espaço mediante um sistema de coordenadas referente a um sistema de projecção cartográfica. Este facto por si permite evidenciar de forma imediata a presença ou a ausência de padrões;
- Atributos: os dados geográficos devem estar relacionados com atributos alfanuméricos que definem ou descrevem, de forma mais ou menos simplificada, a sua natureza. Assim, cada elemento gráfico representa uma entidade no terreno (ferrovia, estrada, lugar, …), a qual pode, por sua vez, ser caracterizada por um conjunto de atributos e respectivos valores (comprimento, população, acessibilidade, fluxo, entre outros)
- Relações topológicas entre os elementos: os elementos presentes no modelo de dados devem estar relacionados espacialmente tendo por base um conjunto de parâmetros (contiguidade, conectividade, sentido, proximidade, etc.). As relações entre entidades geográficas no mundo real são geralmente inúmeras e complexas, pelo que o seu armazenamento dentro do SIG deve ser feito de forma seleccionada, tendo em atenção a sua relevância para o estudo a efectuar ou modelo a construir.

78 Apesar de existirem outros projectos (cf. Cap.4) que antecedem a institucionalização do Sistema Nacional de Informação Geográfica (SNIG), em 1986, foi esta a entidade que materializou uma vontade política nacional de digitalizar toda a cartografia temática e tratamento e classificação de imagens de satélite, com o intuito de criar uma base de dados de toda a informação de natureza geográfica, ou geograficamente referenciável, de âmbito nacional, regional e local. (Machado, 2000:321; CNIG, 1993:12)

Tendo em consideração que nesta dissertação faz-se uma análise espácio-temporal, a fonte de dados resulta assim de um acordo tripartido entre os períodos temporais em análise, o objecto de estudo, a existência ou não dos dados e a qualidade em que se encontram.

Tem-se então como fontes de dados para a Base de dados das rodovias:

- Mapa das Estradas Romanas extraído da publicação "Portugal Romano", de Jorge Alarcão (1974), Ed. 33, e referente ao Itinerário de Antonino, redigido no Século III, d.C.
- Mapa dos Itinerários de Portugal 1800 extraído da publicação "Transportes e comunicação em Portugal, Açores e Madeira (1750-1850)", de Artur Teodoro de Matos (1980).
- Mapa do Plano Rodoviário de 1945 extraído do Decreto-lei 34593, de 11 de Maio de 1945.
- Mapa do Plano Rodoviário Nacional de 1985 extraído do Decreto-lei 380/85, de 26 de Setembro de 1985.
- Mapa do Plano Rodoviário Nacional extraído do Decreto-lei 222/98, de 17de Julho.

Ainda, e tal como referido acima, foi fundamental para a concretização da segunda fase do processo de aquisição de informação a partir dos mapas, uma outra fonte de dados, a dos valores da população residente por lugares[79], a partir dos Recenseamentos Gerais da População de 1940, 1991 e 2001.

Para todos estes mapas rodoviários que constituíram fonte de dados, o processo de aquisição e armazenamento de informação numa Base de dados geográfica da rede de transportes para Portugal Continental desdobrou-se em três fases operacionais:

- Rasterização e georreferenciação dos mapas;
- Criação da Base de Dados Geográfica e vectorização das redes e dos nós (cruzamentos das linhas e lugares existentes à data, segundo os Censos, e referenciados no documento de base); e
- Conversão da geometria das redes em *características* topológicas.

Para especificar os procedimentos técnicos que levaram à aquisição de informação para a construção da base de dados geográfica das redes de transportes, descreve-se com mais pormenor, cada uma das fases operativas consignadas.

5.3.1. 1ª FASE OPERACIONAL – RASTERIZAÇÃO E GEORREFERENCIAÇÃO DOS MAPAS

Um documento rasterizado (ou digitalizado) não tem escala, ou seja as medidas que sobre ele se façam não correspondem às medidas reais, sobre o terreno. Para que se possa explorar utilmente esta informação, nomeadamente, cruzar com outra infor-

79 "Aglomerado populacional com dez ou mais alojamentos destinados à habitação de pessoas e com uma designação própria, independentemente de pertencer a uma ou mais freguesias." (INE, 2001)

mação, fazer inquirições gráficas e alfanuméricas, medir distâncias, calcular áreas, perímetros, etc. é necessário proceder à sua correcção geométrica e à sua georreferenciação. Este procedimento consiste em identificar pontos no ficheiro e os seus correspondentes no terreno. Após esta identificação estabelece-se uma correspondência que permite ao *programa* efectuar a correcção geométrica do ficheiro, bem como a sua georreferenciação, ficando cada ponto do documento ligado à sua localização no terreno.

O primeiro passo deste processo consistiu na selecção de um suporte cartográfico de referência adequado, ou seja, na escolha de uma base cartográfica que sirva de base a todo este processo. Para o efeito, a base cartográfica para efectuar o processo de georreferenciação foi a das cidades existentes ao ano de 2005[80].

No passo seguinte seleccionaram-se os pontos (designados de pontos de controle) que permitem efectuar a correspondência entre as coordenadas da imagem, materializadas em linhas e colunas e as coordenadas rectangulares no terreno (da base cartográfica das cidades), medidas em unidades lineares (Matos, 2000).

Através da correcção geométrica ajustaram-se estas cartas, o que veio possibilitar uma compatibilização geográfica da informação. Embora existam vários métodos que permitem corrigir a rotação, translação e o factor de escala em X e Y, os mais utilizados são os seguintes (cf. tabela 4):

- Transformação de Helmert (linear): As formas são preservadas após a transformação;
- Transformação *Afim* (linear): Usualmente aplicado em imagens de satélite. As formas não são preservadas nesta transformação, mas as linhas paralelas permanecem paralelas;
- Método de polinómios de 2ºgrau (método complexo de transformação): Os graus de complexidade do polinómio são expressos no seu expoente. Este método permite a utilização de polinómios até 5º grau.

TABELA 4 MÉTODOS PARA GEORREFERENCIAÇÃO DE IMAGENS

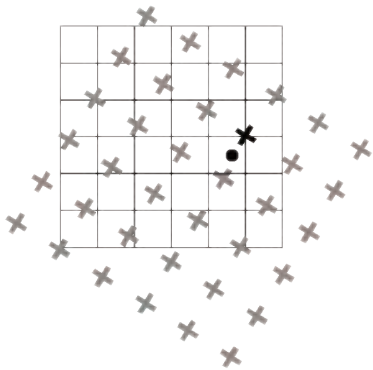
Modelo	Número de Pontos de Controlo	Ajustamento da Imagem
Helmert	2	Opcional
Polinomial de 1º Grau (Afim)	3	Opcional
Polinomial de 2º Grau	6	Obrigatório

80 Base cartográfica georreferenciada a partir das tabelas de cidades oficiais In SALGUEIRO, B. (2005) – Cidade e Sistema Urbano. Geografia de Portugal (cord. Medeiros). Vo.2:176-189.

Quando um método de transformação é não linear[81], tem que se utilizar um outro método para ajustamento da área definida com os pontos de controlo, para que seja efectuada a identificação da malha da imagem original com a malha criada pelos métodos de transformação (não lineares) utilizados, num procedimento que consiste numa interpolação a partir dos valores de pixéis vizinhos para criar a nova imagem ajustada à área de georreferenciação.

O processo mais rápido de interpolação é o do método do vizinho mais próximo, que em termos de cálculo utiliza apenas o valor do pixel mais próximo, isto é, escolhe o pixel que tenha o centro mais próximo do ponto localizado na imagem inicial. Este pixel é depois transferido para a sua posição (cf. Figura 25) correspondente na imagem final (georreferenciada). A desvantagem desta técnica é que introduz distorções geométricas localizadas.

FIGURA 25 RELAÇÃO ENTRE A GEOGRAFIA E A CIÊNCIA COMPUTACIONAL



Adaptado de Longley et al, 2001

Quando se efectuam estas operações de georreferenciação e ajustamento de imagem, é necessário avaliar a precisão da transformação efectuada confrontando-se o resultado da imagem (consoante o método de transformação utilizado) e dos pontos de controlo. Às diferenças entre os pontos de controlo e os pontos que se definem na imagem para identificação, designam-se de valores residuais, correspondem na prática à diferença entre a localização medida e a localização após transformação, em que.

x residual = x medido – x' após transformação
y residual = y medido – y' após transformação

81 Note-se que não existe uma relação directa entre o recurso aos métodos de ordem superior e o melhor ajustamento, pois normalmente os polinómios de 3ª, 4ª e 5ª ordem podem levar a resultados indesejáveis, como a distorção exagerada da imagem.

Idealmente, x' é igual a x e y' a y, mas esta situação raramente se verifica. Qualquer discrepância entre estes dois conjuntos de valores indica a persistência de distorções geométricas na imagem, mesmo depois do processo de georreferenciação. Uma forma de medir estas distorções é calcular o Desvio Quadrático Médio (DQM) para cada ponto de controlo, através da expressão:

$$DQM = \sqrt{(x' - x) + (y' - y)^2}$$

Calculando-se o DQM para todos os pontos de controlo é possível observar qual o ponto com maior erro e calcular o DQM médio (DQMm). Normalmente, o analista específica um certo valor (limiar) de DQMm ultrapassado o qual a transformação não é aceite.

Tendo por referência a norma técnica de acuidade visual que é de 0,2 mm ou 0,0002m[82], consoante a escala de base do documento cartográfico a georreferenciar e o número de pontos de controlo utilizados, pode determinar-se a qualidade da georreferenciação por cálculo do DMQ, transformando em erro no terreno (cf. tabela 5).

TABELA 5 ERRO APROXIMADO SEGUNDO A ESCALA E O NÚMERO DE PONTOS DE CONTROLO

Escala	Número de pontos de controlo				
	4	6	9	12	16
1:5000	± 1,10 m ± 0,74 m	± 1,05 m ± 0,70 m	± 1,01 m ± 0,68 m	± 0,99 m ± 0,66 m	± 0,97 m ± 0,65 m
1:25 000	± 5,5 m ± 3,7 m	± 5,4 m ± 3,5 m	± 5,1 m ± 3,4 m	± 5,0 m ± 3,3 m	± 4,9 m ± 3,3 m
1:50 000	± 11,0 m ± 7,3 m	± 10,5 m ± 7,0 m	± 10,1 m ± 6,8 m	± 9,9 m ± 6,6 m	± 9,7 m ± 6,5 m
1:100 000	± 21,9 m ± 14,7 m	± 21,0 m ± 14,0 m	± 20,3 m ± 13,5 m	± 19,8 m ± 13,3 m	± 19,4 m ± 13,0 m

Adaptado de Tsakiris *et al* (1994)

Se este valor for ultrapassado é comum:

- Apagar o ponto de controlo com maior erro;
- Recalcular os coeficientes;
- Recalcular o DQM para os restantes pontos de controlo;
- Os processos repetem-se até que o DQMm seja igual ou inferior ao limiar especificado, ou
- Aceitam-se os valores obtidos, quando todas as hipóteses de melhoramento do DQM não se aplicam.

82 Menor precisão gráfica possível de ser observada a olho nu (sadio e sem uso de qualquer instrumento de apoio).

Para esta dissertação, a tabela 6 abaixo faz a síntese das transformações efectuadas, a saber: dos métodos de georreferenciação utilizados, do número de pontos de controlo e dos valores de DQMm obtidos, para cada uma das imagens referentes às redes rodoviárias consideradas.

TABELA 6 SÍNTESE DOS MÉTODOS E PROCESSOS DE GEORREFERENCIAÇÃO[83]

	Nº pontos	Método	DQMm
Rede de Estradas Romanas	9	Polinómio de 2º grau	7478.3
Rede de Itinerários de 1800	12	Polinómio de 3º grau	1564.2
PRN45	14	Método Afim	641.6
PRN85	47	Polinómio de 2º grau	4143.7
PRN2000	4	Método Afim	239.5

Embora o erro diminua com o aumento do número de pontos, teoricamente não é necessário utilizar mais do que os suficientes para que os coeficientes do polinómio sejam estimados, pois os documentos rasterizados representam o território de uma forma geral e plana. Outra nota a registar é que dependendo da qualidade do ficheiro-imagem para rasterização (qualidade determinada pelo rigor cartográfico e pelo estado do documento), melhor ou pior será a georreferenciação, atestado pelo valor de DQM.

5.3.2. 2ª FASE OPERACIONAL - CRIAÇÃO DA BASE DE DADOS GEOGRÁFICA E VECTORIZAÇÃO DAS REDES E DOS NÓS

Uma base de dados é uma colecção de dados estruturados e armazenados de uma forma normalizada, segundo um dado modelo relacional[84], orientado a objecto[85], ou ambos. Uma base de dados geográfica é simplesmente uma base de dados que contem dados localizados geograficamente para um assunto e para uma área particular. As bases de dados geográficos constituem uma parte fundamental de um sistema

83 Para todas as imagens a georreferenciar, o sistema de projecção adoptado foi o Hayford-Gauss, datum Lisboa.

84 BD organizada em tabelas bidimensionais, em que cada linha é um registo, representativo de uma entidade, e cada coluna, um campo da tabela, representativo dos seus atributos. Entre tabelas diferentes, pode-se estabelecer um tipo especial de ligação (1-para-1; 1-para-n; n-para-n), a partir de um campo comum, que garante o relacionamento entre tabelas, sem que haja duplicação de registos. (Gaspar, 2004:41).

85 Um objecto pode ser qualquer coisa relevante, distinta das outras, caracterizada por um conjunto de atributos e sobre o qual se podem executar acções (Ramos, 2007:18). Assim, um modelo orientado a objecto é um modelo em que todas as etapas, processos, características, métodos e operações são consideradas objecto e como tal devem ser descritos na Linguagem de Programação (LP).

operacional de informação geográfica[86], devido sobretudo à importância que tem sobre todas as actividades de análise, modelação e tomadas de decisão.

- A utilização do Sistema de Gestão de Bases de dados (SGBD) para 'cuidar' dos dados geográficos oferece inúmeras vantagens em relação aos modelos tradicionais de armazenamento, das quais se podem destacar:
- A recolha de todos os dados para um único ficheiro, o que reduz a redundância e a duplicação;
- Diminuir os custos de manutenção devido a uma melhor organização e ao controlo da redundância;
- O conhecimento do utilizador pode ser transferido mais rapidamente entre aplicações, porque a base de dados permanece constante;
- A segurança e o nível dos dados assim como o seu acesso podem ser pré-definidos;
- Todos os registos têm como atributo um referencial espacial (tem coordenadas), o que permite a visualização simultânea da tabela e da sua distribuição espacial, sob a forma de mapa.

A Base de Dados Geográfica que se construiu para o modelo SIG-T designado de *geo_grafo* é condicionada, quer pelo objectivo e o objecto da dissertação, quer pelo programa hospedeiro adoptado (o ArcGis) e estrutura-se na forma, no que no léxico deste programa se denomina de *Geodatabase*[87].

As *geodatabases* estruturam os dados geográficos numa estrutura hierárquica de objectos, organizados em classes de objectos, classes de entidades e conjuntos de entidades. Uma classe de entidades corresponde a um conjunto de entidades com o mesmo tipo de geometria e os mesmos atributos. Um conjunto de entidades é um grupo de classes de entidades que partilham a mesma referência espacial.

As classes de entidades que correspondem a entidades simples podem ser organizadas, quer dentro, quer fora dos conjuntos de entidades. A forma de organização da informação, pelas classes de entidades, é muito semelhante à de um directório num sistema de ficheiros. As classes de entidade que necessitem de armazenar uma estrutura topológica têm obrigatoriamente de estar inseridas num conjunto de entidades de forma a garantir uma referência espacial comum, como é o caso das redes rodoviárias, objecto desta dissertação.

Obedecendo a esta lógica, os dados são adquiridos através da vectorização sobre imagem. Este processo tem a vantagem de possibilitar a ampliação da imagem de base, o que se traduz num substancial ganho de rigor da informação recolhida, face a outros métodos de vectorização, como p. ex. a vectorização sobre mesa digitalizadora, que resulta numa tendência para a pormenorização excessiva, leva por vezes a uma maior morosidade processual.

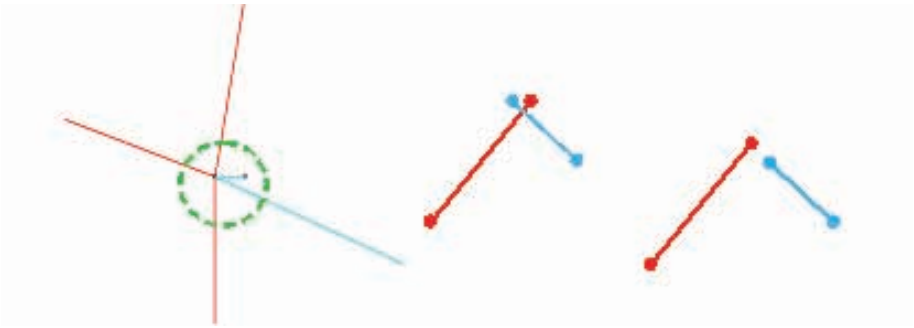
86 Sistema de Gestão de Bases de Dados (SGBD).

87 É a designação da ESRI (Environmental Systems Research Institute, Inc.) para o Sistema de Gestão de Base de Dados implementado nos seus produtos ArcGIS. Trata-se de um repositório de informação geográfica (objectos, entidades e características) e das relações topológicas que estabelecem. (ESRI, 2003).

O processo de vectorização, para além de cuidado no rigor do traçado em respeito da geometria das redes, tem de ser igualmente alvo de grande atenção e cuidado, no que respeita à quebra da linha e criação dos nós (*snap - endpoints*), a fim de evitar situações de erro (cf. Figura 26) em que o não reconhecimento da correspondência da mesma entidade, compromete a topologia e, consequentemente, a fase de análise.

A não utilização da ferramenta '*snap*' no processo de vectorização, assim como a não interrupção das linhas onde se pretende criar um nó, pode conduzir a erros graves (cf. Figura 26) que vão deturpar a leitura e os cálculos das medidas topológicas de análise de redes (cf. Cap. 6).

FIGURA 26 RELAÇÃO ENTRE A GEOGRAFIA E A CIÊNCIA COMPUTACIONAL



Adaptado de Longley et al, 2001

Em que:

- *Switch-back* – é a situação em que o desenhador, quase sempre de uma forma involuntária, faz pequenos recuos com o rato aquando do processo de vectorização de uma linha. Daí resultam pequenos (quase imperceptíveis sem o exercício do aumento de imagem) segmentos de linha, que não exitem na realidade;
- *Overshoot* – é outro erro típico que decorre de não se fazer uma junção perfeita entre as extremidades das duas ou mais linhas vectorizadas e consequente criação do nó. Uma vez mais, os segmentos de linha que se sobrepõem não são perceptíveis à escala de trabalho do desenhador, o que dificulta a sua detecção a olho;
- *Undershoot* – é um erro em tudo semelhante ao overshoot, com a diferença de neste caso o desenhador não sobrepor as linhas. Nesta situação, as linhas ficam ligeiramente distanciadas nas suas extremidades e a não criação do nó fica a dever-se a uma distância de separação, que é mais uma vez, imperceptível sem o recurso a procedimentos de detecção automáticos.

Todas estas situações têm de ser rectificadas topologicamente, para que sejam corrigidas e fiquem unicamente os nós em que cada arco termina e outro se inicia.

Assim, para além da geometria da rede ser adulterada, também a própria topologia é corrompida, quer através das relações que a *Geodatabase* vai armazenar, quer dos valores das medidas de conectividade e centralidade a calcular. Dos exemplos representados na figura 26, os erros levam à criação de mais um arco e de também mais um nó na rede, o que deturpa desde logo todos os valores caracterizadores, quer da estrutura da rede, quer das componentes.

5.3.3. 3ª FASE OPERACIONAL – CONVERSÃO DA GEOMETRIA DAS REDES EM CARACTERÍSTICAS TOPOLÓGICAS.

Como o processo de criação topológica é interactivo, ou seja é realizado de uma forma dinâmica ao mesmo tempo que os objectos são adicionados à base de dados, logo quando, por exemplo, se adicionam vias de comunicação através da ferramenta de vectorização interactiva, e antes de cada objecto ser confirmado na base de dados, é necessário verificar as conexões topológicas para confirmar se o objectivo é valido, isto é, se está conforme com a realidade que se analisa e com as regras pré-estabelecidas para os objectos na base de dados.

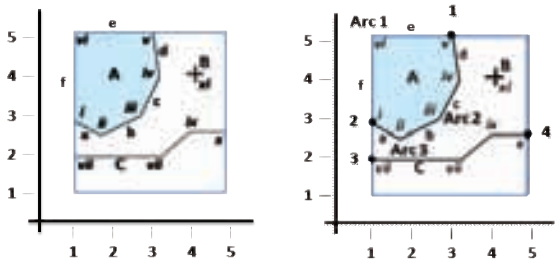
Para uma *característica* tipo linha, o modelo topológico do ArcGis/ArcInfo é o DIME (cf. Cap. 4), em que os atributos das *características* são organizados de uma forma específica: os nós (intersecções de linhas) são identificados por códigos, em que se atribui um código direccional sob a forma de "*From Node*" (FN) e "*To Node*" (TN), e as coordenadas são explicitamente definidas para cada ligação/conexão, a partir das componentes, arco, nó e polígono ou área (cf. Figuras 27).

A geometria da *Geodatabase* utilizada consiste em linhas que se estruturam por conjunto de pontos (início, fim e inflexões) e que representam as redes rodoviárias analisadas. Com a sua introdução na *Geodatabase* devidamente armazenadas e estruturada, o 1º bloco do modelo conceptual está realizado (cf. Figura 24), assim como o sub-bloco (Base de Dados e SIG) do 2º bloco do modelo conceptual: Modelo SIG-T.

Precisamente, com a construção das *Geodatabses* correspondentes a cada uma das redes viárias a analisar, e.g. Estradas Romanas; Itinerários de 1800; PR45; PRN85 e o PRN2000, está completa a Base de Dados, e com a georreferenciação e a criação de atributos (comprimento das vias entre nós e população residente por lugar), o sub-bloco composto por Sistema de Análise são passíveis de ser operacionalizados.

Em termos de importância, este 2º bloco (Modelo SIG-T) é o *core* do projecto de investigação, uma vez que é nele que se articulam os procedimentos técnicos, com o experimentalismo científico e a criação de conhecimento sob a forma de resultados quantitativos e qualitativos. É a partir deste modelo que se pode fazer um diagnóstico acerca da conectividade da rede, da sua maturação, da acessibilidade e centralidade dos nós que a compõem e da influência que provocam na hierarquia dos lugares, assim como da dinâmica de interacção que exercem entre si, da eficácia e da vulnerabilidade da rede (cf. Cap. 6).

FIGURA 27 ESTRUTURA ORGANIZATIVA DA TOPOLOGIA NA *GEODATABASE*



Vértice	X	Y
i	1,0	3,0
ii	1,8	2,6
Iii	2,8	3,0
iv	3,3	4,0
v	3,2	5,2
vi	1,0	5,2
vii	1,0	2,0
viii	3,5	2,0
ix	4,2	2,7
x	5,2	2,7
xi	4,0	4,0

Coordenadas dos vértices e nós de todos os arcos

ARC	FN	Vértices	TN
1	3.2, 5.2	1, 5.2	1,3
2	1,3	1.8,2.6 2.8,3 3.3,4	3.2, 5.2
3	1,2	3.5,2 4.2,2.7	5.2,2.7

Topologia dos arcos

ARC	FN	TN	Polígono Direito	Polígono Esquerdo
1	1	2	Externo	A
2	2	1	Externo	A
3	3	4	Externo	Externo

Topologia dos polígonos

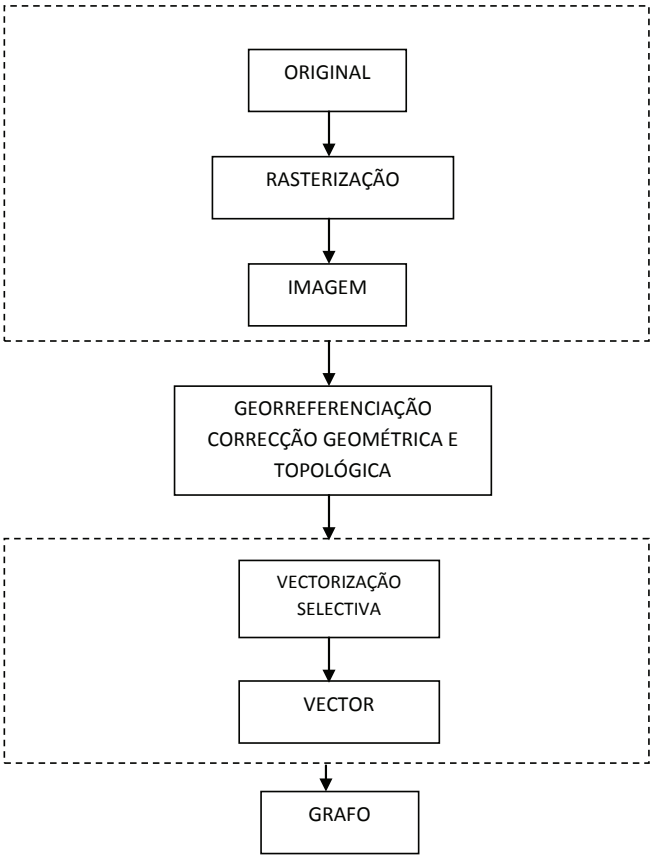
Polígono	Arcos
A	1, 2

Topologia dos nós

Nó	Arcos
1	1,2
2	1,2
3	3
4	4
5	5

Adaptado de Longley et al, 2001

FIGURA 28 ESTRUTURA ORGANIZATIVA DA TOPOLOGIA NA *GEODATABASE*



Adaptado de Longley et al, 2001

A análise é para diferentes períodos temporais, e permite não apenas verificar os padrões estruturantes da rede, no espaço e no tempo, assim como também permite traçar cenários possíveis, medindo a importância de um ou mais arcos na rede, e testando a sua coesão e conectividade.

O bloco em que se constrói o modelo SIG-T - a partir de dois módulos de igual complexidade na arquitectura do projecto: o módulo do sistema de informação, que consiste numa construção da Base de Dados Geográfica de *características* topológicas linha, em SIG; e o módulo sistema de análise, em que através de uma linguagem de programação orientada a objecto, se desenvolveu e compilou algoritmos para análise topológica das redes de transporte, em ambiente SIG -, é o que deu origem ao modelo a que se chamou de *geo_grafo.*

A última etapa computacional do projecto (criação de processos de visualização de análises métricas às propriedades das redes produzidas e armazenadas numa *geodatabase*.) sintetiza-se na criação de um *plug-in*, ou seja um botão que surgirá no Interface Gráfico do Utilizador (IGU) do *programa* ArcGIS, e a partir do qual o utilizador dá ordem de execução aos procedimentos do modelo *geo*_grafo sem que tenha de aceder ao *VBA* interface.

5.4. IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO SIG-T GEO_GRAFO

De cariz eminentemente técnico, este subcapítulo não trata de programação computacional, ou de uma linguagem de programação em particular, mas de descrever o processo de "implementação do modelo SIG-T". Mais especificamente, nele se demonstra a arquitectura do programa (como se organizou e estruturou o programa codificado segundo uma linguagem de programação simbólica) e explicar como funciona, de forma a proceder-se às diversas análises dos grafos.

5.4.1. DESENHO E ESTRUTURA DO PROGRAMA

Quando surgiram os primeiros computadores, a palavra de ordem dos programadores era eficiência, ou seja, conseguir criar *programas* que exigissem o mínimo possível dos recursos máquina, já que estes eram muito limitados, quer no que respeita à capacidade de memória, quer no que respeita ao volume de informação a processar. Desta forma, os programas iniciais eram feitos num único bloco monolítico de código, isto é, com um pequeno número de linhas de código e poucas variáveis, já que a divisão do *programa* em vários blocos iria exigir mais memória e superior capacidade de processamento de informação.

Contudo, à medida que a tecnologia foi evoluindo e novos recursos computacionais de maior capacidade foram sendo disponibilizados, os programadores viram expandido as possibilidades de desenvolver aplicações mais complexas para resolução de problemas também mais complexos. Assim, em resposta, os programadores desenvolveram uma técnica que consistia em dividir os problemas em porções e resolvê-los de forma independente, mediante módulos[88], o que não permitiu não apenas a resolução faseada dos problemas como desejável, mas também a ordenação do fluxo de controlo do programa e a possibilidade de reutilização do código em outros programas, assim como para resolução de outros problemas[89].

Para medir e qualificar o efeito das rodovias na estruturação do território, o *programa* - isto é a estrutura dos algoritmos que permitem indicar à máquina os cálculos

88 Em ciências da computação, a designação refere-se a um conjunto de declarações para outros tantos procedimentos.

89 A programação em blocos, ao fazer tramitar de bloco para bloco apenas os valores relevantes veio facilitar a organização lógica dos procedimentos e, ao mesmo tempo permitir a execução independente dos diversos procedimentos, que puderam ser optimizados e entregues para desenvolvimento a equipas de programadores/analistas.

a fazer, a tipologia dos *outputs* e o armazenamento dos ficheiros criados -, foi estruturado em cinco módulos[90], cuja descrição breve é apresentada na tabela 7 (para descrição completa, ver Anexo).

TABELA 7 MÓDULOS QUE ESTRUTURAM O ALGORITMO UTILIZADO

#	Módulo	Descrição
1	Main	Módulo onde é definida a sequência de operações a executar
2	CMatrix	Módulo que permite representar a estrutura de dados numa matriz e onde estão definidas as operações de cálculo algébrico elementares como adição multiplicação, etc.
3	NetworksMXDAnalysis	Módulo que permite extrair os grafos no formato específico do SIG (geometria de linha e ponto) usado para o formato de matriz. O resultado é a disponibilização para os outros módulos de 3 matrizes: de conectividade (C); de distâncias (D); e de modelo gravítico (Pi).
4	Dijkstra	Módulo que permite determinar a matriz de caminhos topológicos mais curtos entre cada dois nós de um dado grafo dado na forma de matriz. É um dos pontos essenciais dos procedimentos utilizados.
5	NetworkMatrix	Módulo que permite calcular os índices de conectividade e acessibilidade de grafos (dados na forma matricial) e exportá-los para ficheiros em formato de texto. Disponibiliza também um algoritmo de cálculo de sub-grafos a partir de um dado grafo na forma de matriz.

Devido ao facto de apenas através do cálculo de matrizes se conseguir os algoritmos para as medidas de acessibilidade e centralidade levou a uma situação de dúvida quanto ao tipo de linguagem de programação (LP) mais adequada a utilizar. O facto de não existir a representação de matriz no *VBA*, ao contrário de uma LP como o FORTRAN[91], levou a que se considerasse a hipótese de a preterir. No entanto, a LP *VBA* tinha a vantagem de estar embutida num ambiente SIG, ou seja, de correr sobre um programa SIG hospedeiro (ela teve de ser encapsulada), facto que acabou por pesar mais na decisão final, em acordo com outros critérios como, o tempo de cálculo e a facilidade de programação e utilização, por utilizadores menos experimentados.

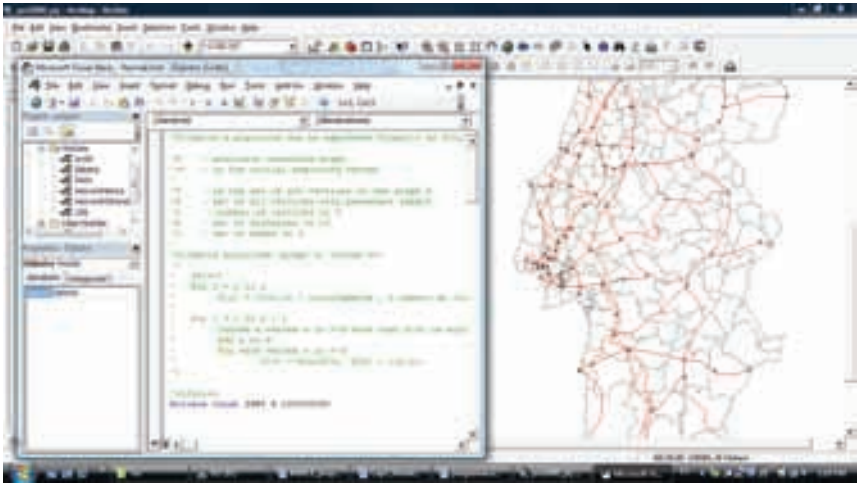
5.4.2. FUNCIONAMENTO DO PROGRAMA

A figura abaixo (Figura 29) serve para exemplificar a lógica de funcionamento do *programa* criado. O interface do lado esquerdo (*Microsoft Visual Basic Editor*) é onde estão implementados os códigos e é accionado o *programa* para análise das *features*, visualizadas no lado direito, no *display* do ArcMap.

90 A programação em blocos, ao fazer tramitar de bloco para bloco apenas os valores relevantes veio facilitar a organização lógica dos procedimentos e, ao mesmo tempo permitir a execução independente dos diversos procedimentos, que puderam ser optimizados e entregues para desenvolvimento a equipas de programadores/analistas.

91 Linguagem de programação inicialmente desenvolvida por Backus para computadores IBM, por altura de 1957, destinava-se a aplicações numérico-científicas. Era uma linguagem de grande eficiência computacional, porque utilizava poucos recursos (memória e processador) da máquina.

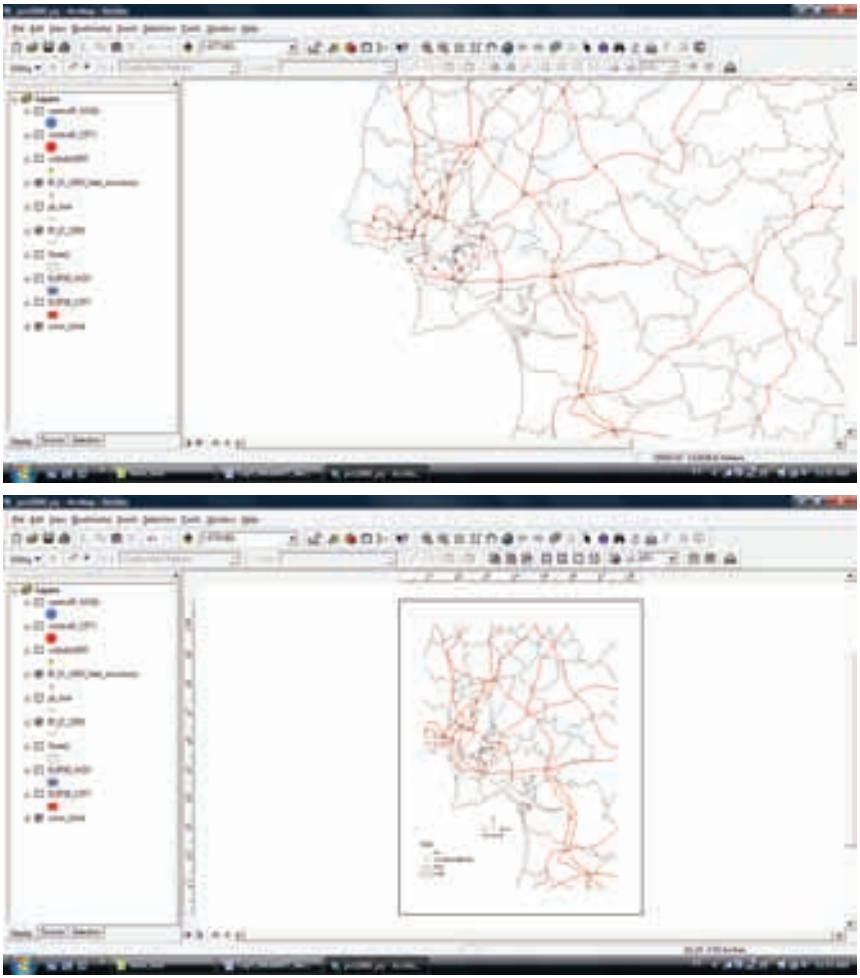
FIGURA 29 INTERFACE DO PROGRAMA CRIADO EM VBA SOBRE O INTERFACE DE VISUALIZAÇÃO DO PROGRAMA HOSPEDEIRO (ARCMAP)



A funcionalidade do modelo *geo*_grafo é assim potenciada pela combinação das valências das aplicações do ArcGIS (ArcMap, ArcCatalog e ArcToolbox) e do código do *programa* embutido. Efectivamente, da parte do programa SIG hospedeiro são aproveitadas as seguintes valências, de acordo com as aplicações:

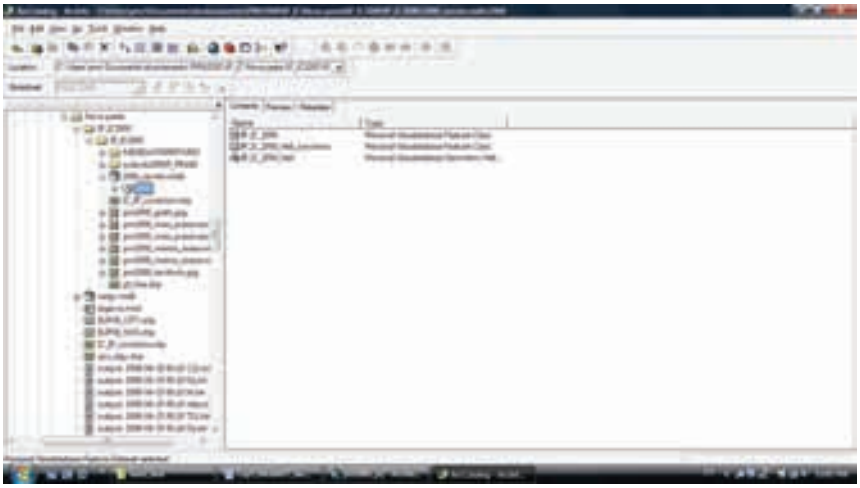
I) ArcMap – faculta a visualização das *características*, a sobreposição de *características*, a edição das *características* (vectorização da rede e a adição de novos atributos na tabela), e preparação do mapa temático, proporcionadas pela aplicação ArcMap (Figura 30);

FIGURA 30 INTERFACE GRÁFICO DO ARCMAP, PARA VISUALIZAÇÃO E SOBREPOSIÇÃO DAS *CARACTERÍSTICAS* DE RODOVIAS (LADO ESQUERDO) E PREPARAÇÃO DA SAÍDA GRÁFICA DO MAPA TEMÁTICO (LADO DIREITO).



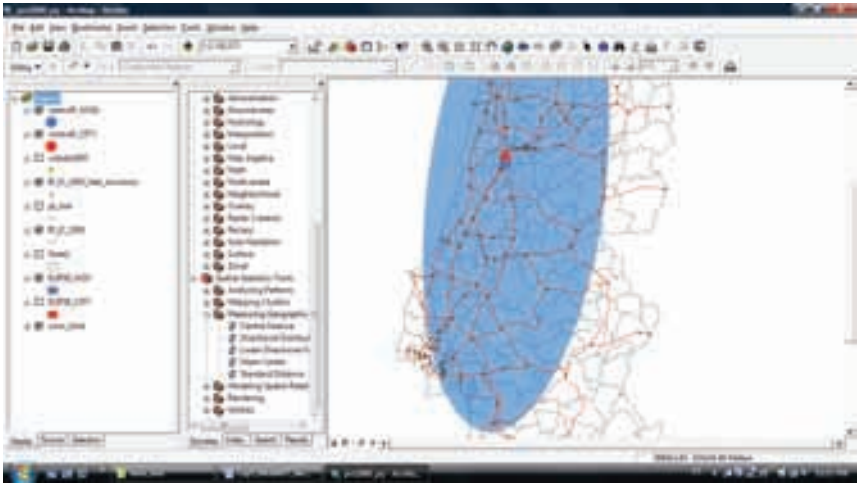
II) ArcCatalog – permite ao utilizador, as funções de construção da *geodatabase*, da *features dataset* (família de características) e conversão da *característica* vectorial numa estrutura topológica (Figura 31).

FIGURA 31 INTERFACE GRÁFICO DO ARCCATALOG, PARA CONSTRUÇÃO DA GEODATABASE



III) ArcToolbox – disponibiliza as ferramentas de cálculo e de análise espacial (medidas de distribuição espacial) como métricas de caracterização dos diversos modelos geo_grafo analisados (cf. Figura. 32).

FIGURA 32 INTERFACE DO ARCTOOLBOX, COM LISTA DE MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL (CIRCULO A ENCARNADO) E VISUALIZAÇÃO DOS RESULTADOS NO VISUALIZADOR DO ARCMAP.



Sobre a aplicação do modelo *geo*_grafo e dos resultados obtidos, no capítulo seguinte far-se-à uma descrição e análise pormenorizada, que permite compreender o território através do papel de cada uma das métricas, quer topológicas, quer geográficas, combinadas.

5.5. INTERFACE GRÁFICO DO UTILIZADOR (IGU) E *PLUG-IN* SIG-T

São dois os propósitos para a criação de um IGU: tornar o método de análise mais apelativo e 'amigável' para o utilizador comum e encapsular os processos computacionais de maior complexidade, minimizando a aversão à sua utilização que é geralmente repetida pelo utilizador comum menos entendido em computação, e minimizando a hipótese de erros no sistema.

O encapsulamento, segundo Matos (2001:165), é um procedimento que consiste em ocultar ao utilizador comum a complexidade dos procedimentos a efectuar, pela utilização de uma escolha pré-configurada ou com opções múltiplas, mas também pré-definidas em que o utilizador toma a decisão sem necessidade de formular o algoritmo completo. O funcionamento interno do sistema é-lhe totalmente escondido e o utilizador pode dispensá-lo, bastando-lhe saber qual o tema em questão e mediante as opções a tomar, do leque que o interface lhe disponibiliza (botões e comandos), testar cenários e verificar resultados. As operações desenrolam-se por ordem do utilizador, mas sem as descriminar, nem as visualizar; apenas lhe sendo apresentado o resultado.

Uma outra vantagem do encapsulamento é o de garantir a segurança do objecto[92] (encapsular pressupõe programação orientada a objectos), garantindo a integridade e a qualidade e coesão do comportamento do processo escolhido.

Remontando ao caso concreto desta dissertação, o IGU "encobre" os procedimentos codificados no modelo *geo*_grafo, e embutidos num *programa* SIG, sintetizando-os sob a forma de menus e botões e comandos, e disponibilizando os resultados em ficheiros do tipo *txt*, com indicação de data e hora de execução.

92 Na programação orientada a objectos, o objecto significa praticamente tudo, uma entidade física, uma função ou operação, uma variável, um qualquer elemento que esteja claramente definido (individual) na estrutura do *programa* e que tenha uma aplicação concreta.

Capítulo 6
Análise dos Resultados

Num trabalho de cariz metodológico, o capítulo que apresenta os resultados é o capítulo de maior relevância, pois é nele que:

- Se testam e validam (ou não) as hipóteses colocadas ao longo das várias etapas do projecto;
- Se verifica a importância da informação geográfica, quer a adquirida, quer a produzida;
- Se (re)constrói o modelo de análise e se ajustam os métodos;
- Se parametriza o modelo e
- No caso concreto em análise, cria-se conhecimento, a partir de padrões (espaciais e métricos) revelados pelas propriedades das redes.

Em Geografia, é consensual o princípio, de que o sucesso de qualquer actividade humana depende da sua localização e que as infra-estruturas de transportes e comunicação sempre induziram a mudanças na localização relativa dos aglomerados populacionais (Garrison, 1960; Haggett, 1965, Gaspar, 1981, Mitchell, 2000; Castells, 2002; Gorman e Kulkarni, 2003; Black, 2003), assim como na sua criação, crescimento e ou desaparecimento.

É frequente encontrar-se na literatura da especialidade referência ao impacto provocado pelos sistemas de transportes na organização espacial (Cortesão, 1964; Salgueiro, 1971; Matos, 1980; Hall, 1988; Alegria, 1990; Ascher, 2001; Gaspar, 1970 e 2006; Santa-Rita, 2006, entre muitos outros), mas poucos são os trabalhos que o demonstram, com fundamentação empírica e demonstração quantitativa. A omissão de uma análise espacial de base quantitativa, sobre a influência (e o grau dessa influência) dos transportes sobre o território, deixa que fiquem por responder algumas questões fundamentais, tais como: Que métodos são geralmente utilizados para medir

esse impacto? De que tratam os métodos e como se caracterizam? Como construir e desenvolver o(s) modelo(s) que operacionalize(m) esses métodos? Quais os mais comuns e eficazes em determinado contexto? Como é trabalhada e integrada a informação num modelo? Qual a importância do espaço (geografia) na análise de redes? E por último, como se devem interpretar e representar os resultados?

Quanto aos modelos, métodos e informação mais utilizados, muitas das respostas foram já dadas em capítulos anteriores. Contudo, no que respeita à importância da Geografia (leia-se os conceitos espaciais de localização, de distância, de conectividade, de acessibilidade, de centralidade, de relação, de adjacência e de vizinhança) na análise de redes, só se dará conta agora, por meio da modelação computacional e do formalismo da Teoria dos Grafos.

De uma perspectiva geográfica, o estudo do território através da análise ao sistema de transportes pela Teoria dos Grafos e das Redes Complexas, implica numa primeira instância uma análise à estrutura da rede, que sublinhe as características que relevam das medidas de conectividade e de ligação, particularmente úteis na comparação das redes e na sua evolução ao longo do tempo (Garrinson, 1960; Garrison e Marble, 1961; Taaffe, Morril e Gould, 1963; Watts; Strogatz, 1998; Barabasi, 2002). Numa segunda fase, seguem-se as medidas de acessibilidade, uma actualização e melhoramento das medidas de conectividade na análise das redes pelas propriedades das suas componentes (Garrinson, 1960; Taaffe e Gauthier, 1973; O'Sullivan, 2000; Jiang, 2006; Xu, 2007), as quais permitem concluir acerca da acessibilidade e da centralidade dos nós na rede, de que resulta uma ordem ou uma hierarquia.

Em ambos os casos, ao simplificar-se e representar-se de forma abstracta a rede de transportes sob a forma de grafo, passa-se a dispor de um espectro de ferramentas, quer para exploração das propriedades topológicas e físicas das redes, quer para avaliar o seu impacto no território, medindo a teia de relações entre os lugares ao longo do processo de evolução das redes. No entanto, conforme se fez nota atrás (cf. cap. 2), a geografia nem sempre foi considerada uma variável de análise (Jiang, 2006). Antes pelo contrário, o factor localização foi geralmente ignorado na análise das redes. A justificar tal facto pode apontar-se duas razões:

- O carácter abstracto dos grafos, e
- A inexistência à data de programas SIG.

Mais recentemente, no virar do século XX para o século XXI, surge uma nova ciência, designada Ciência das Redes (Watts, 1998; Bersini, 2005) ou Redes Complexas (Dorogovtsev e Mendes, 2003), para fazer face ao carácter dinâmico e à crescente complexidade que as redes têm vindo a adquirir. De base matemática, assente na Teoria dos Grafos, a análise de redes por via das Redes Complexas, vai permitir determinar propriedades como: 'Mundo pequeno', o coeficiente de *clustering* e os *hubs*, vulgarmente referidos na literatura da especialidade simplesmente como Problema do 'Mundo pequeno' (Watts e Strogatz, 1998; Batty, 2001; Jiang, 2006; Xu e Sui, 2007). Entre outros aspectos, do ponto de vista geográfico é particularmente relevante a indicação das

métricas relativas à eficácia da rede ou ainda à medida do seu grau de vulnerabilidade (Dorogovtsev e Mendes, 2003; Gorman e Kulkarni, 2003; Jiang, 2006), assim como as relativas à avaliação da influência de uns nós relativamente aos outros.

Com o intuito de parametrizar o modelo *geo*_grafo e verificar tendências, faz-se uso das medidas de distribuição espacial, e.g. o ponto mais central e a elipse de tendência, para confronto com os resultados apurados pelas medidas de acessibilidade e de conectividade do modelo computacional desenvolvido e para avaliar a distribuição direccional dos nós e da tendência espacio-temporal que se desenha sobre o território. De salientar ainda que todos os procedimentos referentes às análises a efectuar são efectuados em ambiente SIG, com informação georreferenciada, o que permite a análise visual, assim como a produção de *outputs* gráficos sob a forma de mapas em tempo 'útil', ou seja, à medida que as transformações vão ocorrendo, o que não seria possível com outros *programas* (cf. cap. 4) de análise topológica de redes.

Face ao exposto, nesta dissertação, a metodologia encetada foca-se nas medidas topológicas para determinar as propriedades das redes, estruturando-se numa abordagem faseada no tempo (procurando a dinâmica das redes), através das transformações ocorridas na rede de infra-estruturas rodoviárias. Pretende-se assim, não apenas medir o efeito das redes na organização espacial e na relação que estabelecem com o grau de desenvolvimento do País, sua eficácia, coesão e vulnerabilidade, mas também avaliar como estes processos decorrem das transformações ocorridas nas redes ao longo do seu processo natural de transformação, com o aparecimento e desaparecimento de arcos e de nós.

Para concretizar esta metodologia, o capítulo de análise dos resultados organiza-se em três partes operativas e uma parte comparativa. As partes operativas correspondem à análise do efeito estruturante da rede rodoviária sobre o território de Portugal Continental, mediante um modelo de base isotrópico (cf. 6.1.), que ignora a distância física como factor de atrito; um modelo de base anisotrópico (cf. 6.2.), que integra a distância física entre os lugares; e um modelo 'Mundo pequeno' (cf. 6.3.), para medir a eficácia da rede. A parte comparativa (cf. 6.4.) consiste numa síntese assente em três fases: medidas estruturais e de conectividade; medidas de acessibilidade e centralidade, assim como medidas de distribuição espacial, de forma a sublinhar os padrões emergentes.

De uma forma mais pormenorizada, para análise das propriedades que emanam do tipo de estrutura da rede e dos seus nós e arcos, faz-se uso, quer das medidas de conectividade e ligação, quer das medidas de acessibilidade e centralidade, respectivamente, no que respeita à teoria dos grafos (cf. Cap. 2). Sobre as medidas de acessibilidade e centralidade, o formalismo matemático utilizado foi de base matricial, que não permite apenas analisar as medidas de acessibilidade e centralidade, mas também evidenciar outras características e propriedades das redes, tais como: a eficácia da rede em providenciar a ocorrência de fluxos (cf. 6.4.) entre nós (os lugares) e avaliar o potencial de interacção que exercem uns sobre os outros, em função da distância que os separa e da sua massa (cf. 6.3.).

Existem várias matrizes (conectividade, acessibilidade e ponderadas) para analisar a rede individualmente, do ponto de vista das suas componentes. Contudo são as matrizes D (das distâncias topológicas mais curtas) e L (das distâncias físicas mais curtas) que melhor estabelecem uma hierarquia de lugares, e mais permite analisar as configurações e padrões espaciais que se desenham, ao longo do tempo (Kansky, 1963; Taaffe e Gauthier, 1973).

Todavia, entre as duas existem diferenças que importa assinalar. Enquanto a matriz D da distância topológica assume que todas e cada uma das ligações entre os nós têm igual valor no cálculo da acessibilidade, ou seja, pode ser igualmente influente a estrada Lisboa/Queluz como a estrada Lisboa/Porto; a matriz L, das distâncias físicas é sensível à existência, quer de pequenas, quer de grandes ligações, dando-lhe ponderações diferentes na determinação da acessibilidade dos lugares. Assim está-se perante dois modelos de abordagem diferentes para a análise de redes e o seu efeito na organização espacial: considera-se o primeiro caso como o modelo isotrópico e o segundo caso, o modelo anisotrópico.

Por fim, no que respeita ao objecto de estudo, foram as redes materiais (Brunnet, 1996), as redes rodoviárias e as suas antecessoras, as redes de estradas e os itinerários as infra-estruturas escolhidas para avaliar o modelo concebido. Para que este permitisse a análise à dinâmica das redes, e a análise comparativa do sistema rodoviário de Portugal Continental e a sua influência na organização espacial e relação com o nível de desenvolvimento do País, considerou-se as redes de estradas de diferentes períodos temporais: estradas Romanas[93] (datadas do séc. III d.C.), as estradas (itinerários) do período do pré-fontismo (1800), as estradas do primeiro Plano rodoviário (1945), e as estradas do segundo (1985) e terceiro Plano Rodoviário Nacional (2000), das quais se obtiveram, por via do modelo criado (cf. Cap. 5), os resultados que a seguir se analisam.

6.1. MODELO ISOTRÓPICO PARA ANÁLISE DO EFEITO DAS REDES DE TRANSPORTES RODOVIÁRIOS NA ORGANIZAÇÃO ESPACIAL

A origem da palavra isotropia vem do grego *iso+tropic*. O termo *iso* significa igualdade ou semelhança e o termo *tropic*, significa mudança ou alteração (Porto Editora, 2010). Quando precedida da palavra modelo, isotropia adquire a função de adjectivo, o que significa ter iguais características físicas, e.g. condutividade, elasticidade, etc., independentemente, da direcção de movimento do corpo num espaço.

O termo foi inicialmente adoptado na Geografia Física, para explicar as propriedades dos cristais, enquanto na Geografia Humana o termo serviu para classificar os

93 "Há ainda noutros lugares do Portugal romano, conhecidos através das fontes latinas ou gregas, que foram identificados. A identificação de alguns outros não é segura. A principal dessas fontes é o itinerário de Antonino. É um roteiro das vias do Império Romano, com indicação das cidades ou estações de muda (*mansiones*) por onde essas vias passavam (…). Foi redigido no início do Século III d. C., mas posteriormente corrigido." (Alarcão, 1974:64).

modelos económicos e os modelos de interacção espacial (Weber, Christaller, Losch, Burgess, Hoyt, Alonso, Isaard, Haggett, etc.) da primeira metade do Século XX da década de 1900 (cf. Tabela 1), quanto à forma como consideravam o espaço, e.g. espaço isotrópico (o que significa que este mantém as mesmas características independentemente da direcção) e o espaço anisotrópico (o que significa que o espaço sofria alterações graduais ou descontínuas, consoante as direcções). Nesta primeira fase operativa, o espaço é considerado como sendo isotrópico, ou seja, todos os arcos têm o mesmo peso, independentemente da distância física entre lugares.
Do exposto no capítulo 2 (Teoria dos Grafos) acerca das medidas de análise para caracterização das propriedades das redes e avaliação do seu efeito sobre o território, mais propriamente sobre o papel que induz na organização espacial, destaca-se dois tipos de medidas:

- As medidas para análise da estrutura geral da rede, também chamadas de medidas de conectividade e ligação, e
- As medidas para análise interna da rede ou medidas de acessibilidade e centralidade.

Das primeiras releva o contributo do índice alfa (α) e o índice gama (γ), o mais representativo das medidas de conectividade, fundamental na comparação de diferentes redes de transportes e na avaliação do seu desenvolvimento no tempo. Uma vez que, a expansão e a intensificação das ligações entre os nós está directamente relacionada com a procura da rede de transporte, com o intuito de deslocar pessoas e bens, diz-se que o grau de conectividade da rede constitui um indicador de complexidade espacial, bem como do nível de desenvolvimento do país ou da região a que a rede respeita (Garrison e Marble, 1961). Embora menos determinantes, os índices de coesão (Cst) e do grau de desenvolvimento (Gp) complementam o índice gama (γ) e dão indicações seguras sobre o estado de maturação da rede.

Quanto às medidas de análise interna da rede, elas constituem uma actualização e um refinamento das medidas de conectividade e dão uma perspectiva mais fiável acerca do impacto das redes sobre o território, nomeadamente no que respeita à organização do sistema urbano, com a criação, deslocação, transformação e desaparecimento de centros, grupos e periferias. Pode afirmar-se que as medidas de acessibilidade constituem um melhoramento às medidas topológicas da Teoria dos Grafos para análise da influência das redes de transportes no território (Garrison, 1960; Taaffe e Gauthier, 1973). A estas, e com o intuito de descobrir outras propriedades nas redes que os métodos tradicionais omitiam (Batty, 2001), juntam-se as medidas decorrentes das Redes Complexas, e.g. Mundo pequeno, coeficiente de *clustering* e *Hub's* e o índice de Freeman ou grau de intermediação (ou ainda medida de *betweeness*).

Com os resultados obtidos são construídas tabelas com a hierarquia dos lugares, segundo os indicadores de acessibilidade e centralidade. Contudo, devido à dimensão[94] do número de arcos e de nós das redes, só se incluirá nos quadros os 20 lugares

94 Dada a dimensão das tabelas resultantes, a apresentação das matrizes C (C^1, C^2, …C^n), T (T^1, T^2, …, T^n), D e L (L^1, L^2, …, L^n), é remetida para anexo, em formato digital num *cd-rom*.

mais acessíveis e os 20 menos acessíveis, ficando os restantes ficheiros derivados dos cálculos das matrizes, na sua total extensão, em anexo.

Nota-se ainda que, apenas para a rede de Estradas Romanas se fará esta análise para todas as matrizes, isto é as matrizes C^1 e C^n; T^1 e T^n; D e L^1 e L^n (as matrizes L são matrizes ponderadas, pelo que apenas no ponto 6.3 referente ao modelo anisotrópico se fará a sua leitura). A razão de tal opção deve-se quer ao facto de as Estradas Romanas apresentarem um menor número de nós e arcos que as outras redes de estradas em análise. Além de que assim, pode servir para demonstrar a importância do cálculo de matrizes na análise de variação da acessibilidade em função do tempo.

Para as restantes redes de estradas, apenas a matriz D, por ser a mais representativa das medidas topológicas de acessibilidade e centralidade, e a matriz ponderada L^n, de distâncias físicas, são representadas e analisadas em texto, para a fase operativa referente ao modelo isotrópico, e para o cálculo do modelo operativo anisotrópico, respectivamente.

FIGURA 33 GRAFO DAS ESTRADAS ROMANAS[95]

ESTRADAS ROMANAS

Medidas Topológicas
Arcos = 85
Nós = 83
SubGrafo = 1

Índice gama (γ) = 0.35
Índice alfa (α) = 0.01
Índice de coesão (Cst) = 40.03
Índice do grau de desenv. (Gp) = 41.02
Índice dispersão = 107452

Diâmetro da rede = 42
Índice acessibilidade (D)
D_{max} = 966 Ad Septem Aras (Campo Maior)
D_{min} = 1962 Compleutica (Cova da Lua)

95 Mapa extraído de ALARCÃO, Jorge (1974) – Portugal Romano. Vol.33. Lisboa. Historia Mundi. 244pp.

Em que[96]:

1	Ossonoba (Faro)	11	Metallum Vispacensis (Aljustrel)	21	Nova Civitas Aruccitana (Moura)
2	Balsa (Tavira)	12	Serpa	22	Odivelas
3	Lacobriga (Lagos)	13	Santa Clara de Louredo	23	Torrão
4	Portus Hannibalis (Portimão?)	14	Quintos	24	Salacia (Alcacer do Sal)
5	Baesuris (Castro Marim)	15	Arucci Vetus (Aroche)	25	Alcaçovas
6	S. Bartolomeu de Messines	16	Fines (Corte de Messangil)	26	Lousa
7	Santa Clara-a-Velha	17	Sines	27	Caetobriga (Setubal)
8	Myrtilis (Mértola)	18	Pax Ivlia (Beja)	28	Ebora (Evora)
9	Castro Verde	19	Mirobriga (Santiago do Cacem)	29	Marateca
10	Arandis (Garvão)	20	Peroguarda	30	Aguas de Moura
31	Equabona (Coina-a-Velha)	41	Elvas	51	Ponte de Sor
32	Montemor-o-Novo	42	Emerita (Mérida)	52	Scallabis (Santarém)
33	Redondo	43	Alverca	53	Alpiarça
34	S. Miguel de Machede	44	Coruche	54	Tubucci (Tramagal)
35	Seixal	45	Aritium Praetorium	55	Aritium Vetus (Alvega)
36	Arraiolos	46	Ad Septem Aras (Campo Maior)	56	Sellium (Tomar)
37	Lisboa	47	Arabriga (Alenquer)	57	Egitania (Idanha-a-Velha)
38	Vila Viçosa	48	Assumar	58	Monsanto
39	Estremoz	49	Abelterium (Alter do Chão)	59	Conimbriga
40	Terrugem	50	Almeirim	60	Aeminium (Coimbra)
61	Centum Cellae	71	Salatia	81	Roboretum (Vinhais)
62	Abrunhosa	72	Beteca (Boticas)	82	Compleutica (Cova da Lua)
63	Oppidum Vacca (Cabeço do Vouga)	73	Praesidio	83	Tude (Tui)
64	Viseu	74	Vila da Ponte		
65	S. Pedro do Sul	75	Aquae Flaviae (Chaves)		
66	Talbriga (Branca)	76	Pinetum		
67	Lancobriga (Fiães da Feira)	77	Caladunum		
68	Cale (Gaia)	78	Limia (Ponte de Lima)		
69	Avobriga	79	Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)		
70	Bracara (Braga)	80	Portela do Homem		

Apesar da importância que se atribui à Rede de Estradas Romanas na organização espacial de Portugal[97], a análise da relação existente entre sistema de redes de estradas, estrutura e indicadores de conectividade permite depreender, que se está presente um país com um sistema de rede de estradas desconexo, com uma configuração em espinha ou árvore (sobretudo a Norte do Tejo), típico de um País com um débil nível de desenvolvimento (Garrison, 1960; Garrison e Marble, 1961), conforme atestam os índices de conectividade e coesão (cf. Cap.2), e.g. os índices gama (γ = 0.35) e alfa (α = 0.01), que dizem que apenas 35% da rede está conectada, face à máxima conectividade possível.

96 Os nomes são retirados de ALARCÃO, Jorge (1974) – Portugal Romano. Vol.33. Lisboa. Historia Mundi. 244pp; ALARCÃO, Jorge (1990) coord. - Nova História de Portugal: vol. I: Portugal: das origens à romanização. Lisboa, Editorial Presença.558pp. e de Topónimos Romanos em Portugal [Acedido em 25 de Junho de 2010]. http://pt.wikipedia.org/wiki/Top%C3%B3nimos_romanos_em_Portugal#cite_ref-0.

97 "…foram os Romanos com o traçado da rede de vias militares (…) que criaram as linhas gerais do povoamento (…) O sistema das estradas Romanas (…) envolvia duas consequências para o futuro: aquilo a que chamaremos de atlantização do povoamento e a sua unificação por meio de uma linha dorsal no sentido meridiano. Nessa espécie de esqueleto do povoamento, constituída pela rede itinerária (…) a estrada que unia o Algarve à Galiza representava a coluna vertebral." (Cortesão, 1964:37-39)

Esta ilação é fundamentada pelas medidas obtidas nos índices de coesão (Cst = 40), grau de desenvolvimento (Gp = 41) e diâmetro da rede (42), que apresentam valores fracos. Em síntese, está-se perante uma rede de conectividade e coesão mínimas, com a quase totalidade dos nós a apresentarem apenas um caminho possível a ligá-los, ou seja, com poucos circuitos ou caminhos alternativos a ligar os nós da rede.

Não obstante a interpretação feita, a análise acerca da influência das redes de transportes na organização espacial e na relação com o desenvolvimento regional não está completa sem as medidas topológicas de acessibilidade e centralidade (cf. 2.3.2). Com efeito, a partir destas medidas é permitido, não apenas confirmar os resultados das medidas de conectividade acerca da estrutura geral da rede, como também explorar as propriedades das redes pela medição das ligações entre os nós, a saber: hierarquia, núcleo central, periferia, vizinhança, dominância e competição, eficácia e vulnerabilidade da rede.

Assim, para as Estradas Romanas a matriz inicial de conectividade (C^1) (cf. Anexo) permite identificar o grau de conectividade de cada nó e, por conseguinte, estabelecer uma hierarquia da rede (Tabela 8). De salientar contudo, que a matriz de conectividade (C^1) denota sérios limites enquanto medida de acessibilidade, uma vez que apenas representa a existência de ligações directas entre os nós da rede, pelo que o indicador de acessibilidade que daqui se retira só tem em consideração a ligação a 1 arco, ignorando ligações com 2 ou mais arcos, ou seja, ligações indirectas igualmente importantes nas acessibilidades de uma qualquer rede de transportes (cf. Cap. 2).

TABELA 8 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE CONECTIVIDADE C^1 DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade C^1
1	**Bracara (Braga)**	**4**
2	Portus Hannibalis (Portimão?)	3
2	Arandis (Garvão)	3
2	Santa Clara de Louredo	3
2	Fines (Corte de Messangil)	3
2	Pax Ivlia (Beja)	3
2	Nova Civitas Aruccitana (Moura)	3
2	Odivelas	3
2	Torrão	3
2	Salacia (Alcacer do Sal)	3
2	Aguas de Moura	3
2	Terrugem	3
2	Arabriga (Alenquer)	3
2	Scallabis (Santarem)	3
2	Oppidum Vacca (Cabeço do Vouga)	3
2	Aquae Flaviae (Chaves)	3
2	Roboretum (Vinhais)	3
18	Ossonoba (Faro)	2
18	Balsa (Tavira)	2

18	Viseu	2
18	S. Pedro do Sul	2
18	Talbriga (Branca)	2
18	Lancobriga (Fiães da Feira)	2
18	Cale (Gaia)	2
18	Avobriga	2
18	Salatia	2
18	Praesidio	2
18	Vila da Ponte	2
18	Pinetum	2
18	Caladunum	2
18	Limia (Ponte de Lima)	2
32	Lacobriga (Lagos)	1
32	Baesuris (Castro Marim)	1
32	Myrtilis (Mértola)	1
32	Sines	1
32	Lousa	1
32	Seixal	1
32	**Lisboa**	**1**
32	Aritium Vetus (Alvega)	1
32	Egitania (Idanha-a-Velha)	1
32	Beteca (Boticas)	1
32	Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)	1
32	Portela do Homem	1
32	Compleutica (Cova da Lua)	1
32	**Tude (Tui)**	**1**

Num primeiro momento, pode realçar-se quais os nós mais acessíveis e os menos acessíveis que permitem, conjuntamente, com o mapa do grafo georreferenciado, identificar o núcleo central e a periferia do sistema de lugares. Apesar de ser Bracara (Braga), o lugar de maior número de ligações directas (4), ela não constitui o núcleo central da rede, de acordo com a tabela de conectividades da matriz C^1, uma vez que não existe adjacência com os lugares que sucedem na hierarquia, e.g. Arandis (Garvão), Santa Clara de Louredo, Pax Ivlia (Beja), Nova Civitas Aruccitana (Moura), Odivelas, Torrão e Salacia (Alcacer do Sal), que pela vizinhança e adjacência constituem o núcleo central deste sistema de lugares estruturado pela rede de estradas Romanas.

Em oposição, a periferia deste sistema é caracterizado por um polvilhado de lugares de grau 1, de que sobressaem a Norte: Tude (Tui), Portela do Homem, Compleutica (Cova da Lua) e Civitas zoelarum (Castro de Avelãs); a Oriente: Egitania (Idanha-a--Velha) e Aritium Vetus (Alvega); a Ocidente: Lisboa, Seixal e Sines, e a Sul: Baesuris (Castro Marim) e Lacobriga (Lagos).

Contudo, a matriz C^1 corresponde apenas à matriz inicial, base para cálculo das restantes matrizes, uma vez que é a partir dela que se sabe existirem ou não ligação directa entre quaisquer pares de nós. Para uma mais 'fina' avaliação da influência

da matriz de conectividade e acessibilidade C e mais descriminada hierarquia dos lugares, tem de se verificar os resultados obtidos aquando do esgotamento da matriz C^n para todas as ligações possíveis, ou seja, para o diâmetro da rede: C^{42} (Tabela 9).

TABELA 9[98] HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE CONECTIVIDADE C42 DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS.

Ordenação	Lugar	Índice de conectividade C^{42}
1	**Odivelas**	923.05
2	Torrão	860.82
3	Pax Ivlia (Beja)	826.92
4	Fines (Corte de Messangil)	739.25
5	Peroguarda	737.55
6	Santa Clara de Louredo	700.66
7	Metallum Vispacensis (Aljustrel)	665.66
8	Nova Civitas Aruccitana (Moura)	659.36
9	Arandis (Garvão)	653.69
10	Salacia (Alcacer do Sal)	649.06
11	Arucci Vetus (Aroche)	579.34
12	Quintos	571.99
13	Castro Verde	564.27
14	Serpa	541.39
15	Alcáçovas	451.32
16	Marateca	406.22
17	Santa Clara-a-Velha	361.64
18	Mirobriga (Santiago do Cacem)	335.48
19	Águas de Moura	299.20
20	Myrtilis (Mértola)	289.66
63	Alpiarça	16.44
64	Ad Septem Aras (Campo Maior)	15.64
65	Tude (Tui)	15.60
66	Baesuris (Castro Marim)	15.37
67	Caladunum	12.23
68	Ponte de Sor	12.19
69	Aquae Flaviae (Chaves)	11.91
70	Viseu	11.16
71	Assumar	10.94
72	**Lisboa**	**10.90**
73	Abelterium (Alter do Chão)	10.38
74	Tubucci (Tramagal)	9.32
75	Pinetum	7.44
76	Abrunhosa	6.58
77	Roboretum (Vinhais)	5.95
78	Beteca (Boticas)	4.92
79	Aritium Vetus (Alvega)	4.09
80	Centum Cellae	4.02
81	Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)	2.52
82	Compleutica (Cova da Lua)	2.52
83	Monsanto	2.19
84	**Egitania (Idanha-a-Velha)**	1.00

98 Os valores foram ponderados pelo valor mínimo obtido pela matriz.

Com efeito, da leitura da tabela 9 pode constatar-se que existe uma maior descriminação da hierarquia dos lugares e a permanência espacial do núcleo central e da periferia, ainda que os lugares tenham mudado de posição na ordenação (ex: Odivelas e Torrão que passam da posição 2 para a posição de topo na hierarquia de lugares com maior conectividade). Note-se ainda para o que em cima se designou de mais 'fina' análise da rede e que redundou na saída de Bracara (Braga) dos 20 lugares de maior conectividade, quando era o mais conexo na matriz C^1, o que é resultado da melhor capacidade de hierarquização do método, pois como se tinha referido, a matriz C^1 não atribui importância às ligações indirectas entre os nós, facto que leva a que a medida de conectividade que dela se retira seja considerada um fraco descriminador da hierarquia da rede (Taaffe e Gauthier, 1973:120). Para o refinamento desta medida, e para que nela se passe a integrar, quer as ligações directas, quer as indirectas, é preciso recorrer-se a outras matrizes, nomeadamente à matriz T e à matriz D (cf. Anexo).

Derivada da multiplicação das matrizes C, a matriz T^{42} já permite obter um indicador de acessibilidade que integre não apenas as ligações directas, mas também indique o número de caminhos possíveis para se ir de um nó a qualquer outro nó da rede. A medida de acessibilidade é obtida pelo somatório das linhas da matriz, sendo que quanto maior o valor, maior é a acessibilidade do nó (Tabela 10). Tal como se fez referência em 2.3.2 (Medidas de acessibilidade), o poder descriminador da matriz T é tanto maior quanto maior a complexidade da rede, isto é, o número de arcos e de nós.

TABELA 10[99] HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADES T42 DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS.

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade T^{42}
1	**Odivelas**	2990.21
2	Torrão	2754.74
3	Pax Ivlia (Beja)	2669.10
4	Fines (Corte de Messangil)	2375.80
5	Peroguarda	2364.56
6	Santa Clara de Louredo	2252.69
7	Metallum Vispacensis (Aljustrel)	2133.49
8	Nova Civitas Aruccitana (Moura)	2120.54
9	Arandis (Garvão)	2111.89
10	Salacia (Alcacer do Sal)	2108.97
11	Arucci Vetus (Aroche)	1863.10
12	Quintos	1836.54
13	Castro Verde	1814.67
14	Serpa	1743.61
15	Alcáçovas	1465.16
16	Marateca	1298.73
17	Santa Clara-a-Velha	1160.25
18	Mirobriga (Santiago do Cacem)	1072.63
19	Águas de Moura	975.09
20	Myrtilis (Mértola)	933.52
63	Alpiarça	56.20

99 Os valores foram ponderados por 10^{13}

64	Tude (Tui)	54.74
65	Ad Septem Aras (Campo Maior)	51.01
66	Baesuris (Castro Marim)	49.75
67	Caladunum	42.78
68	Ponte de Sor	41.52
69	Aquae Flaviae (Chaves)	39.59
70	Viseu	37.59
71	**Lisboa**	**36.87**
72	Assumar	36.59
73	Abelterium (Alter do Chão)	34.55
74	Tubucci (Tramagal)	31.53
75	Pinetum	25.92
76	Abrunhosa	22.57
77	Roboretum (Vinhais)	19.96
78	Beteca (Boticas)	17.16
79	Aritium Vetus (Alvega)	13.98
80	Centum Cellae	13.57
31	Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)	8.76
82	Compleutica (Cova da Lua)	8.76
83	Monsanto	7.50
84	**Egitania (Idanha-a-Velha)**	3.38

Efectivamente, com as matrizes de acessibilidades T^i já é possível dispor de uma maior capacidade hierarquizante, não obstante os 20 primeiros lugares mais acessíveis não terem sofrido quaisquer mudanças de posição na ordenação. As alterações começam a verificar-se apenas depois e prosseguem até aos lugares com valores de acessibilidade mais baixos da tabela 10. Todavia, devido à simplicidade da rede, com uma estrutura em árvore, a diferença entre as matrizes C^{42} e T^{42} é diminuta no que toca à hierarquia dos lugares, sendo que para obtenção de um padrão mais representativo da hierarquia, é necessário eliminar algumas redundâncias. Assim, melhor do que saber o número de ligações possíveis entre quaisquer pares de nós, é saber qual o melhor caminho entre todos os nós em função do número de ligações (Shimbel, 1953:501), ou seja, a medida de acessibilidade de um nó relativamente à rede. Para tal é preciso efectuar-se o cálculo da matriz D ou matriz de distâncias topológicas de Shimbel (cf. Cap. 2).

Nestas matrizes, tal como nas matrizes C^i e T^i, é da soma das linhas que se vai obter a medida de acessibilidade, que no caso da matriz D significa que a acessibilidade do nó na rede é tanto maior, quanto mais baixo for o valor obtido. Ou seja, quanto menor for o número das ligações (arcos) para ligar quaisquer pares de nós da rede, maior será a acessibilidade desse nó na rede (Tabela 11).

Na consequência do refinamento da medida de acessibilidade, uma nova hierarquia da rede de lugares é determinada (Tabela 11), com reflexo na organização espacial por deslocação dos centros e das periferias.

TABELA 11 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADES D DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS.

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Ad Septem Aras (Campo Maior)**	**966**
2	Emerita (Mérida)	967
2	Assumar	967
4	Elvas	970
4	Abelterium (Alter do Chão)	970
6	Terrugem	975
6	Ponte de Sor	975
8	Coruche	982
9	Aritium Praetorium	991
10	Vila Viçosa	1001
11	Arabriga (Alenquer)	1002
12	Estremoz	1014
13	Scallabis (Santarém)	1019
14	Redondo	1025
15	Arraiolos	1032
16	S. Miguel de Machede	1046
17	Sellium (Tomar)	1046
18	Montemor-o-Novo	1050
19	Ebora (Evora)	1064
20	Águas de Moura	1068
65	Fines (Corte de Messangil)	1477
66	Monsanto	1514
67	Praesidio	1522
68	Ossonoba (Faro)	1546
69	Lacobriga (Lagos)	1550
70	Tude (Tui)	1554
71	Nova Civitas Aruccitana (Moura)	1555
72	Arucci Vetus (Aroche)	1556
73	Vila da Ponte	1589
74	Egitania (Idanha-a-Velha)	1595
75	Balsa (Tavira)	1625
76	Lousa	1636
77	Caladunum	1658
78	Baesuris (Castro Marim)	1706
79	Aquae Flaviae (Chaves)	1729
80	Pinetum	1804
81	Beteca (Boticas)	1810
82	Roboretum (Vinhais)	1881
83	Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)	1962
84	**Compleutica (Cova da Lua)**	**1962**
34	**Lisboa**	**1162**

Ao compararem-se a ordenação do quadro com as hierarquias de lugares (Tabela 12, abaixo), constata-se que as medidas de acessibilidade determinadas, quer pela matriz C, quer pela matriz T, revelam uma hierarquia dos lugares muito semelhantes, com o núcleo central e a periferia a permanecerem quase imutáveis nas respectivas

hierarquias. Contudo, esta hierarquia da rede sofre fortes alterações quando comparada com a ordenação determinada a partir dos índices de Shimbel (matriz D).

Enquanto nas matrizes C^{42} e T^{42}, Odivelas, Torrão, Pax Ivlia, Fines, … compõem o núcleo central, pois são matrizes que privilegiam apenas as ligações directas e todas as ligações, respectivamente, na matriz D o núcleo central passa a ser composto por Ad Septem Aras (Campo Maior), Emerita (Mérida), Assumar, … (Figura 33). Aliás, uma análise mais fina permite verificar que somente um lugar (Águas de Moura), dos 20 mais acessíveis segundo as matrizes C^i e T^i, tem lugar entre os 20 mais acessíveis da matriz D, ou ainda que dos 10 lugares mais acessíveis na ordenação da matriz D, nenhum figura entre os primeiros 20 lugares, quer da ordenação da matriz C^i, quer na ordenação da matriz T^i (Tabela 12), o que permite afirmar que as redundâncias foram completamente eliminadas da matriz

Relativamente aos lugares que formam a extrema periferia da rede, quanto à sua acessibilidade, o cenário é diferente. Existe uma mesma similitude das hierarquias das matrizes C^{42} e T^{42}, e.g. Egitania (Idanha-a-Velha), Monsanto, Compleutica (Cova da Lua), Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs), Centum Cellae, Aritium Vetus (Alvega), … permanecem imutáveis entre os menos acessíveis; contudo, na ordenação da matriz D, a situação não é a mesma que se analisou para os lugares que componham o núcleo central. Precisamente, existem lugares entre os 10 menos acessíveis da matriz D, que podem igualmente encontrar-se nas matrizes C^{42} e T^{42}, e.g. Roboretum (Vinhais), Beteca (Boticas), Pinetum, Aquae Flaviae (Chaves), Baesuris (Castro Marim) e Caladunum, que estando na base dos menos acessíveis da ordenação da matriz D, apesar de não serem os últimos nas matrizes C^{42} e T^{42}, encontram-se entre os 20 menos acessíveis. De uma perspectiva espacial, devido à simplicidade da estrutura da rede, as mudanças não são acentuadas. Contudo, a realidade analisada pelo método da matriz D, permite verificar uma perspectiva diferente, a saber: existe uma evidente mudança do núcleo central mais para norte e interior do território.

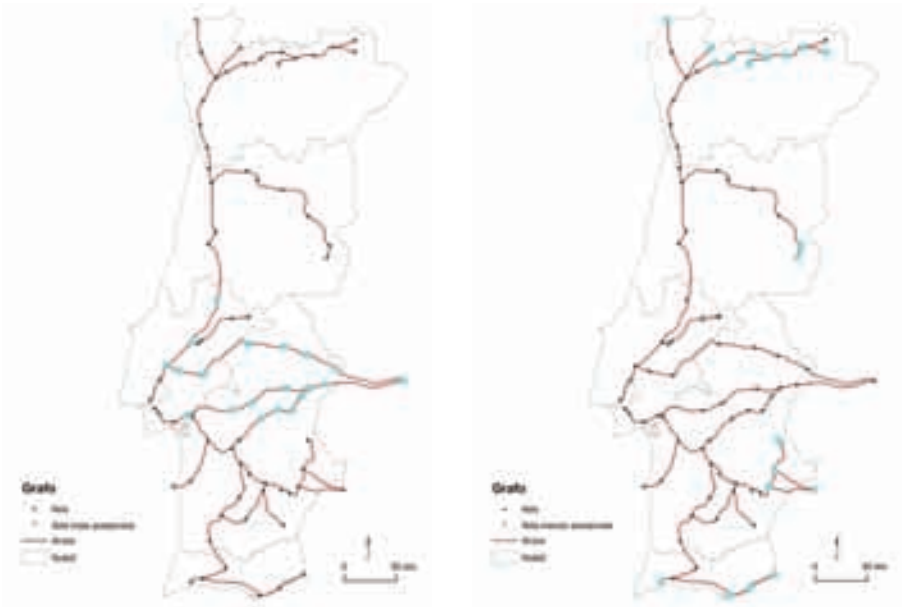
TABELA 12[100] COMPARAÇÃO DAS HIERARQUIAS DA REDE DE LUGARES, OBTIDAS A PARTIR DAS MATRIZES C^{42}, T^{42} E D DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS.

Lugar	*Ordenação* C^{42}	*Ordenação* T^{42}	*Ordenação* D
Ad Septem Aras (Campo Maior)	65	65	1
Emerita (Mérida)	52	55	2
Assumar	70	71	3
Elvas	40	41	4
Abelterium (Alter do Chão)	72	72	5
Terrugem	31	32	6
Ponte de Sor	67	67	7
Coruche	60	60	8
Aritium Praetorium	51	51	**9**

100 Azul: os 10 lugares mais e menos acessíveis da matriz D; Verde: os 10 lugares mais acessíveis das matrizes C^{42} e T^{42}.

Vila Viçosa	35	35	10
Odivelas	1	1	30
Torrão	2	2	25
Pax Ivlia (Beja)	3	3	43
Fines (Corte de Messangil)	4	4	64
Peroguarda	5	5	37
Santa Clara de Louredo	6	6	49
Metallum Vispacensis (Aljustrel)	7	7	35
Nova Civitas Aruccitana (Moura)	8	8	70
Arandis (Garvão)	9	9	42
Salacia (Alcacer do Sal)	10	10	28
Egitania (Idanha-a-Velha)	83	83	73
Balsa (Tavira)	44	44	74
Lousa	21	21	75
Caladunum	66	66	76
Baesuris (Castro Marim)	65	65	77
Aquae Flaviae (Chaves)	**68**	**68**	**78**
Pinetum	74	74	79
Beteca (Boticas)	**77**	**77**	**80**
Roboretum (Vinhais)	**76**	**76**	**81**
Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)	**80**	**80**	**82**
Compleutica (Cova da Lua)	81	81	83

FIGURA 34 GRAFO DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS COM IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS E MENOS ACESSÍVEIS DA REDE CALCULADOS A PARTIR DA MATRIZ D.



Em síntese, e após se ter analisado os resultados das medidas de conectividade e das medidas de acessibilidade e centralidade, que descrevem a rede de Estradas Romanas pode afirmar-se que a rede denota um fraco grau de coesão e fortes assimetrias espaciais, no que respeita à sua organização no território, mais concentrada Norte/Sul e, consequentemente, onde se encontram os lugares com maiores índices de centralidade.

No que respeita aos índices de acessibilidade, a dicotomia Litoral *vs* Interior não se faz sentir, apesar de existir uma ocupação da rede preferencialmente ao longo do Litoral. Tal deve-se ao facto de a rede apresentar uma estrutura simples e em árvore. O que se manifesta é uma dicotomia entre a geografia e a topologia, o que segundo Taaffe, Morril e Gould (1963), e com base nos índices resultantes, significa tratar-se de um País pouco desenvolvido e com fraco poder económico, por denotar uma estrutura pouco densa da rede de transportes, de fraca conectividade e complexidade e com um sistema de lugares com desigual ocupação territorial.

Contudo, as medidas de conectividade e de acessibilidade não exprimem toda a dimensão da dinâmica das redes e sua relação com o território. De forma a medir essa relação, confrontam-se e analisam-se os resultados das medidas topológicas com outros derivados das medidas de distribuição espacial compostas pelo cálculo da medida central e da elipse do desvio padrão.

A medida central é uma função determinada a partir do somatório das distâncias euclidianas (D_e) entre um objecto e todos os outros objectos espaciais. Quanto menor o seu valor, mais central a localização dos objectos no espaço geográfico. Formalmente, a função traduz-se por:

$$D_e\,(A,B) = \sqrt{\frac{\sum(x - x_1)^2 + \sum(y - y_1)^2}{n}}$$

em que A e B correspondem aos objectos, aqui medidos pela distância que os separa através do seu referencial geográfico, ou seja, as suas coordenadas geográficas ou cartesianas (x-x_1) e (y-y_1), enquanto n representa o número de objectos existentes, que no caso em estudo são os lugares da rede.

$$Cx = \frac{\sum(xi)}{n} \qquad Cy = \frac{\sum(yi)}{n}$$

Quanto à elipse do desvio padrão (SDE)[101], esta mede e representa a existência ou não de uma tendência de distribuição espacial em torno do objecto central e para uma estrutura de objectos. Formalmente:

$$SDE_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}} \qquad SDE_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}{n}},$$

101 (*Standard Deviation Ellipse*) in Mitchell, Andy. The ESRI Guide to GIS Analysis, Volume 2. ESRI Press, 2005.

sendo x_i e y_i as coordenadas dos nós *i*, { $\overline{X}$, $\overline{Y}$ } representa o Centro Médio dos nós, e *n* corresponde ao número total de *nós.*

Por sua vez, o ângulo de rotação da elipse é calculado de acordo com:

$$tan\ \theta = \frac{A + B}{C}$$

$$A = \left(\sum_{i-1}^{n} \tilde{x}_i^2 - \sum_{i-1}^{n} \tilde{y}_i^2 \right)$$

$$B = \sqrt{\left(\sum_{i-1}^{n} \tilde{x}_i^2 - \sum_{i-1}^{n} \tilde{y}_i^2 \right)^2 + 4\left(\sum_{i-1}^{n} \tilde{x}_i \tilde{y}_i \right)^2}$$

$$C = 2 \sum_{i-1}^{n} \tilde{x}_i \tilde{y}_i$$

sendo:

$\tilde{x}_i$ e $\tilde{y}_i$ os desvios das coordenadas *xy* em relação ao Centro Médio.

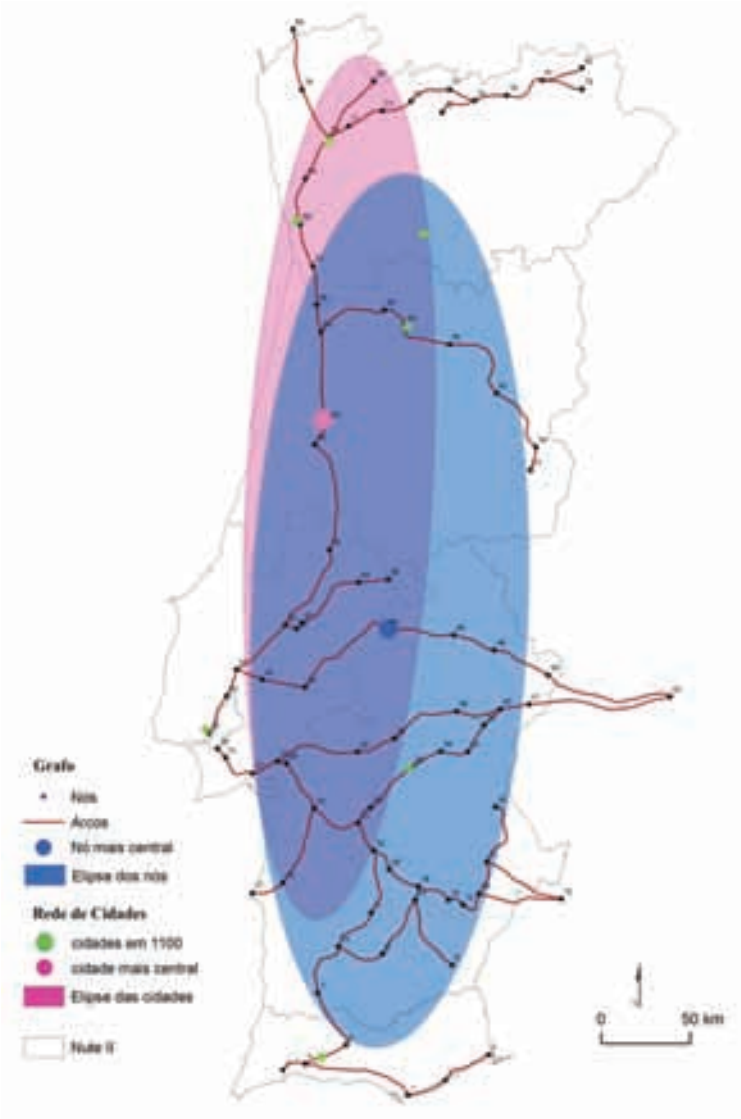
Os desvios padrão em torno do eixo *x* e em torno do eixo y são calculados pelas expressões:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{x}_i \cos\theta - \tilde{y}_i \sin\theta \right)^2}{n}}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(\tilde{x}_i \sin\theta - \tilde{y}_i \cos\theta \right)^2}{n}}$$

Para análise das Estradas Romanas, estas medidas territoriais foram calculadas, quer para a estrutura de nós da rede de estradas, quer para a estrutura de pontos formados pelo conjunto de cidades existentes no ano de 1100 (Figura 35), com o intuito de encontrar padrões de similitude ou dissimilitude espacial. Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos estrutura-se a análise em três partes: primeiro, a análise dos resultados obtidos a partir dos nós da rede de estradas; depois dos resultados obtidos a partir da rede de cidades; e finalmente, uma análise comparativa entre resultados. Esta será de resto a metodologia seguida para as redes de estradas de outros períodos.

FIGURA 35 GRAFO DAS VIAS ROMANAS COM A REDE DE CIDADES EXISTENTES EM 1100, E AS MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL



Com o apoio visual providenciado pelos SIG e devido à possibilidade de georreferenciação, é fácil identificar, segundo o cálculo da medida central aos nós da rede de estradas, Ponte de Sôr como o lugar mais central face a todos os outros lugares da rede. No entanto, se considerarmos a estrutura do sistema de cidades existentes no ano de 1100, constatamos que existe uma mudança da centralidade para Norte, com Coimbra a afirmar-se como a cidade mais central. Tais resultados vão ter obviamente implicações sobre a tendência que se configura quanto à organização e configuração do território.

De acordo com as elipses do desvio, o que se constata é uma mudança ('esticar e alongar') dos eixos (x e y) da rede de cidades. Efectivamente, se no caso da rede de nós (lugares) das estradas, a elipse apresenta-se maior (em ambos os eixos) e focada no Sul do País, já no caso da rede de cidades (cor rosa), a perspectiva da realidade sofre mudanças. Com efeito, a elipse 'sobe' (para lá do Gerês) e 'estende-se-se' ao longo do Litoral e para Sul, até Sines, enfatizando a importância estrutural da estrada que vem do Norte até Lisboa, ao longo do Litoral.
Confrontando os resultados, duas notas sobressaem:

- O facto de, as medidas de distribuição espacial reforçarem os resultados obtidos pelas medidas topológicas, quando aplicadas aos nós da rede de estradas;

- A tendência que se começa a desenhar no território, de uma litoralização do sistema urbano nacional e que, passados mil anos continua a persistir. (cf. PRN 2000).

Seguindo a mesma metodologia delineada para as Estradas Romanas, avança-se agora para a análise das medidas topológicas para a Rede de Itinerários de 1800, que antecede o período do Fontismo (Figura 36), e que antecedeu aquela que foi a primeira Lei[102] sobre a moderna rede de estradas (Alegria, 1990:104). Este salto temporal para a análise da rede de estradas prende-se sobretudo com o facto deste intervalo ser identificado por um imobilismo na renovação de uma estrutura viária por caminhos e calçadas e que perdurou até à segunda metade do século XIX (Silveira, 1994:29).

É desta primeira Lei sobre a rede de estradas de Portugal e da reclassificação das estradas que se introduziu pela primeira vez a designação de itinerário principal. De resto, em traços gerais, o sistema de classificação baseava-se em:

- Estradas nacionais de 1ª classe;
- Estradas nacionais de 2ª classe;
- Estradas nacionais de 3ª classe;
- Estradas municipais;
- Caminhos públicos, Municipais e Vicinais (artº1 do Decreto-lei34:593 de 1945).

As estradas nacionais de 1ª classe, que fazem a ligação entre os principais centros e entre estes e os portos ou a fronteira, constituem os itinerários principais, enquanto as estradas nacionais de 2ª classe que estabelecem a ligação dos principais centros de cada distrito e destes com as estradas de 1ª classe, completam a rede fundamental. Para esta dissertação, e dado que a Rede estruturada segundo esta Lei nunca se verificou no território, fez-se uso da Rede de Itinerários de 1800[103] (cf. Figura 36).

102 Decreto-lei nº34:593. Plano rodoviário. Classificação das estradas nacionais e municipais e dos caminhos públicos e fixação das respectivas características técnicas.

103 Base cartográfica extraída de Matos, Artur Teodoro (1980). Transportes e comunicação em Portugal, Açores e Madeira (1750-1850). Ponta Delgada, Universidade dos Açores. 650pp.

FIGURA 36 GRAFO DAS ESTRADAS ROMANAS[95]

PARA A REDE VIÁRIA DE 1800

Medidas Topológicas
Arcos = 390
Nós = 244
SubGrafo = 1

Índice gama (γ) = 0.53
Índice alfa (α) = 0.30
Índice de coesão (Cst) = 76
Índice do grau de desenv. (Gp) = 193.8
Índice dispersão = 690474

Diâmetro da rede = 31
Índice acessibilidade (D)
D_{max} = 422 (Madalena, nó 142)
D_{min} = 4432 (Melgaço, nó 244)

Em que:

1	Faro	11	Lagoa	21	Estômbar
2	Sagres	12	Ferragudo	22	Silves-Estômbar
3	Vila do Bispo	13	Loulé	23	Vila Real de Santo António
4	Olhão	14	São Brás de Alportel	24	Silves
5	Conceição	15	Budens	25	Monte Judeu
6	Albufeira	16	Estói	26	Castro Marim
7	Quarteira	17	Espiche	27	Benafim
8	Lagos	18	Odiáxere	28	São Batelomeu de Messines
9	Portimão	19	Tavira	29	São Brás de Alportel
10	Alvor	20	Pedralva	30	Carrapateira
31	Odeleite	41	Ameixial	51	Odemira
32	Messines de Baixo	42	Aljezur	52	Castro Verde
33	Estrada	43	Zambujeira de Baixo	53	Casével
34	Cabaços	44	Foz do Farelo	54	Vales Mortos
35	Umbrias de Baixo	45	Mértola	55	Sines
36	Montes de Cima	46	Almodôvar	56	Santiago do Cacém
37	Odelouca	47	Gomes Aires	57	Beja
38	Monchique	48	Santana da Serra	58	Ferreira do Alentejo

39	Zambujal	49	Odeceixe	59	Serpa
40	Alcoutim	50	Ourique	60	Santa Margarida do Sado
61	Grândola	71	Tróia	81	Barreiro
62	Moura	72	Quinta do Conde	82	Vendas Novas
63	Ermidas-Sado	73	São Manços	83	Montemor-o-Novo
64	Canhestros	74	Setúbal	84	Almada
65	Cuba	75	Palmela	85	Sarilhos Grandes
66	Alvito	76	Marateca	86	Santo Isidro de Pegões
67	Alcácer do Sal	77	Évora	87	Moita
68	Mourão	78	Amora	88	Montijo
69	Sesimbra	79	Seixal	89	Arraiolos
70	Reguengos de Monsaraz	80	Pinhal Novo	90	Redondo
91	Canha	101	Estremoz	111	Mora
92	Lisboa	102	Borba	112	Fronteira
93	Évora Monte	103	Elvas	113	Benavente
94	Olivença	104	Santo Aleixo	114	Bucelas
95	Alandroal	105	Mafra	115	Vila Franca de Xira
96	Santana do Mato	106	Sintra	116	Campo Maior
97	Vila Viçosa	107	Sousel	117	Arruda dos Vinhos
98	Amadora	108	Ericeira	118	Santa Eulália
99	Vimieiro	109	Póvoa de Santa Iria	119	Torres Vedras
100	Coruche	110	Pavia	120	Avis
121	Arronches	131	Rio Maior	141	Paço
122	Monforte	132	Caldas	142	Madalena
123	Alenquer	133	Alcanena	143	Alcobaça
124	Santarém	134	Entroncamento	144	Tomar
125	Ponte de Sôr	135	Nisa	145	Fátima
126	Crato	136	Torres Novas	146	Leiria
127	Portalegre	137	Chancelaria	147	Alvaiázere
128	Bombarral	138	Abrantes	148	Ansião
129	Peniche	139	Zibreira	149	Castelo Branco
130	Óbidos	140	Asseiceira	150	Pampilhosa da Serra
151	Pombal	161	Montemor-o-Velho	171	Seia
152	Louriça	162	Coimbra	172	Santana da Azinha
153	Idanha-a-Nova	163	Covilhã	173	Mortágua
154	Miranda do Corvo	164	Penacova	174	Nelas
155	Fundão	165	Belmonte	175	Gouveia
156	Figueira da Foz	166	Sabugal	176	Guarda
157	Miranda do Corvo	167	Mealhada	177	Tondela
158	Penamacor	168	Santa Comba Dão	178	Mosteirinho
159	Arganil	169	Oliveira do Hospital	179	Águeda
160	Vila Nova de Poiares	170	Anadia	180	Requeixo
181	Mangualde	191	Vila Franca das Naves	201	São João da Madeira
182	Fornos de Algodres	192	Almeida	202	Mondim da Beira
183	Aveiro	193	Trancoso	203	Paçô
184	Celorico da Beira	194	Pinhel	204	Espinho
185	Gafanha da Nazaré	195	Satão	205	Tarouca
186	Viseu	196	Aguiar da Beira	206	Tabuaço

187	Albergaria-a-Velha	197	Vila Nova de Paiva	207	Castelo de Paiva
188	Cova	198	Lamas	208	Castro Daire
189	Sever do Vouga	199	Ovar	209	Freixo de Espada ß Cinta
190	Vouzela	200	São Pedro do Sul	210	São João da Pesqueira
211	Gondomar	221	Trofa	231	Mirandela
212	Lamego	222	Felgueiras	232	Cabeceiras de Basto
213	Porto	223	Vila Real	233	Miranda do Douro
214	Marco de Canavezes	224	Alfândega da Fé	234	Braga
215	Vila Nova de Foz Côa	225	Vila do Conde	235	Vimioso
216	Valongo	226	Vila Flor	236	Ponte de Lima
217	Torre de Moncorvo	227	Póvoa de Varzim	237	Vieira do Minho
218	Baião	228	Vila Nova de Famalicão	238	Barcelos
219	Penafiel	229	Murça	239	Viana do Castelo
220	Amarante	230	Guimarães	240	Chaves
241	Bragança				
242	Caminha				
243	Valença				
244	Melgaço				

Depois da estrutura 'litoralizada' das Estradas Romanas, o território aparece, agora, à luz do sistema da rede de estradas do final do séc. XIX, mais equilibrado, com os itinerários a cobrirem bastante uniformemente o território.

Segundo as medidas de conectividade, a rede de estradas em Portugal continental no ano de 1800 indicava um País ainda pouco desenvolvido, mas que face à estrutura viária romana denota já um processo de renovação e desenvolvimento, conforme provam as subidas significativas, nos índices gama (γ) e alfa (α).

O aumento das componentes do grafo, isto é, dos nós e sobretudo dos arcos, evidencia uma dinâmica, que por si pouco significa, mas que combinada com a distribuição espacial e os valores de (γ) e (α) traduz-se numa estrutura mais complexa e numa rede mais densa que o formalismo do modelo baseado nas medidas de conectividade vai confirmar, ao assinalar a criação de vários circuitos, ou seja, de caminhos alternativos para deslocações entre nós. O índice alfa ($\alpha = 0.30$) dá os primeiros, ainda que incipientes, sintomas, e o índice gama (γ=0.53), complementado pelos índices de coesão (Cst = 76.0) e grau de desenvolvimento (Gp = 193.8), sublinham tratar-se de uma rede que embora não seja de conectividade máxima, é uma rede mais desenvolvida, conforme prova a diminuição do diâmetro da rede. Trata-se, do ponto de vista da estrutura da rede, de uma rede em malha (cf. Cap. 2).

Efectivamente, enquanto na rede de Estradas Romanas apenas 35% da rede estava conectada, na rede de estradas de 1800, a conectividade subiu para 53%, conforme prova o índice gama (γ). Estes primeiros indicadores dão já indicação de um aumento da complexidade na organização espacial da rede. Contudo devem ser reforçados com a leitura e a análise dos resultados das medidas de acessibilidade e centralidade.

Segundo a matriz inicial de conectividade (D), é possível analisar-se a hierarquia da rede de lugares, medida a partir dos nós da rede de itinerários (Tabela 13).

TABELA 13 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE D DA REDE DE ITINERÁRIOS, 1800.

Ordenação	Lugar	Índice de conectividade C[42]
1	**Madalena**	**1916**
2	Asseiceira	1929
3	Pavia	1947
4	Tomar	1958
5	Arraiolos	1975
6	Abrantes	2017
7	Ansião	2022
8	Montemor-o-Novo	2035
9	Évora	2043
10	Fátima	2056
11	Alvaiázere	2061
12	Entroncamento	2104
13	Paço	2121
14	Ponte de Sôr	2128
15	Santana do Mato	2130
16	Alvito	2139
17	Évora Monte	2142
18	Miranda do Corvo	2143
19	Pombal	2144
20	Avis	2158
225	Alvor	3610
226	Silves-Estômbar	3630
227	Cabeceiras de Basto	3634
228	Espiche	3638
229	Vimioso	3704
230	Odeleite	3708
231	Pedralva	3709
232	Vila Real de Santo António	3712
232	Viana do Castelo	3712
234	Vieira do Minho	3713
235	Portimão	3778
236	Silves	3796
237	Lagos	3808
238	Budens	3874
239	Vila do Bispo	3911
240	Castro Marim	3948
241	Caminha	3950
242	Sagres	4153
243	Valença	4190
244	**Melgaço**	**4432**
138	**Lisboa**	**2875**

De acordo com a tabela 13 e a figura 37, o núcleo central do sistema de lugares, em termos de acessibilidade, constitui-se em dois pequenos *grupos*: um a Norte do Rio Tejo constituído por (Madalena, Asseiceira, Tomar, Abrantes, Ansião, Fátima, Alvaiázere, Entroncamento, Paço e Miranda do Corvo) e outro a Sul (Pavia, Arraiolos, Montemor-o-Novo, Évora, Ponte de Sôr, Santana do Mato, Alvito e Évora Monte), criando um eixo diagonal no centro do País, focado nas actuais NUTII: Lisboa e Vale do Tejo e Alentejo. Quanto aos lugares de menor acessibilidade topológica, uma consequência da externalidade geográfica (a Norte e a Sul), destacam-se os lugares: Melgaço, Valença, Caminha, Barcelos, Vieira do Minho, Cabeceiras de Basto e Vimioso a Norte; Sagres, Vila do Bispo, Pedralva, Budens, Espiche, Lagos, Silves, Alvor, Vila Real de Santo António, Castro Marim e Odeleite, sendo alguns deles lugares 'porta' (de entrada e saída) para o exterior, quer por mar, quer por continente (para a fronteira espanhola), conforme figura 36.

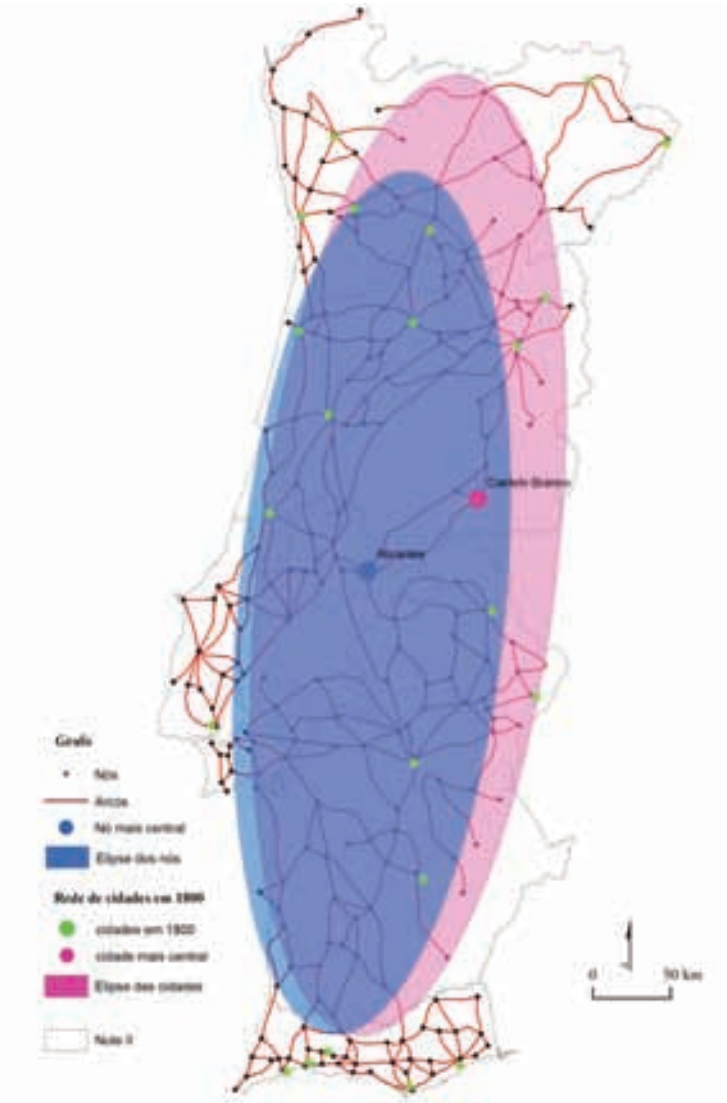
FIGURA 37 GRAFO DA REDE DE ITINERÁRIOS COM IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS E MENOS ACESSÍVEIS CALCULADOS A PARTIR DA MATRIZ D.

Numa análise comparativa com os mapas de acessibilidades (matriz D) da rede de Estradas Romanas (Figura 34), o facto mais relevante do ponto de vista da organização espacial, é o basculamento de aproximadamente 45º da elipse que resume a distribuição espacial do grupo dos nós mais acessíveis. De uma orientação horizontal Oeste – Este (Alenquer – Mérida), da rede de Estradas Romanas, para uma orien-

tação diagonal NW – SE (Miranda do Corvo – Alvito), a partir da rede de Itinerários de 1800 (Figura 37).

Relativamente à hierarquia dos lugares, o que mais se destaca são os lugares menos acessíveis, ou melhor, a configuração das periferias, que se localizam, uma vez mais, num confronto Norte e Sul, com o Alto Minho e Trás-os-Montes e o Algarve, em que se situam os lugares que ficam topologicamente a uma maior distância de todos os outros.

FIGURA 38 GRAFO DA REDE DE ITINERÁRIOS DE 1800, COM O SISTEMA DE REDE DE CIDADES EXISTENTES EM 1800, E AS MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL



Destaque ainda para a maior 'centralidade' que o centro do País assume, relativamente à rede de Estradas Romanas (cf. Figura 33). Tal facto deve-se à maior densidade e conectividade da rede, que passou de uma estrutura em espinha ou árvore, para uma estrutura em malha, o que é também consequência do aumento de caminhos alternativos, ou seja, de maior número de circuitos entre os pares de nós.

Confrontando estes resultados das medidas topológicas, com os resultados das medidas de distribuição espacial, nomeadamente a medida central e a elipse de tendência, tanto para os nós da rede de estrada de 1800, como para o conjunto de pontos representativos das cidades existentes à data de 1800 (Figura 38).

Conforme se pode verificar pela figura acima, entre a rede de lugares (nós) do grafo e a rede de cidades existentes em 1800, existe uma clara sobreposição espacial das elipses de tendência, ou seja, a distribuição espacial dos nós de ambas as redes é em média bastante similar.

Contudo, há que destacar o facto de a rede de Itinerários de 1800 apresentar, uma maior concentração no Litoral, conforme se prova pela localização do centro em Abrantes e de uma elipse que se 'encolhe' a Norte (eixo do y) e 'estreita' (eixo do x) para junto do Litoral, face às medidas verificadas para a rede de cidades, em que o centro geométrico se muda para o Interior (Castelo Branco) e, consequentemente, faz aumentar, quer o eixo menor a Este, quer o eixo maior a Norte, até junto da fronteira.

Em termos comparativos, e numa análise espacio-temporal, a rede de estradas de 1800 mostra uma evidente alteração na organização espacial, reconfigurando as acessibilidades no território, sobretudo visível a Norte, com um basculamento do grupo dos lugares mais acessíveis, que a elipse de tendência das cidades em 1100 já dava indícios.

Segundo alguns analistas, esta organização espacial da rede de estradas é resultado de uma política apostada em suprir as necessidades de circulação existentes, "… não satisfeitas pela anterior rede de caminhos, o que leva a crer que a construção da nova rede de transportes terrestres teve mais a função de dar resposta a necessidades existentes do que de as desenvolver naquelas onde elas eram mais reduzidas" (Alegria, 1990:135).

Apesar da primeira metade do século XIX ter sido de maior fôlego político e financeiro, com repercussões no melhoramento da rede de infra-estruturas de transporte - graças a Costa Cabral primeiro e Fontes Pereira de Melo depois -, o século XIX termina com novas debilidades governativas e económicas que reconduzem Portugal a um atraso no processo de ajustamento das redes de transportes e comunicação às necessidades do País e, consequentemente, no percurso para o desenvolvimento (Abreu, 2005:237). Só quase meio século depois, na década de 30, com Duarte Pacheco a acumular os cargos de ministro das Obras Públicas e Presidente da Câmara Municipal de Lisboa, o País volta a sentir a existência de uma política de apoio ao desenvolvimento da rede de transportes. É também neste período, que surge o primeiro Plano Rodoviário, em1945.

FIGURA 39 GRAFO DO PLANO RODOVIÁRIO DE PORTUGAL CONTINENTAL EM 1945[104]

REDE DE ESTRADAS DO PLANO RODOVIÁRIO DE 1945

Medidas Topológicas
A = 671
N = 390
G = 1

Índice gama (γ) = 0.58
Índice alfa (α) = 0.36
Índice de coesão (Cst) = 113.04
Índice do grau de desenv. (Gp) = 334.42
Índice dispersão = 2028876

Diâmetro da rede = 31
Índice acessibilidade (D)
D_{max} = 422 (Castelo Branco)
D_{min} = 901 (Caminha)

Em que:

1	Sagres	11	Tavira	21	Aljezur
2	Faro	12	Tunes-Guia	22	Monchique
3	Olhão	13	São Brás de Alportel	23	Dogueno
4	Vila do Bispo	14	Silves	24	S. Marcos da Serra
5	Almansil	15	Odelouca	25	Giões
6	Lagos	16	Vila Real de Santo António	26	Alcoutim
7	Quarteira	17	Castro Marim	27	santa Clara-a-Velha
8	Albufeira	18	São Bartolomeu de Messines	28	Santana da Serra
9	Portimão	19	Bordeira	29	Almodôvar
10	Loulé	20	Barranco Velho	30	Pomarão-Santana de Cambas
31	Odemira	41	Cercal	51	Brinches
32	S. Martinho das Amoreiras	42	Aljustrel	52	Canhestros
33	S. Martinho das Amoreiras1	43	Alvalade	53	Beja
34	Mértola	44	Serpa	54	Pias
35	Ourique	45	Vila Verde de Ficalho	55	Sobral da Adiça
36	Castro Verde	46	Sines	56	Azinheira dos Barros
37	Garvão	47	Baleizão	57	Ferreira do Alentejo
38	V Nova de Mil Fontes	48	Ervidel	58	Pedrógão
39	Colos	49	Ermidas do Sado	59	Safara
40	Messejana	50	Santiago do Cacém	60	Odivelas
61	Melides	71	Portel	81	Palmela
62	Barrancos	72	Alcáçovas	82	Marateca

104 Base cartográfica extraída do Decreto Lei 34593, de 11 de Maio de 1945.

63	Moura	73	Alcácer do Sal	83	Évora-São Matias
64	Grândola	74	Comporta	84	Amora
65	Vidigueira	75	Reguengos de Monsaraz	85	N. Sra. Graça do Divor
66	Alvito	76	Sesimbra	86	Seixal
67	Torrão	77	São Manços	87	S. Miguel de Machede
68	Sta. Margarida da Serra	78	Tróia	88	Montemor-o-Novo
69	Viana do Alentejo	79	Setúbal	89	Arrentela
70	Pinheiro da Cruz	80	Évora	90	Redondo
91	Barreiro	101	Arraiolos	111	Borba
92	Costa da Caparica	102	Linda-a-Velha	112	Odivelas
93	Almada	103	Évora Monte	113	Montelevar-Pêro Pinheiro
94	Vendas Novas	104	Lisboa	114	Santo Estevão
95	S. Bento do Mato	105	Alcochete	115	Estremoz
96	Moita	106	Queluz	116	Terrugem
97	Oeiras	107	Sintra	117	Elvas
98	Cascais	108	Vila Viçosa	118	Caia-Badajoz
99	Montijo	109	Sacavém	119	Póvoa de Santa Iria
100	Atalaia	110	Vimieiro	120	Loures
121	Sousel	131	Carregado	141	Carmões
122	Benavente	132	Monforte	142	Torres Vedras
123	Malveira	133	Sobral de Monte Agraço	143	Arronches
124	Mora	134	Salvaterra de Magos	144	Ouguela
125	Mafra	135	Fronteira	145	Cartaxo
126	Vila Franca de Xira	136	Maranhão	146	Alcoentre
127	Coruche	137	Montargil	147	Almeirim
128	Benavente-Salvaterra	138	Alenquer	148	Vale de Santarém
129	Santa Eulália	139	Azambuja	149	Cercal
130	Campo Maior	140	Silveira	150	Cadaval
151	Ponte de Sôr	161	Chamusca	171	Gavião
152	Santarém	162	Marvão	172	Abrantes
153	Lourinhã	163	Peniche	173	Constância
154	Alpiarça	164	Óbidos	174	Torres Novas
155	Bombarral	165	Golegã	175	Alfeizerão
156	São João da Ribeira	166	Castelo de Vide	176	Sardoal
157	Crato	167	Alpalhão	177	Nisa
158	Portalegre	168	Caldas da Rainha	178	Asseiceira
159	A-dos-Ruivos	169	Vila Nova da Barquinha	179	Mação
160	Rio Maior	170	Entroncamento	180	Alcobaça
181	Porto de Mós	191	Casais	201	Leiria
182	Tomar	192	Vila Nova de Ourém	202	Sertã
183	Fátima	193	Batalha	203	Castelo
184	Amêndoa	194	Cardigas	204	Segura
185	Batalha	195	São João do Peso-Cardigos	205	Castelo Branco
186	Calvaria de Cima	196	Malpica do Tejo	206	Zebreira
187	Nazaré	197	Arrabal	207	Escalos de Baixo
188	Vila Velha de Rodão	198	Proença-a-Nova	208	Pombal
189	Vila de Rei	199	Marinha Grande - S. Pedro Muel	209	Carvide
190	Amêndoa	200	Marinha Grande	210	Ancião
211	Escalos do Meio	221	Pessegueiro	231	Penacova
212	Castanheira de Pêra	222	Lousã	232	Carapinha
213	Portela do Fojo	223	Condeixa-a-Nova	233	Teixeira
214	Marinha	224	Fundão	234	Lourosa
215	Espinho-Penela	225	Góis	235	Covilhã
216	Orvalho	226	Figueira da Foz	236	Nogueira de Cravo

217	Soure	227	Montemor-o-Velho	237	Cantanhede
218	Tapéus	228	Poiares	238	Sandomil
219	São Miguel de Ancha	229	Arganil	239	Pampilhosa
220	Pampilhosa da Serra	230	Coimbra	240	Sabugal
241	Mealhada	251	Trinta	261	Besteiros
242	Santa Comba da Dão	252	Gouveia	262	Sabugosa
243	Mira	253	Aldeia do Bispo	263	Mangualde
244	Mortágua	254	Vinho	264	Águeda
245	Belmonte	255	Nelas	265	Ílhavo
246	Belmonte	256	Oliveira do Bairro	266	Tavares
247	Aldeia da Ponte	257	Tondela	267	Vilar Formoso
248	Seia	258	Guarda	268	Fornos de Algodres
249	Anadia	259	Vila Cortês da Serra	269	Celorico da Beira
250	Carregal do Sal	260	Vagos	270	Aveiro
271	Viseu	281	Sátão	291	Sequeiros-sernancelhe
272	Penalva do Castelo	282	Trancoso	292	S. João da Madeira
273	Angeja	283	Rio de Mel	293	Arouca
274	Bodiosa	284	Oliveira de Azeméis	294	Fiões
275	Albergaria-a-Velha	285	Vale de Cambra	295	Moimenta da Beira
276	Cavernões	286	Vila Nova de Paiva	296	Sarzeda
277	Pinhel	287	Aguiar da Beira	297	Espinho
278	Vouzela	288	Ovar	298	Espiunca
279	S. Pedro do Sul	289	Castro Daire	299	Passõ
280	Estarreja	290	Figueira de Castelo Rodrigo	300	Penedono
301	Gouviães	311	Armamar	321	Fornos
302	Várzea da Serra	312	Horta	322	Valongo
303	Raiva-canelas	313	Ancede	323	Santa Marta de Penaguião
304	Castelo de Paiva	314	Vila Nova de Gaia	324	S. Mamede de Infesta
305	Rio Mau-Lomba	315	Gondomar	325	Marco de Canavezes
306	Vila Nova de Foz Côa	316	Canidelo	326	Penafiel
307	Torrão	317	S. João da Pisqueira	327	Torre de Moncorvo
308	Cinfães	318	Peso da Régua	328	Leça do Bailio
309	Lamego	319	Porto	329	Rio Tinto
310	Resende	320	Matosinhos	330	Riba Longa
331	Meinedo	341	Lousada	351	Felgueiras
332	Ermesinde	342	Vila Flor	352	Trindade
333	Reguenga	343	Lixa	353	Celorico de Basto
334	Mindelo	344	Trofa-Bougado	354	Sendim
335	Alvarelhos	345	Vila do Conde	355	Murça
336	Paços de Ferreira	346	Mogadouro	356	Famalicão
337	Sampaio	347	Santo Tirso	357	Guimarães-Fafe
338	Alijó	348	Vizela	358	Guimarães
339	Vila Real	349	Mogadouro-Santiago	359	Fafe
340	Amarante	350	Póvoa de Varzim	360	Peredo
361	Cabeceiras de Basto	371	Macedo de Cavaleiros	381	Ponte de Lima
362	Mirandela	372	Vimioso	382	Seara
363	Miranda do Douro	373	Vila Verde	383	Petisqueira
364	Vila Pouca de Aguiar	374	Neiva	384	Quintanilha
365	Barcelos	375	Valpaços	385	Bragança
366	Ribeira de Pena	376	Vale de Gouvinhas	386	Ponte da Barca
367	Esposende	377	Viana do Castelo	387	Lindoso
368	Campo de Víboras	378	Rebordelo-Sonim	388	Cerveira-Valença
369	Braga	379	Terras de Bouro	389	Monção
370	Póvoa do Lanhoso	380	Chaves	390	Melgaço

Após a criação da Junta Autónoma de Estradas em 1927, por parte do Ministério das Obras Públicas, à altura sob a tutela do Engº Duarte Pacheco, as estradas passam a assumir papel mais relevante na organização do desenvolvimento económico do País e sucedem ao caminho-de-ferro (que tinha tido esse papel na segunda metade do século XIX), na expressão estruturante do ordenamento do território (Abreu, 2006; Santa-Rita, 2006).

Como testemunho dessa preocupação política, o Plano rodoviário de 1945 constituiu o reflexo legal da necessidade de se planear o transporte rodoviário com um certo sentido de equilíbrio territorial, embora sem ter por base qualquer tipo de modelo de ordenamento territorial (Abreu, 2006:347). Segundo Silveira, a preocupação política de então era sobretudo a de tentar garantir que a construção, reconstrução e melhoramento das estradas contribuíssem para combater o desemprego rural e desenvolver a economia, com prioritária incidência nas estradas do Litoral e a Sul do Tejo, por serem as que se encontravam mais (Silveira, 1994:31).

Numa primeira apreciação, mesmo sem se recorrer a qualquer análise quantitativa, é notório o incremento da complexidade da rede de estradas que se verifica de uma forma generalizada por todo o País. E é precisamente nestas circunstâncias, quando a complexidade da rede é maior, que o uso das medidas topológicas e espaciais assumem uma acrescida importância, sendo mesmo indispensáveis para uma análise rigorosa das características da rede e da sua evolução sobre o território, quer para avaliar e identificar os lugares dominantes e mais competitivos, quer para apontar tendências evolutivas.

Os valores obtidos pelas medidas topológicas (Figura 39) mostram que a dimensão e a conectividade da rede sofreram um incremento face aos da rede de Itinerários de 1800, facto que decorre obviamente do aumento do número de nós, da maior densidade de arcos (com várias alternativas para ligarem os nós), mas também e sobretudo da estrutura da rede, ou seja da forma como os nós estão ligados e entre eles se relacionam, isto é, da organização espacial e da coesão e conectividade da rede.

Segundo o mais representativo indicador de conectividade (o índice gama (γ)), a rede de estradas do Plano rodoviário de 1945 é uma rede em malha, que passou de um índice de 53% para 58%, aproximando-se mais do valor de inflexão a partir do qual a rede assume uma conectividade quase máxima (γ = 66%), ou seja, uma rede coesa e num estado muito evoluído de maturação, com vários circuitos a assegurarem a comunicação entre os lugares.

Comparativamente às redes analisadas anteriormente (a rede de Estradas Romanas e a Rede de Intinerários do pré-fontismo de 1800), a rede de Estradas de 1945 apresenta um grau de conectividade da rede, que segundo o índice gama (γ) passa de 35%, da primeira para 53% em 1800 e 58% agora, face à conectividade máxima. Este aumento de conectividade é ainda reforçado pelo índice alfa (α), que mostra já uma relativa maturação da rede, como o valor obtido (α=0,36), muito superior ao verificado para as outras redes, sugere.

Ainda relativamente às medidas topológicas é de destacar o valor resultante do índice de dispersão total da rede (Figura 39) muito acima dos verificados das redes anteriores, o que indica o maior desenvolvimento e complexidade da rede de Estradas de 1945.

Quanto à análise interna da rede, as medidas de acessibilidade e centralidade também mostram significativas transformações na organização territorial, com reflexo no que respeita aos lugares mais acessíveis e dos mais periféricos e menos acessíveis.

A leitura do grafo da rede do Plano rodoviário de 1945, de acordo com os resultados obtidos a partir da matriz D (Shimbel) (Tabela 14; Figura 40), mostra que os 20 lugares menos acessíveis identificados pela matriz C^1 (cf. Anexo) não se repetem agora no grupo dos 20 lugares menos acessíveis segundo a matriz D. Tal constatação verifica-se também com os aglomerados mais acessíveis (cf. Anexo), com Vila Verde e Porto a ocuparem agora o lugar 360 e 262 da ordenação da rede de lugares, respectivamente. Daqui se pode aferir, que à medida que a complexidade e o grau de conectividade e de coesão da rede aumenta, também a importância das ligações indirectas entre os nós é mais relevante para a determinação da ordem e organização espacial

TABELA 14 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE D DA REDE DE ESTRADAS DO PLANO RODOVIÁRIO DE 1945

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Sertã**	**3787**
2	Orvalho	3851
3	Vila de Rei	3863
4	Sardoal	3884
5	Vila Velha de Ródão	3887
6	Ancião	3888
7	Castelo Branco	3889
8	Casais	3891
9	Abrantes	3893
10	Fundão	3895
11	Tomar	3919
12	Nisa	3920
13	Castelo	3932
14	Alpalhão	3933
15	Asseiceira	3940
16	Torres Novas	3950
17	Ponte de Sôr	3958
18	Proença-a-Nova	3960
19	Gavião	3962
20	Covilhã	3971
370	Ponte de Lima	6925
371	Portimão	6962
372	Ponte da Barca	7030
373	Terras de Bouro	7040
374	Sagres	7083

375	Esposende	7099
376	Seara	7186
377	Neiva	7188
378	Loulé	7200
379	Tunes-Guia	7213
380	S. Brás de Alportel	7216
381	Olhão	7277
382	Cerveira-Valença	7306
383	Albufeira	7323
384	Monção	7411
385	Melgaço	7415
386	Lindoso	7418
387	Viana do Castelo	7565
388	Quarteira	7572
389	Almansil	7584
390	**Faro**	**7600**
289	**Lisboa**	**5873**

FIGURA 40 GRAFO DO PLANO RODOVIÁRIO DE PORTUGAL CONTINENTAL EM 1945 COM IDENTIFICAÇÃO DO GRUPO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS E MENOS ACESSÍVEIS, CALCULADOS A PARTIR DA MATRIZ D

Graças à capacidade de visualização e manuseamento de informação geográfica facultada pelos SIG, é fácil identificar e localizar quais os lugares menos acessíveis (e consequentemente, mais periféricos) que, segundo a matriz D, são os lugares localizados geometricamente no centro do território, formando um grupo mais ou menos elipsoidal no Interior do país, o que se deve à existência de uma maior densidade de cobertura[105] da rede de estradas (leia-se itinerários) no território.

Relativamente ao grupo dos lugares menos acessíveis e que compõem a periferia da rede, segundo a matriz D, existe claramente uma dualidade Norte – Sul, tal como se tinha observado para o sistema de lugares analisado numa matriz relativa à Rede de Itinerários de 1800. O Norte volta a ser território do grupo do Alto Minho (Monção, Melgaço, Ponte de Lima, Ponte da Barca, Viana do Castelo, Terras de Bouro e Esposende); e o Sul, apesar de nem todos os lugares permanecerem, é também novamente território para o grupo de alguns lugares menos acessíveis (e.g. Portimão, Sagres, Faro) a que, agora em 1945, se juntam também Loulé, Quarteira, Albufeira, S. Brás de Alportel, Olhão e Tunes.

Prosseguindo na mesma linha metodológica já apresentada, inicia-se agora a análise das características da rede, evidenciado pelos valores das medidas de distribuição espacial.

O lugar mais central desta rede, determinado a partir do grafo é agora, Vila de Rei[106,] o que significa um deslocamento ligeiro, para o interior (Figura 41). Pelo contrário, e também no que concerne a transformação espacial ocorrida, destaque-se a deslocação para norte e para o litoral do nó mais central do sistema de cidades para Coimbra, a substituir Castelo Branco.

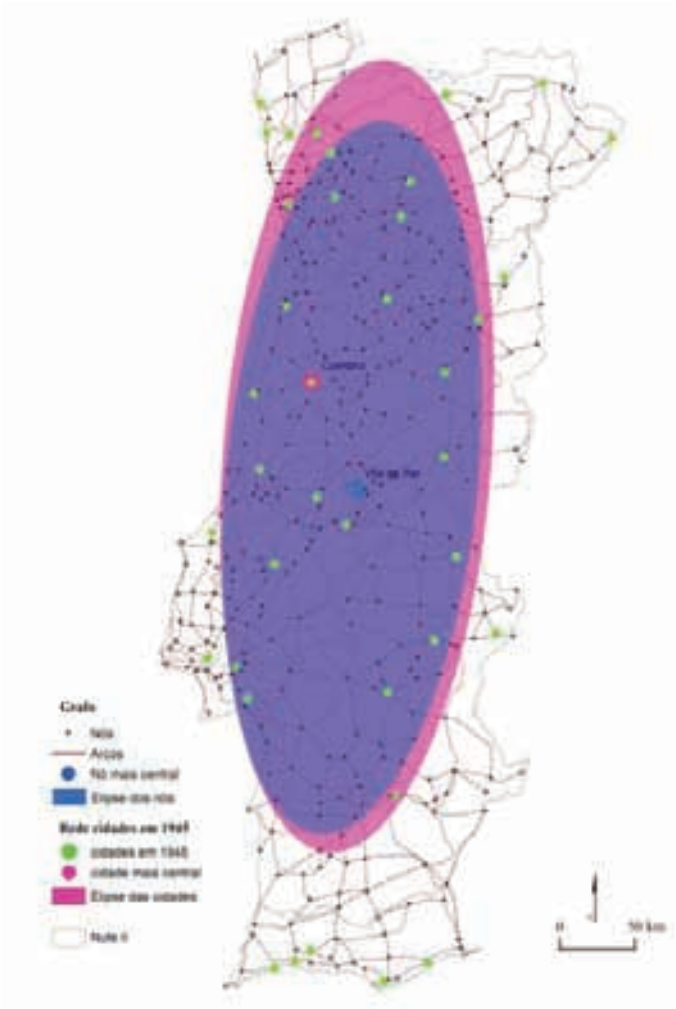
Na realidade, se o centro muda bastante (quase 80 km), as elipses são quase coincidentes. A Norte, a elipse de distribuição espacial das cidades estende-se até à fronteira, atravessando o Gerês (Lindoso e as terras baixas do Rio Cavado), enquanto a elipse dos nós do grafo se fica por Terras de Basto e menos expandida a Sul. No eixo menor, no sentido litoral e interior, as elipses evidenciam uma quase sobreposição, ainda que face ao verificado para a rede de 1800, se observe agora uma maior cobertura do litoral.

Em síntese, o que as medidas topológicas e as métricas territoriais revelam é um País com uma rede de estradas coesa e com um forte grau de conectividade, o que denota uma hierarquia da rede de lugares bastante equilibrada no geral. Tais resultados, vêm sublinhar a afirmação que Abreu faz acerca da importância desta rede rodoviária de 1945: "Neste período são as estradas (…) que organizam o desenvolvimento económico e que constituem a expressão estruturante do ordenamento do território nacional." (Abreu, 2005:347).

105 É o quociente entre o somatório de todos os arcos (L^i) e a área total (A) do País.

106 Em 1800 era Abrantes, o lugar mais acessível, segundo o grafo da rede de Itinerários.

FIGURA 41 GRAFO COM O SISTEMA DE REDE DE CIDADES EXISTENTE EM 1945, E AS MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL.



A partir da segunda metade do século XX, a motorização confirma um crescimento incessante, originando uma população cada vez mais móvel, na consequência de um forte aumento do parque automóvel[107]. Estes acontecimentos são mais vincados a

107 "Nos trinta anos que medeiam entre 1970 e 2000 verificou-se um fortíssimo aumento do parque automóvel em Portugal, que, crescendo a uma taxa anual média próxima de 7,8%, viu duplicar o seu número a cada nove anos" (Abreu, 2005:351). Note-se que acerca destes valores, o autor faz menção de alertar para o facto de ter de haver algum cuidado na sua avaliação, já que "alguns veículos matriculados já não existem, pois as viaturas deixaram de circular ou foram destruídas, sem que os proprietários tenham efectuado o respectivo abate, devido à falta de obrigatoriedade em o fazer e à inexistência de incentivos para tal" (Abreu, 2005:351).

partir da década de 1970, por altura em que um outro acontecimento marcante para o desenvolvimento das infra-estruturas rodoviárias de transporte se inicia: a influência da política de transporte europeia. Com efeito, em 1969, já com um mercado europeu reconhecível, a política comunitária de transportes começa a assumir maior protagonismo a nível de uma política económica (Silveira, 1994:35).

O pedido de adesão, que em 1985 Portugal apresenta à C.E.E. (Comunidade Económica Europeia e actual União Europeia) teve como consequências a melhoria das acessibilidades internas e externas. oi neste contexto, que em 1978 se iniciaram os processos de revisão do Plano Rodoviário de 1945, que por sua vez se concluíram com a aprovação do Decreto-lei nº380/85 que consagra o segundo Plano Rodoviário Nacional (PRN), e que constitui o próximo objecto de análise deste trabalho. Assim sendo, a estrutura da rede de estradas do PRN85 considerada pode visualizar-se a partir da figura do grafo seguinte:

FIGURA 42 GRAFO DO PLANO RODOVIÁRIO DE PORTUGAL CONTINENTAL EM 1985[108].

REDE DE ESTRADAS DO PLANO RODOVIÁRIO DE 1945

Medidas Topológicas
Arcos = 220
Nós = 181
SubGrafo = 1

Índice gama (γ) = 0.41
Índice alfa (α) = 0.11
Índice de coesão (Cst) = 73.22
Índice do grau de desenv. (Gp) = 106.68
Índice dispersão = 272136

Diâmetro da rede = 35
Índice acessibilidade (D)
D_{max} = 1460 (Leiria)
D_{min} = 3478 (Castro Marim)

108 Base cartográfica extraída do Decreto-Lei 380/85, de 26 de Setembro de 1985.

Em que:

1	Faro	11	Ourique	21	Grândola
2	Olhão	12	Castro Verde	22	Vidigueira
3	Loulé	13	Serpa	23	Portel
4	Lagos	14	Vila Verde de Ficalho	24	Alcácer do Sal
5	São Brás de Alportel	15	Sines	25	Setúbal
6	Tavira	16	Beja	26	Évora
7	Albufeira	17	Santiago do Cacém	27	Landeira-Marateca
8	Castro Marim	18	Ferreira do Alentejo	28	Montemor-o-Novo
9	Aljezur	19	Canal Caveira	29	Almada
10	Odemira	20	Cuba	30	Barreiro
31	Montijo	41	Estremoz	51	Benavente
32	Lisboa	42	Elvas	52	Sobral de Monte Agraço
33	Arraiolos	43	Loures	53	Salvaterra de Magos
34	Cascais	44	Caia	54	Monforte
35	Oeiras	45	Alverca	55	Alenquer
36	Canha	46	Samora Correia	56	Azambuja
37	Alcochete	47	Alhandra	57	Torres Vedras
38	Vila Viçosa	48	Mora	58	Cartaxo
39	Borba	49	Coruche	59	Alter do Chão
40	Santo Estevão	50	Vila Franca de Xira	60	Almeirim
61	Ponte de Sôr	71	Óbidos	81	Vila Flor
62	Santarém	72	Caldas da Rainha	82	Tomar
63	Alpiarça	73	Golegã	83	Nazaré
64	Bombarral	74	Entroncamento	84	Porto de Mós
65	Crato	75	Nisa	85	Fátima
66	Portalegre	76	Abrantes	86	Vila Nova de Ourém
67	Rio Maior	77	Alcanena	87	Batalha
68	Chamusca	78	Torres Novas	88	Ferreira do Zêzere
69	Marvão	79	Mação	89	Vila Velha de Rodão
70	Peniche	80	Alcobaça	90	Proença-a-Nova
91	Leiria	101	Pedrógrão Grande	111	Arganil
92	Marinha Grande	102	Pombal	112	Penacova
93	Sertã	103	Penela	113	Oliveira do Hospital
94	Castelo Branco	104	Carriço	114	Cantanhede
95	Segura	105	Condeixa	115	Belmonte
96	Alvaiázere	106	Fundão	116	Tábua
97	Idanha-a-Nova	107	Figueira da Foz	117	Mealhada
98	Figueiró dos Vinhos	108	Montemor-o-Velho	118	Santa Comba Dão
99	Ansião	109	Coimbra	119	Seia
100	Avelar	110	Covilhã	120	Mira
121	Tondela	131	Gafanha da Nazaré	141	São Pedro do Sul
122	Guarda	132	Celorico da Beira	142	Vale de Cambra
123	Nelas	133	Viseu	143	Ovar
124	Vagos	134	Aveiro	144	Castro Daire
125	Oliveira do Bairo	135	Albergaria-a-Velha	145	São João da Madeira
126	Águeda	136	Sever do Vouga	146	Sernancelhe
127	Ílhavo	137	Oliveira de Frades	147	Santa Maria da Feira

128	Mangualde	138	Gouveia	148	Espinho
129	Vilar Formoso	139	Trancoso	149	Vila Nova de Foz Côa
130	Fornos de Algodres	140	Estarreja	150	Lamego
151	Gaia	161	Alfândega da Fé	171	Macedo de Cavaleiros
152	Peso da Régua	162	Felgueiras	172	Esposende
153	Matosinhos-Porto	163	Póvoa de Varzim	173	Braga
154	Torre de Moncorvo	164	Famalicão	174	Macedo de Cavaleiros
155	Valongo	165	Murça	175	Viana do Castelo
156	Penafiel	166	Guimarães	176	Chaves
157	Sta. Marta de Penaguião	167	Fafe	177	Vila Verde da Raia
158	Amarante	168	Mirandela	178	Bragança
159	Vila Real	169	Vila Pouca de Aguiar	179	Caminha
16	Vila do Conde	170	Ribeira de Pena	180	Vila Nova de Cerveira

Numa primeira e imediata impressão feita ao grafo da Rede de Estradas do Plano Rodoviário Nacional de 1985 (PRN85), o que se verifica é uma alteração na estrutura da rede, revelada pelas densidades e.g. densidade de arcos (D_L), densidade de nós (D_N) e densidade da rede (D_R). Formalmente:

$$D_L = \frac{L}{A} \quad , \qquad D_N = \frac{N}{A} \quad , \qquad D_R = \frac{L}{N}$$

Em que L respeita ao número de arcos; A respeita à Área (km^2) em estudo e R, respeita à rede (grafo).

Com efeito, no caso das densidades de arcos e de nós, constata-se uma diminuição de valores: D_L passa de 0,0076, em 1945 para 0,0025 em 1985 e D_N passa de 0,0044 em 1945, para 0,0020 em 1985. Esta diminuição das densidades é uma consequência directa da diminuição do número de arcos e do número de nós. Contudo, ao olhar-se para os valores da densidade da rede D_R , em que a relação entre o número de arcos e o número de nós é o mais importante, e a dimensão da área é desprezível, verifica-se uma ligeira diminuição: D_R passa de 1,7, em 1945 para 1,2 em 1985. Isto significa que, apesar da diminuição acentuada do número de nós e do número de arcos entre as datas em análise, e uma ligeira diminuição da densidade da rede, a rede mantém uma elevada conectividade. Em suma, a rede melhora, mesmo quando a estrutura base de nós diminui bastante. Tal facto é consequência directa de uma nova orientação política, que se materializa na desafectação de algumas vias, do poder Central para o Local. Apontado como um dos motivos à revisão do PR45, a gestão centralizada de tamanha densidade de estradas deixou de fazer sentido num País que passa a adoptar uma "…política de regionalização, que confere às autarquias um cada vez maior grau de autonomia" (Decreto-Lei nº380/85 de 26 de Setembro).

Assim, em consonância com o critério original assumido para a selecção e aquisição de informação rodoviária, permaneceu a escolha pelos itinerários principais, que a classificação das vias, definida pelos decretos-lei que consagravam juridicamente as comunicações rodoviárias nacionais, determinou as estradas que integram o modelo criado.

Para o PRN85, as estradas classificadas como Rede Fundamental (constituída pelos Itinerários Principais) e também a Rede complementar[109] (Itinerários Complementares) foram as seleccionadas. Esta decisão, apesar de não tirar rigor ao estudo, vai influir nos resultados e consequentemente, na análise comparativa, quer para as medidas topológicas, quer para as medidas de distribuição espacial, uma vez que afecta o número de arcos e nós.

Com efeito, é na consequência da política de desafectação de estradas, que o número de arcos e de nós diminuiu significativamente face ao PR45 (passou de 671 arcos e 390 nós, para 220 arcos e 180 nós). Não obstante, a estrutura da rede não sofreu significativas alterações, como é indicado pelas medidas topológicas de conectividade e de ligação (Figura 42).

Se é verdade que o índice gama (γ) teve um decréscimo de 17%, ao passar dos 58% para 41% face à conectividade máxima, o que dá conta de uma perca de coesão da rede, quando analisado conjuntamente com o diâmetro da rede (37 para PR45 e 35 para PRN85) e os índices de coesão (*Cst* = 113.04, para PR45 e *Cst* = 73.22, para PRN85) e do grau de desenvolvimento (Gp = 334.42, para PR45 Gp = 108.68, para PRN85), os resultados reflectem o contrário (cf. Cap. 2.3.1), i.e. um ganho de coesão (ainda que ligeiro), apesar da diminuição da densidade da rede.

Em suma, tem-se uma rede com uma estrutura coesa, de que se adivinha (e só se pode confirmar pela análise individual obtida a partir do cálculo de matrizes) a existência de algum desequilíbrio espacial e topológico, quanto à conectividade e acessibilidade dos nós, e um país com uma política rodoviária orientada para "…o desenvolvimento de potencialidades regionais…" (Decreto Lei 380/85 de 26 de Setembro).

Todavia, para se averiguar esta transformação de índole política sofrida pela rede rodoviária e qual o seu impacto na organização territorial, é preciso completar a análise recorrendo aos resultados das medidas topológicas de acessibilidade e centralidade, as quais concedem uma leitura interna e individualizada da rede.

Apesar das transformações da rede ditada por uma política de desenvolvimento apoiada no sistema rodoviário como alavanca, no que respeita à organização espacial do sistema de lugares, as evoluções ocorridas, vistas pelo prisma da matriz de ligações directas C^1, não sofrem praticamente nenhumas alterações de estrutura topológica (cf. Anexo). Todavia, conforme atrás referido (cap. 2), é a matriz D que melhor permite aferir acerca da acessibilidade dos nós que compõem a rede, bem como a que maior rigor empresta à análise comparativa das redes.

Assim, da análise aos resultados obtidos a partir da matriz D, capaz de incorporar as ligações indirectas e, simultaneamente, eliminar as redundâncias, o que se verifica não é a continuidade que a análise da matriz C^1 sugeria. Pelo contrário, e conforme se pode observar a partir da tabela 15, dos 20 mais acessíveis lugares segundo a

109 As estradas classificadas como "Outras estradas", no Decreto Lei nº380/85 de 26 de Setembro, não foram consideradas, por coerência de critérios com as outras redes em análise.

matriz C^1, apenas 5 se repetem entre os 20 mais acessíveis de acordo com a matriz D (que são Leiria, Pombal, Coimbra, Santarém e Rio Maior), e mesmos estes com posições diferentes na hierarquia da rede. Destas mudanças topológicas decorrem tam-

TABELA 15 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE D DA REDE DE ESTRADAS DO PLANO RODOVIÁRIO NACIONAL DE 1985

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Leiria**	**1460**
2	Pombal	1471
3	Condeixa	1492
4	Fátima	1499
5	Alcanena	1502
6	Coimbra	1509
7	Santarém	1534
8	Batalha	1544
9	Carriço	1546
10	Figueira da Foz	1570
11	Porto de Mós	1574
12	Penacova	1579
13	Rio Maior	1583
14	Montemor-o-Velho	1593
15	Vila Nova de Ourém	1598
16	Almeirim	1602
17	Marinha Grande	1614
18	Torres Novas	1616
19	Ansião	1620
20	Cantanhede	1629
160	Mirandela	2638
161	Fafe	2646
162	Chaves	2655
163	Macedo de Cavaleiros	2687
164	Braga	2696
165	Póvoa de Varzim	2701
166	Loulé	2780
167	Odemira	2789
168	Vila Verde da Raia	2833
169	Bragança	2865
170	Esposende	2873
171	Faro	2950
172	Aljezur	2965
173	Viana do Castelo	3047
174	Olhão	3124
175	São Brás de Alportel	3128
176	Lagos	3143
177	Caminha	3223
178	Tavira	3300
179	Vila Nova de Cerveira	3401
180	**Castro Marim**	**3478**
130	**Lisboa**	**2284**

bém alterações nos padrões espaciais, com diferentes organizações a desenharem-se no território, conforme se pode verificar pelos grafos das figuras 43, derivadas do cálculo da matriz D.

FIGURA 43 GRAFO DO PLANO RODOVIÁRIO DE PORTUGAL CONTINENTAL EM 1985, COM IDENTIFICAÇÃO DO *GRUPO* DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS E MENOS ACESSÍVEIS, CALCULADOS A PARTIR DA MATRIZ D

Efectivamente, enquanto os resultados da matriz C^1 reflectiam uma dispersão dos nós mais acessíveis pelo território (cf. Anexo), os resultados da matriz D revelam uma situação em que se verifica uma concentração espacial do grupo dos nós mais acessíveis (Figura 43). De igual modo, confrontando-se os mapas do PRN85 (Figura 43) com os do PR45 (Figura 40), verifica-se um deslocamento espacial do grupo dos nós mais acessíveis para o litoral, que se traduz pela maior acessibilidade que agora têm os lugares de Leiria, Fátima, Alcanena, Batalha, Pombal e Rio Maior.

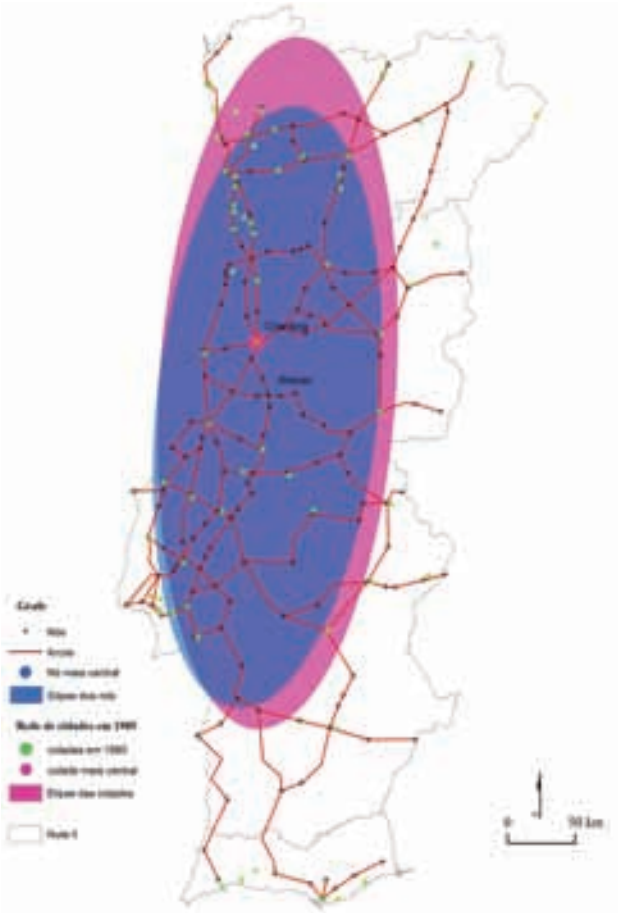
Situação idêntica passa-se com os nós menos acessíveis. Face aos resultados da matriz C^1, não só a topologia difere, como também o padrão espacial se altera, passando-se do padrão 'dispersão' de nós pelo território, para uma maior concentração dos lugares periféricos, acentuando a diferenciação espacial.

Quanto à análise comparativa com os resultados obtidos pela matriz D, do PR45, as semelhanças espaciais sobrelevam às diferenças pontuais, com a substituição de uns nós por outros, na hierarquia da rede de lugares. Os grupos do Alto Minho e do Algarve

continuam, ainda que com ligeiras alterações, quer na hierarquia dos lugares, quer na distribuição espacial. A norte, o grupo dos lugares menos acessíveis para o PRN85 sofre uma deslocação para este, ao englobar também lugares dos Distritos de Vila Real e de Bragança. A sul, as mudanças espaciais são insignificantes, permanecendo no grupo dos menos acessíveis um conjunto de lugares, que vai do Barlavento ao Sotavento Algarvio.

O modelo territorial que a rede evidencia, reproduz, como seria natural, o modelo territorial existente. Não obstante o significativo decréscimo do número de nós e de arcos do grafo do PRN85 face ao grafo do PR45, ou seja, independentemente de a topologia variar, sobretudo no que respeita à sua estrutura, as relações espaciais entre os lugares e as estradas permanece praticamente inalterável, conforme testemunham a quase sobreposição das elipses de tendência, para ambos os períodos analisados (cf. Figuras 41 e 44).

FIGURA 44 GRAFO COM O SISTEMA DE REDE DE CIDADES EXISTENTE EM 1985, E AS MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL



Todavia, algumas transformações, ocorreram nos 40 anos entre os Planos, a saber:

- A mudança do nó mais central, pelo cálculo das medidas de distribuição espacial, de Vila de Rei em 1945, para Ansião em 1985, facto que traduz uma tendência de aproximação da rede de estradas à rede de cidades, ao aproximar-se de Coimbra, que permanece como a cidade mais central, do conjunto de cidades existentes à data. O que traduz uma diminuição da distância entre nós centrais da rede de estradas e da rede de cidades entre 1945 e 1985. Mais precisamente uma diminuição de cerca de 36km, face aos 75km que distam Vila de Rei de Coimbra, em 1945 e os 39km calculados para Ansião e Coimbra, em 1985.
- Um movimento de aproximação dos nós da rede de estradas para junto do litoral, resultado da política de planeamento do PRN85.
- Menos evidente, no processo de transformações ocorridas, é o ligeiro deslocamento das elipses para norte. A deslocação mais evidente na elipse das cidades existentes à data é contudo muito pouco sentida na elipse do grafo.
- Verifica-se ainda, e mais uma vez com destaque para a elipse das cidades, uma deslocação para o litoral.

No cômputo geral, o que se constata é a constância do padrão organizativo da geografia da rede, que tem como reflexo directo a manutenção de uma certa ordem espacial, com os nós da rede a sofrerem apenas ligeiras mudanças, enquanto a rede de cidades existentes evidencia uma "…permanência histórico-geográfica…" (Gaspar e Rodriguez, 2006:64), conforme testemunha o resultado obtido pela medida de centralidade para os vários períodos em análise, com Coimbra a permanecer como o lugar central da rede de cidades.

Apenas 10 anos após a instituição do PRN85, o governo considerou necessário proceder à sua revisão, tendo em consideração os desenvolvimentos socioeconómicos decorrentes da adesão de Portugal à União Europeia (Decreto-Lei nº 222/98:3444). Sobre este assunto, Diogo de Abreu escreve: "O PRN de 2000 tomou em conta que as melhorias na rede (…) e as novas procuras de transporte de pessoas e mercadorias induzidas pelo desenvolvimento do país, que tinham como consequência a duplicação de tráfego entre 1985 e 1995, evidenciavam estrangulamentos e deficiências que importava agora melhorar". (Abreu:2005:348).

Neste enquadramento político e técnico, o governo justificou a revisão do PRN85, apontando objectivos que se podem considerar nos seguintes tópicos:

- Territoriais (uma melhor cobertura rodoviária do País, quer a nível nacional, quer a nível regional);
- Económicos (desenvolvimento das potencialidades regionais e redução do custo global dos transportes);
- Sociais (aumento da segurança rodoviária);
- Socioeconómicos (correcção das assimetrias no desenvolvimento socioeconómico do País) e ambientais (imposição da realização de estudos de impacto ambiental

aquando do projecto para construção de novas estradas), com vista a minorar as consequências negativas destas infra-estruturas

É na sequência das revisões propostas que foi instituído o PRN2000, com base no Decreto-lei nº 222/98 de 17 de Julho. Que é também a versão que se considerou para análise.

Segundo o PRN2000, a rede rodoviária nacional é agora constituída pela rede nacional fundamental e pela nacional complementar. Sendo que a rede nacional fundamental contempla os itinerários principais (IP)[110] e a rede complementar integra os itinerários complementares (IC)[111] e as estradas nacionais (EN). Para o trabalho, e de acordo com os critérios assumidos, apenas se considerou os itinerários principais e os itinerários complementares.

FIGURA 45 GRAFO DO PLANO RODOVIÁRIO DE PORTUGAL CONTINENTAL EM 2000[12].

REDE DE ESTRADAS DO PLANO RODOVIÁRIO NACIONAL 2000

Medidas Topológicas
A = 263
N = 175
G = 1

Índice gama (γ) = 0.51
Índice alfa (α) = 0.26
Índice de coesão (Cst) = 57.89
Índice do grau desenv. (Gp) = 130.33
Índice dispersão = 308592

Diâmetro da rede = 26
Índice acessibilidade (D)
D_{max} = 1238 (Coimbra)
D_{min} = 2603 (Valença)

110 "Os itinerários principais são as vias de comunicação de maior interesse nacional, servem de base de apoio a toda a rede rodoviária nacional e asseguram a ligação entre os centros urbanos com influência supradistrital e destes com os principais portos, aeroportos e fronteiras." (Decreto-Lei nº 222/98:3445).

111 "Os itinerários complementares são as vias que, no contexto do plano rodoviário nacional, estabelecem as ligações de maior interesse regional, bem como as principais vias envolventes e de acesso nas áreas metropolitanas de Lisboa e Porto." (Decreto-Lei nº 222/98:3445).

112 Base cartográfica extraída do Decreto Lei 222/98, de 17de Julho.

Em que:

1	Faro	11	Serpa	21	Qta. do Anjo
2	Loulé	12	Sines	22	Évora
3	Albufeira	13	Vila Verde Ficalho	23	Qta. do Conde
4	Vila do Bispo	14	Santiago de Cacém	24	Marateca
5	Tavira	15	Beja	25	Coina
6	Lagoa - Silves	16	Grândola - Ferreira do Alentejo	26	Seixal
7	Portimão	17	Grândola	27	Vendas Novas
8	Vila Real Sto António - Castro Marim	18	Alcácer do Sal	28	Palhais
9	Ourique	19	Setúbal	29	Costa da Caparica
10	Castro Verde - Beja	20	Palmela	30	Montemor-o-Novo
31	Almada	41	Sacavém	51	Coruche
32	Barreiro	42	Odivelas	52	Alhandra
33	Oeiras	43	Estremoz	53	Vila Franca Xira
34	Montijo	44	Ramada	54	Torres Vedras
35	Linda-a-Velha - Algés	45	Póvoa-Sta. Iria	55	Almeirim
36	Lisboa	46	Sto. Estevão	56	Cartaxo
37	Amadora	47	Loures	57	Ponte de Sôr
38	Queluz	48	Caia	58	Santarém
39	Agualva - Cacém	49	Elvas	59	Portalegre
40	Sintra	50	Alverca	60	Rio Maior
61	Peniche	71	Tomar	81	Pombal
62	Óbidos	72	Vila Nova de Ourém	82	Monfortinho
63	Torres Novas	73	Fátima	83	Carriço
64	Entroncamento	74	Batalha	84	Fundão
65	Barquinha	75	Vila Velha de Rodão	85	Condeixa
66	Abrantes	76	Marinha Grande	86	Figueira da Foz
67	Alcobaça	77	Leiria	87	Coimbra
68	Barragem do Fratel	78	Castelo Branco	88	Covilhã
69	Alcobaça - Nazaré	79	Ansião	89	Coimbra - Mealhada
70	Nazaré	80	Idanha-a-Nova	90	Oliveira do Hospital
91	Penacova	101	Águeda	111	Albergaria-a-Velha
92	Sta. Comba Dão	102	Guarda	112	Trancoso
93	Mealhada	103	Vagos - Ílhavo	113	Estarreja
94	Mira	104	Vilar Formoso	114	Oliveira de Azeméis
95	Seia	105	Mangualde	115	Vale de Cambra
96	Anadia	106	Gafanha da Nazaré	116	Ovar
97	Gouveia	107	Viseu	117	S. João da Madeira
98	Tondela	108	Celorico da Beira	118	Feira
99	Oliveira do Bairro	109	Aveiro	119	Esmoriz
100	Nelas	110	Sever do Vouga	120	Espinho
121	Moimenta Beira - Tarouca	131	Peso da Régua	141	Matosinhos - Vila do Conde
122	Lourosa - Faiões	132	Porto	142	Maia
123	Barca de Alva	133	Infesta - Porto	143	Amarante
124	V. Nova de Foz Côa	134	Valongo	144	Paços Ferreira

125	Avintes - Gaia	135	Matosinhos	145	Vila Flor
126	Lamego	136	Rio Tinto	146	Freamunde
127	Canidelo - Gaia	137	Leça do Balio	147	Lousada
128	Gondomar	138	Parede	148	Vila Real
129	Gaia	139	Penafiel	149	Sto Tirso
130	Valbom	140	Ermesinde	150	Lousada - Vizela
151	Vila do Conde	161	Miranda do Douro	171	Bragança
152	Famalicão	162	Barcelos	172	Ponte da Barca - Lindoso
153	Vizela	163	Braga	173	Bragança - Portelo
154	Murça	164	Esposende	174	nó Valença
155	Póvoa de Varzim	165	Macedo Cavaleiros	175	Valença
156	Guimarães	166	Viana do Castelo		
157	Fafe	167	Bragança - Rio Frio		
158	Póvoa de Varzim - Esposende	168	Chaves		
159	Vila Pouca de Aguiar	169	Ponte de Lima		
160	Mirandela	170	Vila Verde da Raia		

Com uma política de desenvolvimento e crescimento económico do País assente na construção de estradas e auto-estradas, o que já acontecia com o PRN85, o PRN2000 assumiu-se como um instrumento estratégico de ordenamento do território. Desta aposta decorreram transformações da rede como medidas de ajustamento às necessidades da actual conjuntura económica, social e ambiental na tentativa de corrigir erros (assimetrias regionais nas acessibilidades e na mobilidade) e potenciar o desenvolvimento regional.

Neste quadro de opções o PRN2000, consegue apresentar um aumento da conectividade, conforme atestam os índices de conectividade e de coesão do grafo acima indicados, com destaque para o índice gama (γ = 51%) da conectividade máxima, o índice alfa (α = 26%), ainda que denote valor baixo, é significativamente superior ao verificado para o PRN85 (19%), e o índice do grau de desenvolvimento de Zagozdzon (Gp), que a sofrer uma diminuição relativamente ao resultado obtido para o PRN85, evidencia o aumento de coesão da rede (faltam menos componentes à rede para atingir uma conectividade máxima) e, consequentemente, um maior grau de desenvolvimento, que de resto é comprovado pela diminuição do diâmetro da rede (26).

A este aumento de conectividade da rede está directamente relacionado o aumento do número de arcos (aumenta o número de circuitos) e uma diminuição (ainda que muito diminuta) do número de nós, o que significa, que existem mais caminhos alternativos para se aceder aos mesmos lugares.

Em suma, numa análise da estrutura da rede pode afirmar-se a partir dos resultados aqui obtidos, que nem sempre um maior número de arcos e nós na rede (sobretudo a partir de uma certa complexidade, conforme verificado entre a rede de 1945 e 1985), se traduz em maior conectividade e coesão. É a forma como se estabelecem as ligações, que vão influenciar esses índices. Não obstante, para atestar esta apreciação mais geral, é fundamental o exercício de escala, isto é, fazer a análise nó a nó.

Para cumprir com este propósito é imperioso o cálculo de matrizes e a análise das distâncias mais curtas entre os nós. Assim, e no seguimento metodológico até aqui adoptado determinou-se a hierarquia dos nós do grafo a partir da matriz de acessibilidade de Shimbel (cf. Tabela 16) e comparou-se as transformações espaciais ocorridas, entre as suas congéneres para os períodos antecedentes analisados.

TABELA 16[113] HIERARQUIA DA REDE URBANA, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE D DA REDE DE ESTRADAS DO PLANO RODOVIÁRIO NACIONAL DE 2000.

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Coimbra - Mealhada**	**1238**
2	**Anadia**	**1252**
3	Condeixa	1275
4	Ansião	1282
5	Penacova	1301
6	Sta Comba Dão	1315
7	Oliveira do Bairro	1325
8	Águeda	1325
9	Mealhada	1332
10	Tomar	1342
11	Figueira da Foz	1342
12	Albergaria-a-Velha	1346
13	Nelas	1350
14	Carriço	1351
15	Mira	1356
16	Vila Velha de Rodão	1364
17	Tondela	1373
18	Barquinha	1380
19	Viseu	1387
20	Oliveira do Hospital	1392
156	Seixal	2213
157	Costa da Caparica	2213
158	Loulé	2249
159	Lagoa - Silves	2250
160	Tavira	2258
161	Bragança - Rio Frio	2259
162	Bragança - Portelo	2259
163	Vila do Bispo	2263
164	Ponte de Lima	2263
165	Barcelos	2267
166	Póvoa de Varzim	2274
167	Barreiro	2301
168	Póvoa de Varzim - Esposende	2389
169	Portimão	2416
170	Faro	2422
171	Viana do Castelo	2428
172	Nó Valença	2430

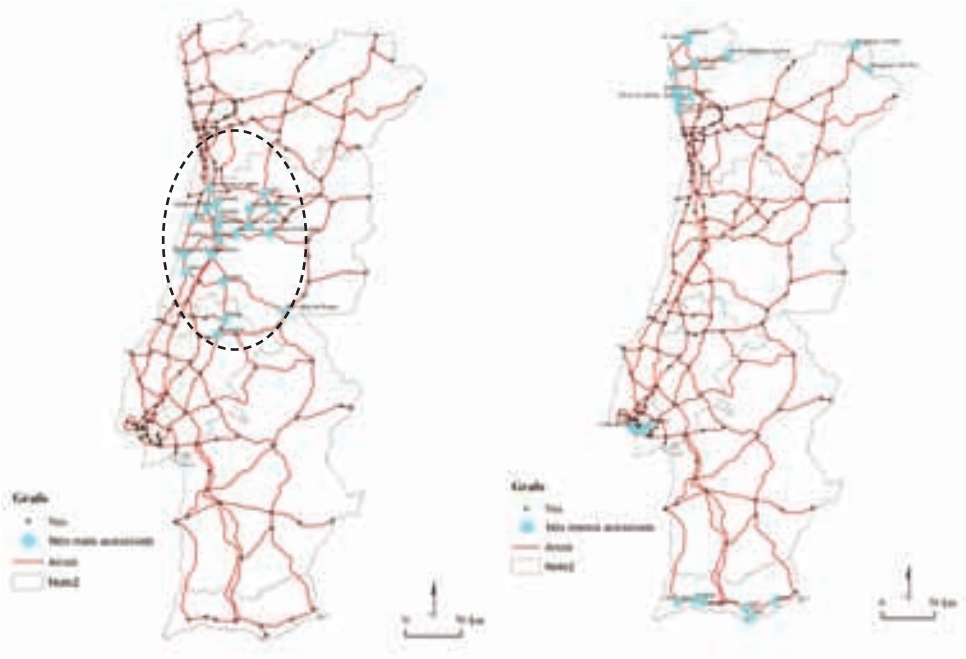
113 Apenas se faz referência aos 20 mais e menos acessíveis lugares.

173	Ponte da Barca - Lindoso	2436
174	Esposende	2552
175	**Valença**	**2603**
118	**Lisboa**	**1923**

Fazendo uma análise comparativa dos vinte lugares mais acessíveis determinados pela matriz C^1 (cf. Anexo), das redes de estradas dos vários períodos temporais, apenas 5 lugares (Coimbra-Mealhada, Anadia, Condeixa, Albergaria-a-Velha e Viseu) continuam a pertencer ao conjunto dos lugares mais acessíveis determinados pela matriz D. Contudo, verificam-se mudanças na ordem hierárquica dos lugares, nomeadamente Albergaria-a-Velha, que na matriz C^1 aparece como o lugar mais acessível e na matriz D passa a ocupar a 12ª posição. Menos acentuada no entanto, são as mudanças de ordem do nó Coimbra-Mealhada, do 2º para passar ocupar o 1º lugar e Anadia de 4º para 2º lugar na hierarquia de acessibilidades

Tal como verificado para o PRN85, de um padrão espacial de dispersão dos lugares pelo território, passa-se para um padrão de concentração, conforme se pode ver pelas figuras 50 (nós mais acessíveis e menos acessíveis, pela matriz D).

FIGURA 50 GRAFO DO PLANO RODOVIÁRIO DE PORTUGAL CONTINENTAL 2000 COM IDENTIFICAÇÃO DO GRUPO DOS LUGARES MAIS E MENOS ACESSÍVEIS CALCULADOS A PARTIR DA MATRIZ D.



Da análise ao mapa da figura 50, com a representação dos lugares mais acessíveis, o que ressalva é a progressiva aproximação do *grupo* dos lugares mais acessíveis para junto do litoral, relativamente aos mapas análogos das redes do PR45 (Figura 40) e PRN85 (Figura 43)

Quanto à distribuição espacial dos lugares menos acessíveis existem semelhanças e diferenças, face ao verificado para os períodos antecedentes. Das semelhanças, o destaque vai para o padrão concentração, em detrimento do padrão dispersão, assim como a manutenção dos *grupos* de lugares do Alto Minho (reforçado no litoral para sul, com a inclusão de Esposende e Póvoa de Varzim) e Algarve (permanece o mesmo eixo do litoral). No que se refere a diferenças, a nota de destaque vai para o surgimento de mais dois *grupos* de lugares (ainda que compostos por um diminuto número de nós):

- O *grupo* de Bragança, com Portelo e Rio Frio, cuja inclusão entre os lugares menos acessíveis se deve à exclusão (por desclassificação) do arco representativo da estrada nº 103, do mapa do grafo do PRN85, que ligava Vila Verde da Raia a Vinhais e a Bragança; e
- O *grupo* da Península de Setúbal, composto pelos lugares Costa de Caparica, Seixal e Barreiro e cuja razão para integrarem no PRN2000 a lista dos lugares menos acessíveis, se deve à não inclusão no grafo das estradas nºs 4, 5, 10, 378 e 379, que asseguram a ligação entre eles e para fora da Península de Setúbal.

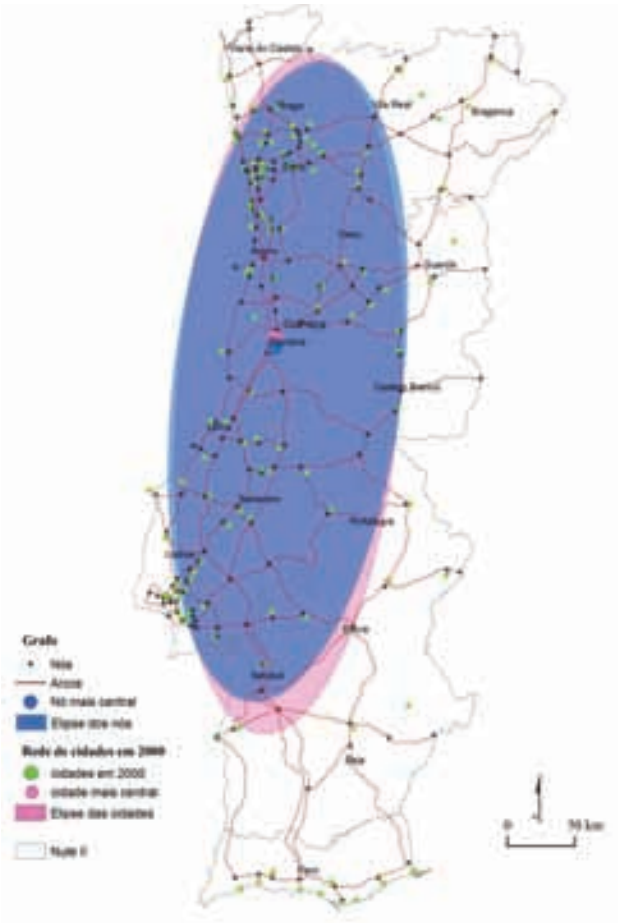
Recorde-se no entanto, que a não inclusão destas estradas no grafo do PRN2000 se deveu à desclassificação da rede levada a cabo pelo decreto-lei 222/98 de 17 de Julho, e ao facto de se querer manter a coerência da linha metodológica adoptada e dos critérios que a sustentam.

Quanto às medidas de análise de distribuição espacial, os resultados obtidos vêm reforçar o quadro organizacional determinado, quer pelas medidas topológicas, quer pelas medidas de distribuição espacial do PRN85.

Com efeito, e conforme se pode observar pela figura 51 abaixo, o lugar mais central dos nós da rede de estradas coincide com o lugar mais acessível da matriz D: nó Coimbra-Mealhada, o que indica uma sobreposição da topologia com a geografia, ou seja, dos resultados das medidas topológicas com os resultados das medidas de distribuição espacial. Esta interpretação ganha ainda mais consistência quando comparadas as elipses de tendência calculadas, quer para os nós da rede de estradas, quer para as cidades existentes.

Ao observar-se a figura acima, verifica-se a existência de uma coincidência espacial do mais central da rede de estradas com a cidade mais central da rede de cidades existentes em 2000. E ao confrontarem-se os resultados obtidos pelas mesmas medidas para os períodos antecedentes, verifica-se que ocorreu ao longo destes anos um aproximar da estrutura topológica da rede de estradas à localização física dos elementos, ou seja, as relações topológicas coincidem, na determinação do lugar mais acessível, com o resultado obtido pelas medidas de distribuição espacial.

FIGURA 51 GRAFO COM O SISTEMA DE CIDADES EXISTENTES EM 2000, E AS MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL



Numa leitura mais circunscrita à rede em análise, constata-se que existe uma sobreposição dos lugares centrais, em que Coimbra assume-se como a cidade que materializa centralidade.

Todavia, numa análise comparativa mais estendida no tempo, o que se verifica é uma aproximação da estrutura topológica da rede de estradas com a estrutura de localização física da rede de cidades. Observando-se a tabela 17 abaixo verifica-se que é Coimbra que surge quase sempre como a cidade mais central das redes de cidades ao longo destes 2000 mil anos, e a tendência de aproximação do lugar mais central da rede de estradas que se foram estruturando no território até à sua sobreposição com o PRN2000. Igualmente, de acordo com as medidas topológicas da Teoria dos Grafos para análise da acessibilidade da rede estradas, o que se constata é também um aproximar no sentido interior – litoral, que as elipses de tendência deixam perceber.

TABELA 17 LEITURA COMPARATIVA DOS LUGARES DE MAIOR ACESSIBILIDADE PELAS MEDIDAS DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TOPOLÓGICAS, DESDE OS ROMANOS ATÉ AO PRN2000

	MEDIDAS DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL		*MEDIDA TOPOÓGICA (Matriz D)*
	Cidade mais central	**Nó mais central**	**Nó mais acessível**
Romanos	Coimbra	Ponte de Sôr	Ad Septem Aras (Campo Maior)
1800	Castelo Branco	Abrantes	Madalena
1945	Coimbra	Vila de Rei	Sertã
1985	Coimbra	Ansião	Leiria
2000	Coimbra	Coimbra	Coimbra-Mealhada

Contudo, apesar do modelo empírico proporcionado pelo *geo_grafo*, que vem provar a existência e o grau de influência da rede de transportes rodoviários na estruturação do território, mais precisamente na localização e na relação entre os lugares, a verdade é que se pode fazer uma crítica fácil ao modelo, o que de resto foi a crítica clássica a muitos dos modelos de análise espacial das décadas de 1930 e de 1940 (cf. Tabela 1): trata-se de um modelo isotrópico, que não considera o espaço enquanto uma variável mutável, de acordo com as diferentes direcções, isto é, o espaço mantém as mesmas características independentemente de quaisquer outros factores, e.g. população, distância física, etc. Para dar uma resposta à crítica, tentou integrar-se no *geo_grafo uma* algoritmia que pudesse dar forma empírica a um espaço anisotrópico, e assim confrontar uma vez mais a topologia e o território, para medir a influência que as rodovias exercem sobre a ordem espacial.

6.2. O MODELO ANISOTRÓPICO PARA ANÁLISE DO EFEITO DA REDE DE TRANSPORTES RODOVIÁRIOS NA ORGANIZAÇÃO ESPACIAL

Ao contrário dos modelos isotrópicos, nos modelos anisotrópicos adoptam-se métodos de análise de interacção espacial, em que o espaço assume diferentes propriedades com a mudança de direcção. Para o efeito adoptaram-se dois métodos: um decorrente da Teoria dos Grafos e baseado no cálculo de matrizes ponderadas (cf. Cap. 2), de distâncias físicas (matriz L) ou reais, que se confrontarão com os resultados apurados pelas distâncias topológicas (matriz D); e outro decorrente da teoria de gravidade de Isaac Newton (1687), a partir de modelos gravíticos, para avaliar e mediar a capacidade de interacção entre os lugares da rede e os padrões espaciais que estruturam.

6.2.1. MATRIZ PONDERADA L (DISTÂNCIA FÍSICA)

Apesar de já se ter dissertado sobre a matriz L no capítulo 2 importa agora dizer da importância que esta matriz desempenha para a análise do efeito das redes de transporte sobre a hierarquização dos lugares e o seu posicionamento relacional. Claro que as matrizes anteriores já ajudavam a perceber esse efeito e o seu grau de impacte, mas então tratava-se de uma análise baseada num modelo isotrópico, ou seja em que o espaço era considerado como isotrópico, em que todas as ligações (arcos) eram tidas como de igual importância (peso) na determinação do grau de acessibilidade dos lugares. Com a matriz ponderada L, de distâncias físicas, o espaço passa a ser considerado como anisotrópico e passa-se a definir a hierarquia de acessibilidades dos lugares não somente em função das ligações que possuem, mas também da distância real que os separa.

Igualmente, como tinha sido referido e explicado no cap. 2, a matriz L, à semelhança das matrizes C e T, só se esgota (deixa de ter zeros) quando elevada à potência igual do diâmetro da rede (L^1, L^2, L^3, …, L^n), o que significa que a execução completa dos procedimentos analíticos vai gerar um grande número de matrizes com um grande volume de informação, as quais se apresentam em anexo. Contudo, tal como na análise às matrizes C, T e D para as redes dos vários períodos considerados, faz-se a exposição dos quadros que apresentam a hierarquia dos 20 lugares mais acessíveis e menos acessíveis.

Refere-se ainda que se optou por apresentar aqui os valores ponderados[114], a fim de facilitar a legibilidade dos resultados.

Na tabela 18 apresenta-se a hierarquia das acessibilidades dos lugares da rede de Estradas Romanas (cf. Tabela 18[115]).

Dos lugares que eram mais acessíveis, do ponto de vista topológico pela matriz de caminhos-mais-curto (D), apenas 4 permanecem como os mais acessíveis de acordo com a matriz L^{42}, a saber: Águas de Moura, Scallabis (Santarém), Sellium (Tomar) e Montemor-o-Novo, e havendo mesmo 1 lugar (Praesidio) que passa do grupo dos mais acessíveis em termos de distância topológica, para o grupo dos 20 menos acessíveis em termos de maior distância física relativamente aos restantes 83 lugares, o que reflecte uma diferença, neste caso da Rede de Estradas Romanas, entre a topologia da medida de acessibilidade de Shimbel (D) e a geografia da medida de acessibilidade (distância real) L, ou seja que os comprimentos dos arcos são muito diferentes

Da análise comparativa à distribuição espacial dos *grupos* dos lugares mais acessíveis (Figura 52), derivados, quer da matriz D, quer da matriz ponderada L, duas leituras podem ser feitas: alteração da estrutura, com mudança da maioria dos luga-

114 A ponderação efectuada consistiu na divisão de todos os valores calculados pelo valor mínimo da matriz respectiva, o que dá indicação de quantas vezes os outros valores são o valor mínimo, que ponderado é 1.

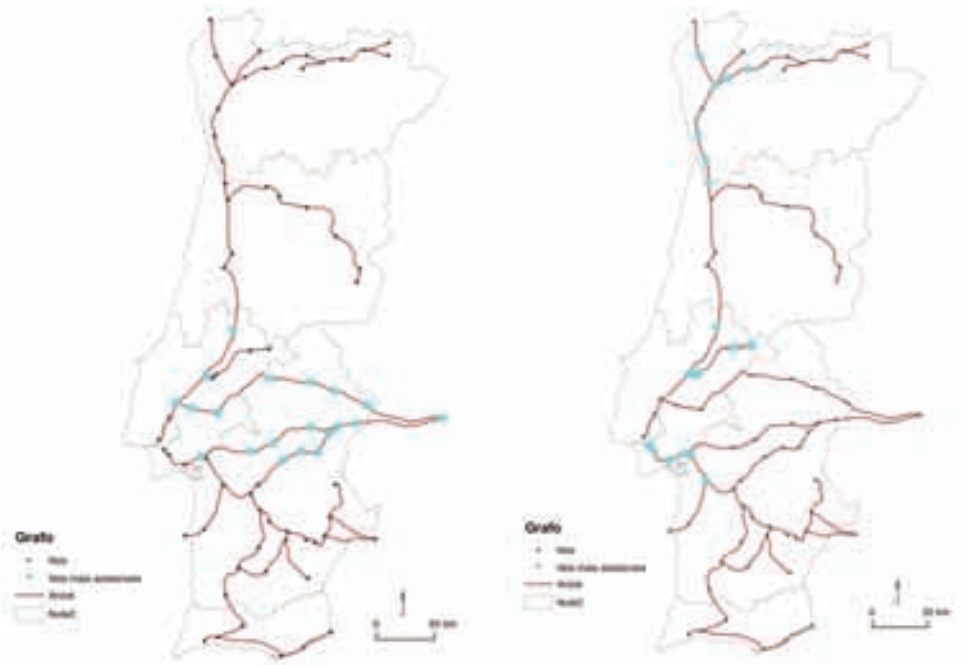
115 Para a rede de Estradas Romanas, o coeficiente K corresponde a 4401.74 m, que é a estrada que liga Almeirim a Alpiarça.

res mais acessíveis em D relativamente a L; consequente deslocamento do *grupo* dos mais acessíveis, que deixou de ser zonal, para passar a ser disperso, a norte e a sul do Tejo, mas sempre junto ao litoral.

TABELA 18 HIERARQUIA DOS LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADES L^{42} DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS.

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Aritium Vetus (Alvega)**	1.000
2	Alpiarça	1.008
3	Tubucci (Tramagal)	1.020
4	Almeirim	1.044
5	Marateca	1.082
6	Águas de Moura	1.086
7	Caetobriga (Setubal)	1.091
8	Salatia	1.093
9	Scallabis (Santarem)	1.100
10	Talbriga (Branca)	1.106
11	Seixal	1.111
12	Salacia (Alcacer do Sal)	1.113
13	Cale (Gaia)	1.115
14	Lancobriga (Fiães da Feira)	1.117
15	Limia (Ponte de Lima)	1.118
16	Praesidio	1.120
17	Bracara (Braga)	1.121
18	Equabona (Coina-a-Velha)	1.122
19	Sellium (Tomar)	1.124
20	Montemor-o-Novo	1.126
65	Myrtilis (Mértola)	1.224
66	Fines (Corte de Messangil)	1.229
67	Santa Clara-a-Velha	1.233
68	Ponte de Sor	1.237
69	Civitas Zoelarum (Castro de Avelãs)	1.239
70	Compleutica (Cova da Lua)	1.240
71	Nova Civitas Aruccitana (Moura)	1.268
72	Emerita (Mérida)	1.269
73	Arucci Vetus (Aroche)	1.280
74	Assumar	1.282
75	S. Bartolomeu de Messines	1.284
76	Coruche	1.285
77	Abelterium (Alter do Chão)	1.292
78	Ad Septem Aras (Campo Maior)	1.304
79	Portus Hannibalis (Portimão?)	1.306
80	Lousa	1.314
81	Lacobriga (Lagos)	1.320
82	Ossonoba (Faro)	1.403
83	Balsa (Tavira)	1.426
84	**Baesuris (Castro Marim)**	**1.468**
23	**Olisipo (Lisboa)**	**1.129**

FIGURA 52 GRAFO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS, SEGUNDO AS DISTÂNCIAS TOPOLÓGICAS (ESQUERDA) E AS DISTÂNCIAS REAIS (DIREITA).



Os diferentes resultados obtidos evidenciam o facto de nas redes com uma estrutura em árvore, os lugares mais acessíveis serem condicionados, não apenas pela sua posição na estrutura, mas também pela diferente extensão que os diversos arcos apresentam.

Como exemplo, os lugares ao longo da estrada que liga Seixal a Salacia (Alcácer do Sal), são os mais acessíveis a sul do Tejo; a estrada que une Sellium (Tomar) a Almeirim e a Aritium Vetus (Alvega), a norte do Tejo (Lezíria do Tejo) e por fim, o *grupo* composto pelos lugares ligados pela estrada que vai de Talbriga (Branca) a Limia (Ponte de Lima) e a Praesidio, a norte.

Quanto à Rede de Itinerários de 1800, a consideração das distâncias entre os lugares tem influência directa no *agrupamento* dos nós mais acessíveis, quer a partir da medida de distâncias topológicas (D), quer a partir da medida de distâncias físicas (L), cujos resultados podem verificar-se pela tabela 19, no que respeita à ordenação dos lugares.

TABELA 19 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE L^{31} DA REDE DE ITINERÁRIOS, 1800.

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Ansião**	1.000
2	Tomar	1.001
3	Alvaiázere	1.001
4	Madalena	1.002
5	Asseiceira	1.006
6	Abrantes	1.011
7	Paço	1.016
8	Chancelaria	1.016
9	Ponte de Sôr	1.019
10	Entroncamento	1.020
11	Arraiolos	1.020
12	Torres Novas	1.020
13	Évora Monte	1.020
14	Avis	1.021
15	Sousel	1.024
16	Fátima	1.024
17	Vimieiro	1.025
18	Pavia	1.025
19	Zibreira	1.029
20	Miranda do Corvo	1.044
225	Moura	1.345
226	Tavira	1.350
227	Covilhã	1.351
228	Zambujal	1.352
229	Vila Real de Santo António	1.362
230	Odeleite	1.369
231	Castro Marim	1.371
232	Chaves	1.376
232	Caminha	1.384
234	Tróia	1.402
235	Cabeceiras de Basto	1.403
236	Alcoutim	1.410
237	Serpa	1.412
238	Vales Mortos	1.447
239	Bragança	1.467
240	Valença	1.468
241	Miranda do Douro	1.477
242	Vimioso	1.541
243	Melgaço	1.547
244	**Vieira do Minho**	1.568
154	**Lisboa**	1.227

O facto de apenas 5 (Montemor-o-Novo; Évora; Santana do Mato e Alvito) dos 20 lugares tidos como os mais acessíveis na matriz D, não estarem entre os 20 mais acessíveis da matriz L^{31}, vem comprovar a existência de uma relação forte entre a topologia da rede e as distâncias reais entre os lugares. Esta é a conclusão que pode ainda ser sublinhada pela representação espacial do padrão gerado pelo *grupo* de ambas as métricas (cf. Figura 53).

FIGURA 53 GRAFO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS DA REDE DE ITINERÁRIOS 1800, PELAS DISTÂNCIAS TOPOLÓGICAS (ESQUERDA) E PELAS DISTÂNCIAS REAIS (DIREITA).

Da leitura aos mapas acima constata-se uma similitude espacial assinalada pelas elipses dos *grupos* dos lugares mais acessíveis na rede (Figura 53). Se no caso do mapa da esquerda, referente aos resultados apurados pela matriz D, a localização mais ao centro do *grupo* dos lugares mais acessíveis pode-se explicar pela isotropia do modelo; já no mapa da direita, em que os resultados apurados decorrem da matriz ponderada de distâncias físicas (L) entre os lugares, esta justaposição deve-se a uma conectividade superior a 50% conjuntamente com um 'baixo' diâmetro da rede, ou seja, da relativa igual distância a percorrer para se chegar de um nó a qualquer outro nó da rede, contrariamente ao que acontecia com a rede de Estradas Romanas, dada a sua geometria em árvore.

Para a Rede do PRN45, apesar de se manter uma aparente ocupação geral do território pela rede, face aos Itinerários de 1800, ocorreu uma diferenciação na tanto no padrão concentração, como no padrão dispersão, quer dos nós, quer dos arcos, com destaque para as Áreas Metropolitanas do Porto e de Lisboa, e para o centro do País, na ligação entre Coimbra e Castelo Branco (cf. Figura 39). Nota ainda para o aumento de nós e, sobretudo de arcos, o que traduz um aumento de conectividade da rede (58%). É da combinação destas transformações territoriais e topológicas que se

podem explicar as diferenças hierárquicas entre os resultados apurados pela matriz D e pela matriz L^{37} (Tabela 21).

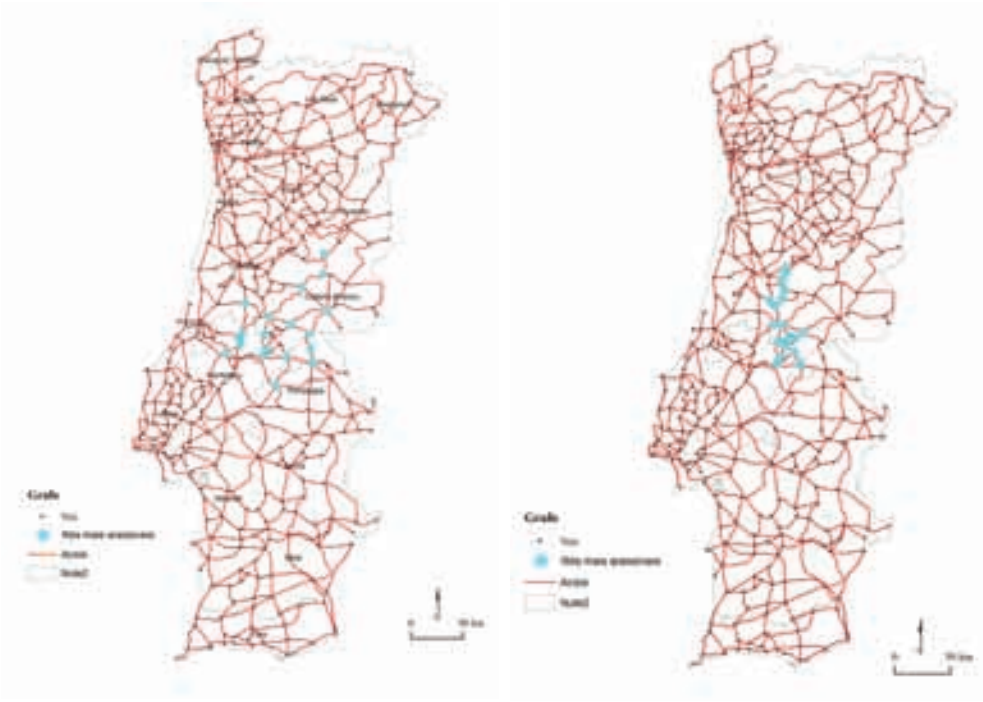
TABELA 20 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE L^{37} DO PRN45

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Palhota**	1.000
2	Amêndoa	1.001
3	Vila de Rei	1.009
4	São João do Peso-Cardigos	1.010
5	Cardigas	1.014
6	Sertã	1.025
7	Mação	1.025
8	Sardoal	1.034
9	Proença-a-Nova	1.036
10	Escalos do Meio	1.039
11	Castelo	1.040
12	Portela do Fojo	1.043
13	Abrantes	1.044
14	Pessegueiro	1.045
15	Góis	1.045
16	Castanheira de Pêra	1.050
17	Gavião	1.052
18	Arganil	1.052
19	Carapinha	1.053
20	Lousã	1.054
370	Petisqueira	1.595
371	Alcoutim	1.597
372	Monchique	1.602
373	Tunes-Guia	1.613
374	Giões	1.613
375	São Brás de Alportel	1.615
376	Quarteira	1.628
377	Loulé	1.630
378	Silves	1.631
379	Odelouca	1.643
380	Castro Marim	1.643
381	V. Real de Santo António	1.646
382	Faro	1.647
383	Almansil	1.650
384	Olhão	1.655
385	Portimão	1.658
386	Lagos	1.660
387	Tavira	1.666
388	Vila do Bispo	1.668
389	Albufeira	1.670
390	**Sagres**	**1.710**
204	**Lisboa**	**1.177**

O padrão espacial que a anisotropia do modelo traduz através dos resultados apurados pela matriz L, permite evidenciar uma mudança no grupo dos lugares mais acessíveis, face aos resultados derivados da matriz D, com os lugares mais acessíveis alinharem-se pela estrada nº 2, que liga Gavião e Abrantes a Arganil e Carapinha, passando por Sardoal e Proença-a-Nova.

Com efeito, verifica-se uma mudança da disposição espacial do *grupo* dos lugares mais acessíveis, que a elipse representada na figura 54 ajuda a identificar. Trata-se de um alinhamento da disposição dos lugares em torno do IP nº2, facto que se deve, quer à alta densidade da rede, quer ao baixo valor de diâmetro da rede, o que vem explicar a existência de vários caminhos alternativos entre quaisquer pares de nós.

FIGURA 54 GRAFO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS DA REDE DO PR45, PELA MATRIZ D (ESQUERDA) E PELA MATRIZ L^{37} (DIREITA).



Da leitura comparativa entre as hierarquias de acessibilidade determinadas, entre a matriz D e a matriz L^{37} (Tabela 21), o que se verifica é que apenas 7 (Sertã, Vila de Rei, Sardoal, Abrantes, Castelo, Proença-a-Nova e Gavião) dos lugares mais acessíveis em termos de distância topológica (matriz D) figuram entre os 20 mais acessíveis em termos de distância física (matriz L); e mesmo estes sofreram mudanças de posição mais ou menos significativas.

TABELA 21 COMPARAÇÃO DA HIERARQUIA DOS 7 LUGARES QUE ESTÃO SIMULTANEAMENTE ENTRE OS MAIS ACESSÍVEIS, QUER NA MATRIZ D, QUER NA MATRIZ L^{37}, DO PR45

Lugar	*Ordenação* D	*Ordenação* L^{37}
Sertã	1	6
Vila de Rei	3	3
Sardoal	4	8
Abrantes	9	13
Castelo	13	11
Proença-a-Nova	18	9
Gavião	19	17

Passados 40 anos e uma orientação de política rodoviária apostada na desafectação de parte da rede de estradas do poder central para o poder local (DL 380/85), a diminuição da complexidade da rede são as características mais evidentes. Contudo, quando analisado sob as métricas dos modelos propostos, podem-se encontrar padrões e obter respostas que a complexidade da rede muitas vezes encobre.

Para uma boa compreensão da influência do PRN85 sobre o território, a metodologia de análise proposta deve assentar numa abordagem em duas fases: primeiro numa análise comparativa entre o PR45 e o PRN85; segundo, num olhar sobre os resultados do modelo isotrópico (matriz D), com os do modelo anisotrópico (matriz L).

Relativamente à primeira fase, a análise comparativa vem revelar uma alteração do padrão espacial, com a deslocalização para o litoral dos lugares mais acessíveis, conforme deixam evidente as medidas de distribuição espacial. Apesar de as elipses do *agrupamento* dos nós mais acessíveis deixassem adivinhar uma tendência, até à data ainda não se tinha testemunhado.

Com efeito, o *grupo* dos lugares mais acessíveis passou de uma posição geograficamente central (cf. Figuras 53 e 54), para uma posição litoral, alinhando-se junto à costa (cf. Figura 55), o que se pode explicar pelo aumento da importância das ligações existentes no litoral.

O confronto desses resultados com os derivados da matriz L, do modelo anisotrópico, mostra uma segunda alteração original do padrão espacial, e que se traduz na realidade, numa quebra (não há uma continuidade espacial) entre os lugares que compõem o *grupo* dos mais acessíveis (Figura 55).

FIGURA 55 GRAFO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS DA REDE DO PRN85, PELAS DISTÂNCIAS TOPOLÓGICAS (ESQUERDA) E PELAS DISTÂNCIAS FÍSICAS (DIREITA).

De um *grupo* confinado aos lugares dos distritos de Santarém, Leiria e Coimbra (cf. Figura 55, mapa da esquerda), passa-se para dois *grupos*, que não só estão espacialmente desconexos, como passaram a agrupar lugares mais para sul (Sul de Santarém) e mais a norte (Norte de Coimbra), sendo Coimbra o lugar charneira (cf. Figura 55, mapa da direita). Assim, a norte é a IC1 que assiste a ligação entre os lugares de Mira a Estarreja, passando por Aveiro; e a sul são as IC1 e IC2 as estradas que permitem as ligações mais curtas entre os lugares de Loures e Pombal, passando por Caldas da Rainha e Rio Maior, em detrimento de Santarém, que está conectada pela IP1.

A explicação para esta diferenciação de padrões espaciais reside, tal como se vinham verificando para os períodos anteriores, no facto de que à medida que a estrutura da rede vai ganhando conectividade, e consequentemente passam a existir mais caminhos alternativos, a diferença entre as distâncias topológicas e as distâncias físicas vai-se acentuando, com reflexo nos padrões espaciais que configuram.

A análise espacial aos modelos (cujas transformações estruturais foram evidentes) é ainda reforçada pelas mudanças ao nível da relação dos lugares, aferida pelas medidas de acessibilidade e centralidade dos nós da rede (Tabela 22).

TABELA 22 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE L^{35} DO PRN85

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Gafanha da Nazaré**	1.000
2	Ílhavo	1.005
3	Vagos	1.011
4	Aveiro	1.012
5	Alverca	1.046
6	Mira	1.047
7	Alhandra	1.047
8	Vila Franca de Xira	1.049
9	Albergaria-a-Velha	1.050
10	Óbidos	1.060
11	Caldas da Rainha	1.063
12	Alenquer	1.071
13	Bombarral	1.072
14	Leiria	1.073
15	Rio Maior	1.073
16	Loures	1.075
17	Estarreja	1.075
18	Samora Correia	1.078
19	Batalha	1.078
20	Porto de Mós	1.078
161	Ferreira do Alentejo	1.447
162	Sines	1.449
163	Vidigueira	1.472
164	Cuba	1.475
165	Beja	1.484
166	Bragança	1.486
167	Ourique	1.551
168	Serpa	1.571
169	Castro Verde	1.575
170	Odemira	1.631
171	Vila Verde de Ficalho	1.640
172	Aljezur	1.732
173	Albufeira	1.736
174	Lagos	1.782
175	Loulé	1.797
176	Faro	1.816
177	São Brás de Alportel	1.830
178	Olhão	1.835
179	Tavira	1.870
180	**Castro Marim**	**1.910**
58	**Lisboa**	**1.113**

Do confronto entre os resultados apurados a partir da de acessibilidade da matriz D, com a tabela acima, pode constatar-se que apenas 4 dos 20 lugares mais acessíveis se repetem, ou seja, ainda menos que os verificados para o PR45 em análise comparativa. Destaque ainda para o facto de que desses 4 lugares repetidos, a alteração que sofreram na hierarquia foi também superior às mudanças verificadas para os lugares do PR45 (cf. Tabela 23).

TABELA 23 COMPARAÇÃO DA HIERARQUIA DOS 4 LUGARES QUE ESTÃO SIMULTANEAMENTE ENTRE OS MAIS ACESSÍVEIS, DA MATRIZ D, E DA MATRIZ L[35], DO PRN85

Lugar	*Ordenação* D	*Ordenação* L[37]
Leiria	1	14
Batalha	8	19
Porto de Mós	11	20
Rio Maior	13	15

Significa isto que, quer as mudanças estruturais, quer as alterações em termos de acessibilidade dos lugares, entre os resultados dos modelos isotrópicos e anisotrópico têm vindo a acentuar-se com a evolução temporal da rede de estradas, revelando um diferencial entre a topologia do território e a disposição espacial dos lugares. As alterações nas ligações entre os lugares, com influência, quer na estrutura da rede, quer nas acessibilidades, são a causa principal para esta situação.

Para a rede de estradas do PRN2000 (que segundo o DL 222/98, é um instrumento estratégico de ordenamento do território), quando se comparam os mapas com os lugares mais acessíveis, quer da matriz D, quer da matriz L, o que se verifica é uma alteração total do padrão espacial (cf. Figura 56): passagem de um *grupo* de lugares disperso (Figura 56, mapa da esquerda), ainda que com continuidade espacial, para um *grupo* muito localizado, determinado por distâncias físicas muito curtas (Figura 56, mapa da direita).

Daqui se pode interpretar que o *grupo* dos lugares mais acessíveis, de acordo com a matriz L, não só estão fortemente conectados entre si, mas também com os lugares externos ao *grupo* (cf. 6.3.). Essas ligações são garantidas pelas IC23 e IC24 sobretudo, mas também pela IP1 e IP4, para fora.

O que os resultados da matriz L vêm mostrar é que apesar da perda de complexidade e de densidade da rede (passa de uma densidade de 1.22 em 1985, para 0.36 em 2000), houve um ganho de conectividade, que se manifesta sobretudo entre os lugares que se encontram fisicamente mais próximos entre si.

As alterações nos padrões espaciais mostram mudanças na hierarquia dos lugares mais acessíveis. De acordo com a matriz D (Tabela 16) e a matriz L (Tabela 24), nenhum dos lugares tidos como mais acessíveis na matriz D, se repetem na matriz L[26], dando assim continuidade à tendência que se vinha a verificar: de cada vez, repetem-se menos lugares e acentua-se uma litoralização com o *grupo* dos lugares mais acessíveis a deslocar-se mais para norte, o que é prova de uma maior aposta da densificação da rede de estradas no noroeste de Portugal continental, mais particularmente na Área metropolitana do Porto e sua envolvente (cf. Figura 26, mapa da direita).

FIGURA 56 GRAFO DOS LUGARES MAIS ACESSÍVEIS DA REDE DO PRN2000, PELAS DISTÂNCIAS TOPOLÓGICAS (ESQUERDA) E PELAS DISTÂNCIAS REAIS (DIREITA).

TABELA 24 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ DE ACESSIBILIDADE L^{26} DO PRN2000

Ordenação	Lugar	Índice de acessibilidade D
1	**Leça do Balio**	1.000
2	Infesta - Porto	1.000
3	Gaia	1.011
4	Porto	1.012
5	Matosinhos	1.014
6	Maia	1.016
7	Canidelo - Gaia	1.020
8	Avintes - Gaia	1.022
9	Valbom	1.022
10	Rio Tinto	1.025
11	Matosinhos - Vila do Conde	1.028
12	Valongo	1.033
13	Lourosa - Faiões	1.036
14	Gondomar	1.041
15	Espinho	1.043
16	Ermesinde	1.044
17	Esmoriz	1.051

18	Sto Tirso	1.057
19	Feira	1.063
20	Paços Ferreira	1.069
156	Sines	1.700
162	Bragança	1.721
163	Elvas	1.753
164	Beja	1.765
165	Bragança - Portelo	1.769
166	Caia	1.771
167	Bragança - Rio Frio	1.800
168	Castro Verde - Beja	1.819
169	Ourique	1.831
170	Serpa	1.870
171	Miranda do Douro	1.890
172	Vila Verde Ficalho	2.007
173	Albufeira	2.072
174	Vila do Bispo	2.108
175	Lagoa - Silves	2.131
176	Portimão	2.160
177	Loulé	2.176
178	Vila Real Sto António - Castro Marim	2.197
179	Faro	2.206
180	**Tavira**	**2.274**
38	**Lisboa**	**1.114**

Mas a análise da rede de ligações rodoviárias, pela matriz L, não é o único método do modelo anisotrópico para análise do efeito da rede de estradas sobre o território. Com o intuito de medir o potencial de interacção entre os lugares, de acordo com a estrutura de relações que as estradas proporcionam e a população residente em cada um dos lugares, adaptou-se o formalismo do modelo gravítico.

6.2.2. MODELO GRAVÍTICO

Muitas das redes geográficas, com destaque para as redes de ferrovias, as redes de rodovias, as redes de arruamentos, as redes de telecomunicações, entre outras, não podem ser caracterizadas nas suas múltiplas dimensões exclusivamente pela topologia, uma vez que esta ignora aspectos fundamentais como a localização dos nós e a distância entre eles (Batty, 2001; Gorman e Kulkarni, 2004). As redes que se estabelecem no mundo real são o resultado de uma conjugação de características de conectividade, localização e distância geográfica (Xu e Sui, 2007).

O modelo gravítico que aqui se operacionaliza procura formalizar isso, com o Potencial de interacção (Pi) entre os lugares (os nós do grafo) a ser medido em função do rácio entre a população residente e a distância topológica (D) que os separa.

Todavia, antes de se apresentar os resultados do modelo gravítico, é importante responder a algumas questões: em que consiste o modelo gravítico? Como surgiu na Geografia? Que importância assume na análise espacial e qual o propósito para que

foi adaptado para análise das redes de transporte rodoviário de Portugal Continental, no âmbito desta dissertação?

O modelo gravítico é o modelo de interacção espacial mais recorrente e de maior expressão em análise espacial (Du, 2001). A partir dele obtém-se o valor potencial de interacção espacial entre os lugares, de acordo com os seus respectivos nós e a distância a que se encontram uns dos outros, de uma forma análoga ao movimento entre elementos de um sistema físico (Nijkamp, 1978). O modelo gravítico para estudo e análise de fenómenos de interacção espacial deriva da adopção e adaptação da teoria da gravidade de Newton (1687), que postula que a força de atracão de quaisquer dois corpos é proporcional ao produto das suas massas e inversamente proporcional ao quadrado da distância que os separa.

Formalmente, tal significa que:

$$F_{ij} = \frac{m_i + m_j}{dij^2}$$

em que F_{ij} é a força de atracção entre i e j; m_i *e* m_j, as massas dos corpos localizados em *i* e *j*, e d_{ij} é a distância euclidiana que os separa.

Este modelo foi adaptado à Geografia para formalizar a interacção espacial. Por interacção espacial considera-se qualquer movimento no espaço resultante da acção humana (Haynes e Fotheringham, 1984), nomeadamente, a migração de população, as deslocações casa-trabalho, a circulação de jornais, o fluxo de passageiros, o fluxo de mercadorias, o fluxo de informação, o conhecimento, ou qualquer outro fenómeno que envolvendo a mobilidade de pessoas, bens, informação, ou ideias de um lugar para outro (Wilson, 2000; Lo e Yeung, 2002).

Apontado como fundamental para a Geografia moderna, porque permite tornar explícito o conceito de relatividade, por oposição à localização absoluta das coordenadas geográficas (Haynes e Fotheringham, 1984), o modelo gravítico teve como primeiros casos empíricos estudados as migrações, com os trabalhos de Ravenstein (1885) e Young (1924). As fórmulas que desenvolveram, com base na teoria da gravidade, tiveram de sofrer algumas alterações, de forma a se ajustarem à realidade em análise. Por exemplo, Ravenstein propôs que a Migração *M* (número de migrantes) da população *P*, entre os lugares *i* e *j*, fosse obtida a partir da fórmula:

$$M_{ij} = f(P_i)\ f(P_j)/d_{ij} \quad ,$$

e retirou o expoente distância d_{ij}, por considerar que o expoente suavizava o efeito de atrito que a variável distância exerce sobre o fenómeno migratório entre quaisquer regiões ou Países, ou seja o efeito de distância é considerada simplesmente como linear (ou proporcional). Young, por sua vez, introduziu uma constante *k*, de forma a ajustar o modelo às unidades de medida das variáveis, e manteve o quadrado da distância (já não é simplesmente o efeito da distância, mas da área a que respeita), tal como na fórmula original da lei da gravidade, porque contrariamente a Ravenstein

quer verificar se o impacto da distância é proporcional ou não ao grau de interacção espacial, i.e., apesar de se saber que a distância tem sempre um impacto negativo na interacção, podendo nuns casos ser mais ou menos negativa (Haynes e Fotheringham, 1984), segundo:

$$M_{ij} = KP_iP_j \ / \ d^2_{ij}$$

Estas duas fórmulas são representativas da maioria das abordagens formais do modelo gravítico (Wilson, 2000), contudo algumas questões reais não ficaram cabalmente respondidas, tais como: Deve-se usar o inverso da distância ou o inverso da distância ao quadrado? Deverão as 'massas' ser representadas pela população, ou a população não basta para explicar o potencial atractivo de um corpo em relação a outro? Deverão as massas ser ponderadas ou chegam os valores da variável que representam? E se em vez do potencial de interacção F_{ij}, pretender analisar-se a probabilidade de interacção P_{ij} entre dois ou mais corpos?

Lo e Yeung (2002) consideram que o modelo gravítico originalmente proposto pode e deve ser modificado, de forma a melhor poder analisar e representar os problemas reais de interacção espacial. No geral, as teses propostas caracterizam-se pela interrogação colocada às duas variáveis da fórmula: a variável *d* 'distância' e as variáveis *M* 'massa' (Nijkamp, 1978; Wilson, 2000). Considere-se como exemplo a interacção entre duas cidades *i* e *j*, com diferentes contingentes populacionais, P_i e P_j e separadas por uma distância d_{ij}, em que os autores consideram que o potencial de interacção entre as duas cidades *Tij*, se obtém a partir de:

$$T_{ij} = k \ \frac{P_i^{\ l} \ P_j^{\ a}}{d_{ij}^{\ b}}$$

A determinação dos valores dos parâmetros λ, α e β diferentes de 1 ou 2 respectivamente, permite adoptar e calibrar melhor o modelo à realidade. Uma outra forma de melhorar adequação do modelo à realidade consiste numa melhor definição da 'distância' a utilizar. Tendo-se partido das distâncias em linha recta nas formulações iniciais, cedo se verificou que não era esta a que melhor representa o tipo de potencial de interacção analisar. A distância física, a distância económica, a distância social, a distância cognitiva, (Gatrell, 1997) ou mesmo a distância topológica, são outro tipo de distâncias, que podem replicar melhor as realidades em análise.

A distância no fenómeno em análise, ter mais ou menos importância, significa maior ou menor efeito na interacção espacial dos fenómenos. Por exemplo, quando β é elevado, significa maior influência do factor distância, ou seja quanto maior o parâmetro β, maior é a 'dificuldade' de deslocação na rede. Em países ou regiões em que a rede de transportes está bem desenvolvida, o factor distância física tem menor influência sobre a intensidade de interacção entre duas localidades, do que tem num país ou região, com uma rede de transportes mais pobre e menos desenvolvida.

Também no que corresponde à massa *M*, a população nem sempre é a melhor variável para a considerar. Por exemplo, se o modelo for para análise do fluxo comercial entre regiões, o PIB *per capita* (indicador do poder de compra do consumidor) será uma variável mais ajustada, que a população residente dessa região.

Neste processo de ajustamento do modelo gravítico a fenómenos de interacção espacial, que relevam a imprevisibilidade do comportamento Humano, a transcrição directa do modelo físico de Newton, que até aqui deu resultados estatísticos satisfatórios, deixa de ser suficiente. A fórmula tem de passar a incluir interacção não apenas entre dois corpos, mas de um conjunto de corpos que compõem o sistema (Lo e Yeung, 2002), ou seja o factor 'oportunidade de intervenção' e o 'efeito aglomeração' têm de ser introduzidos no modelo.

Nesta assunção, deixa de ser o potencial de interacção que importa medir, mas antes a probabilidade de interacção (Nijkamp, 1978), o que traz para a discussão a modelação probabilística, alternativa ao determinismo do modelo gravítico, embora preservando as suas características de interacção espacial. O princípio custo-eficiência (Nijkamp, 1978) é um desses modelos, em que padrões de fluxos com elevados custos são menos prováveis de ser observados que padrões espaciais de fluxos com custos menores.

Haynes e Fotheringham (1984) notam ainda que a estrutura espacial origem-destino é relevante na intensidade de interacção entre os objectos e propõem uma forma mais generalizada do modelo original, a saber:

$$T_{ij} = f(V_i, W_j, S_{ij}) \ ,$$

em que, V_i representa o vector origem (atributos de ligação); W_j representa o vector destino (atributos de atracção); e S_{ij} representa o vector de separação (distância, proximidade) entre os lugares, cidades, regiões, …, *i* e *j*.

Para esta dissertação, o método não foi aplicado directamente tal como está consignado nos domínios da física e largamente aplicado em estudos geográficos. Sobre ele fez-se uma adaptação, em que se substituiu a variável distância física entre os lugares, por uma distância topológica (D), já que o fenómeno distância física estava já coberto pela análise da matriz L, pretendendo-se assim obter um modelo mais ajustado à realidade em análise, ou seja, um modelo que considera a influência da acessibilidade não só em função das características topológicas da rede, mas também da população residente[116] dos lugares, para medir o potencial de interacção, e mostrar que padrões espaciais se configuram.

Aplicou-se o modelo gravítico a partir de 1940, utilizando os dados recolhidos nesse ano para a população dos lugares, de forma conjugada com a rede do PR45, PRN85 e do PRN2000. O algoritmo baseou-se, uma vez mais, na álgebra de matrizes, em que a construção de uma matriz (a matriz P, em Anexo), e o preenchimento das suas

116 A população residente por lugares foi obtida a partir dos Recenseamentos Gerais da População para os anos de 1940, 1991 e 2001.

células, resultam da combinação entre a matriz D, das distâncias topológicas, com o campo M (*mass value*) das tabelas de atributos dos nós das redes em análise. Para que não se atingissem valores demasiadamente grandes, normalizou-se o algoritmo de cálculo, com a introdução de um factor K (0.000001), que é um coeficiente de ajuste e simplificação do potencial de interacção (Pi) obtido para cada um dos nós da rede.

Para uma melhor leitura e consequente interpretação dos resultados obtidos, optou-se por fazer a representação gráfica através de um mapa de implantação pontual, com o Pi a ser legendado sob a forma de círculos proporcionais[117], de forma a assinalar as assimetrias e garantir uma melhor percepção dos diferentes padrões espaciais.

Assim, para cada um dos períodos em análise construiu-se um mapa com os respectivos padrões e quadros de hierarquia dos lugares, em função do seu Pi.

Para o PR45, o mapa do Pi dos lugares (Figura 57) revela uma distribuição espacial bastante equilibrada, consequência de uma rede em forma de malha, com altos indicadores de conectividade e com os lugares a usufruírem de boa acessibilidade, o que permite corrigir desequilíbrios causados pelo contingente populacional, com Lisboa e Porto em destaque, mas também Gaia, Setúbal, Braga, Évora e Coimbra (Tabela 25).

FIGURA 57 POTENCIAL DE INTERACÇÃO DOS LUGARES DA REDE DO PR45

117 Os círculos proporcionais são obtidos do cálculo da raiz quadrada dos valores do Pi que determinam o raio. Ao resultado obtido multiplicou-se por um factor de escala adequado à melhor visualização dos valores (factor 10).

Considerando o Potencial de interacção dos lugares, determinados pelos nós do grafo da rede do PR45, dois padrões espaciais se destacam, quer pela localização dos círculos maiores, quer pela densidade de círculos, a saber: uma linha Litoral Ocidental, com uma extensão de cerca de 60km para o interior, e uma linha Sul, na Região do Algarve, com uma extensão de cerca de 30km para o interior.

Menos acentuado, mas espacialmente implícito, é a configuração de um corredor de cidades do Interior (fora do limite do arco litoral a Oeste e Sul), com alto Pi, que se estendem de sul a norte do território, unindo os lugares de Évora, Montemor-o-Novo, Beja, Castelo-Branco, Viseu, Estremoz e Portalegre, conforme se pode testemunhar a partir da tabela com a ordenação dos lugares com maior e menor Pi (Tabela 25).

As razões que explicam a configuração espacial dos padrões anunciados devem-se a: valores de população residente altos e de distâncias topológicas curtas entre os lugares; a estrutura em malha da rede e baixo valor do seu diâmetro. Com efeito, uma rede que evidencia um alto valor de conectividade e um diâmetro baixo, mostra uma maior 'facilidade' de mobilidade (pessoas, bens, informação, ideias, …). Características topológicas que, no caso do modelo gravítico que se adaptou, vai retirar factor de atrito e potenciar a influência dos valores da população.

TABELA 25 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ P DO PR45

Ordenação	Lugar	Pi
1	Porto	**8140.50**
2	Vila Nova de Gaia	2644.10
3	Coruche	2622.07
4	Leça do Bailio	2423.61
5	Setúbal	2384.87
6	Coimbra	2373.14
7	Valongo	2315.58
8	**Lisboa**	**2032.57**
9	Évora	2016.70
10	Braga	1881.81
11	Montemor-o-Novo	1660.52
12	Santarém	1656.05
13	Barreiro	1602.25
14	Alcácer do Sal	1571.81
15	Fiães	1443.70
16	Rio Tinto	1399.42
17	Almeirim	1355.66
18	Loulé	1297.28
19	Beja	1265.43
20	Torres Novas	1250.71
370	Trindade	17.22
371	Sampaio	16.03
372	Tavares	15.85
373	Lixa	13.63
374	Linda-a-Velha	0.76
375	Matosinhos	0.32

376	Marateca	0.15
377	Évora-São Matias	0.11
378	Atalaia	0.10
379	Ermidas do Sado	0.08
380	Comporta	0.07
381	Odelouca	0.07
382	Barranco Velho	0.07
383	Pinheiro da Cruz	0.06
384	Dogueno	0.05
385	Marinha Grande-S. Pedro Muel	0.05
386	Canhestros	0.04
387	Troia	0.04
388	Ouguela	0.03
389	Mogadouro-Santiago	0.02
390	Petisqueira	0.02

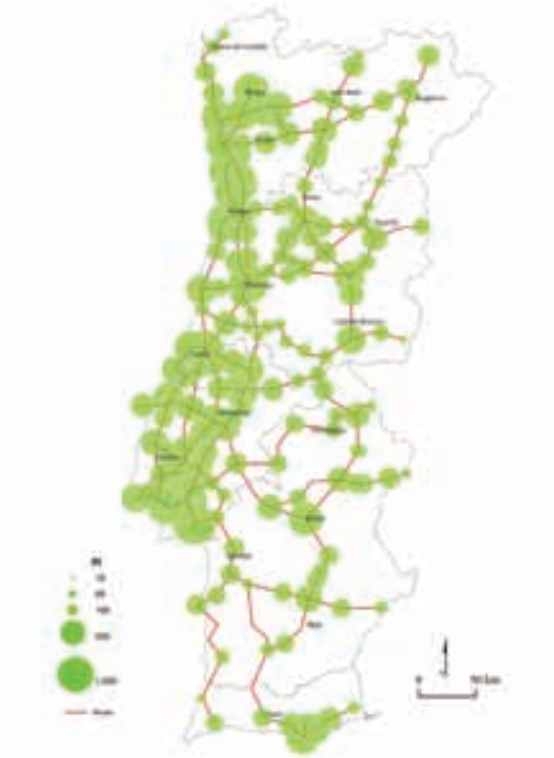
Dos resultados apurados e tendo por comparação o outro método do modelo anisotrópico, da matriz de distâncias ponderadas L, duas conclusões podem-se retirar: 1) não se verificar qualquer semelhança, quer no que respeita a padrões espaciais, quer no que respeita aos lugares cimeiros das ordenações entre os resultados apurados para os dois métodos do modelo anisotrópico, nomeadamente a matriz L e a matriz P; 2) forte semelhança entre os resultados da matriz L, do modelo anisotrópico e os resultados da matriz D, do modelo isotrópico.

A justificação formal para estas diferenças e semelhanças entre resultados apurados e padrões espaciais reside no facto de ter optado por usar a distância topológica como factor de atrito, em vez da distância física, e simultaneamente o facto da população dos lugares não mostrar para este ano de 1945, grandes desequilíbrios espaciais.

Para a rede de estradas do PRN85, usou-se como valor da população residente, a do Recenseamento Geral da População de 1991. O P_i (Figura 58) devolve resultados que vêem reforçar a análise anterior. No que respeita aos padrões espaciais que se configuram, destaca-se uma linha de cerca de 60km do litoral oeste que se configurava na rede do PR45, e que agora passou para 50km. Quanto ao eixo dos lugares do interior do País, tornou-se agora mais explícito, e embora continue espacialmente descontínuo, evidencia uma certa resiliência do território face às mudanças operadas ao nível da estrutura da rede.

Quanto ao padrão identificado para o Algarve, a mudança é mais acentuada quando comparada com a rede anterior, com a linha a sofrer simultaneamente um deslocamento, ao passar para uma extensão de cerca de 20km, e a cingir-se apenas ao Sotavento, encurtando Faro e Olhão a sua área de influência gravítica. Tal deve-se sobretudo à desafectação das Estradas (passam para a classe 'Outras estradas' no PRN85) que ligavam o eixo Portimão, Lagos, Vila do Bispo.

FIGURA 58 POTENCIAL DE INTERACÇÃO DOS LUGARES DA REDE DO PRN85



Ainda numa análise comparativa com os resultados do PR45, o padrão que se destaca denota uma resiliência geral do território, isto é, independente de uma visível alteração da complexidade da rede, os lugares de maior Pi não sofreram grandes alterações das suas posições na ordenação, (cf. Tabela 25 e 26), nomeadamente: Vila Nova de Gaia, que passa da posição 2 (PR45), para a posição 3 (PRN85); Setúbal, que passa da posição 5 (PR45), para a posição 2 (PRN85); Coimbra, que passa da posição 6 (PR45), para a posição 4 (PRN85); Évora, que passa da posição 9 (PR45), para a posição 12 (PRN85), entre outros.

Existem contudo alguns lugares que, por força da diferente estrutura da rede e consequente nova composição (nós e arcos) do grafo, sofreram significativas mudanças de posição na ordenação do Pi, a saber: Lisboa, que se encontrava na posição 8 (PR45), passa para 35 (PRN85); Leiria, que passa de 58 posição (PR45), para a posição 6 (PRN85); Vila do Conde, que passa da 61 posição (PR45), para 8 (PRN85); Guimarães, que passa da 31 posição (PR45), para 11 posição (PRN85) e ainda Espinho, que passa da posição 93 (PR45), para a posição 17 (PRN85). Tais mudanças de posição na ordenação devem-se sobretudo a alterações do valor da população desses lugares entre os anos 1945 e 1985. Com efeito, com a excepção de Lisboa, quer perdeu quase uma centena de milhar de habitantes (INE, RGP 1940 e 1991) e daí a sua descida na

ordenação, todos os outros lugares mostraram ganho de população e consequente subida de posição na ordenação, ou seja ganho relativo de acessibilidade face aos outros lugares.

TABELA 26 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ P DO PR45

Ordenação	Lugar	Pi
1	**Montijo**	**3837.61**
2	Setúbal	3624.92
3	Gaia	3239.84
4	Coimbra	3184.39
5	Barreiro	3168.73
6	Leiria	2285.99
7	Braga	2143.71
8	Vila do Conde	1970.09
9	Almada	1941.57
10	Santarém	1930.04
11	Guimarães	1863.29
12	Évora	1702.03
13	Marinha Grande	1685.60
14	Faro	1503.94
15	Póvoa de Varzim	1439.50
16	Famalicão	1394.18
17	Espinho	1343.72
18	Vila Franca de Xira	1309.55
19	Olhão	1272.60
20	Matosinhos-Porto	1259.82
161	Fornos de Algodres	50.42
162	Sertã	49.29
163	Carriço	46.84
164	Vila Verde de Ficalho	40.51
165	Castro Marim	39.55
166	Penela	36.64
167	Trancoso	36.58
168	Ferreira do Zêzere	35.95
169	Vila Verde da Raia	28.46
170	Pedrógão Grande	27.63
171	Canal Caveira	26.48
172	Marvão	24.52
173	Santa Marta de Penaguião	23.93
174	Alvaiázere	23.43
175	Vila Nova de Cerveira	22.77
176	Sernancelhe	21.88
177	Caia	12.96
178	Aljezur	11.85
179	Segura	8.00
180	Avelar	2.82
35	**Lisboa**	**803.24**

Uma vez mais se verifica que a acessibilidade dos lugares determinada a partir das distâncias físicas mais curtas (Tabela 22), não coincide com nenhum dos lugares com maior potencial de interacção (Pi), o que sublinha a diferença entre distância topológica e distância física. Contudo, ao confrontarem-se os mapas resultantes de ambas as matrizes (Figuras 55 e 58), pode verificar-se que, embora os lugares cimeiros da ordenação de ambas as tabelas não se repitam, o padrão espacial derivado de L, está integrado no padrão espacial correspondente à linha do litoral ocidental, do Pi, o que deixa adivinhar uma maior tendência de aproximação entre os resultados obtidos pelos métodos do modelo anisotrópico, ou seja um maior esbatimento da diferença entre a distância topológica e a distância física no mundo real

Para o PRN2000, contrariamente ao experienciado para a rede do PR45 e confirmando a tendência do PRN85, verifica-se agora uma maior similitude entre os resultados apurados pelas matrizes L e P, referentes ao modelo anisotrópico, com reflexos evidentes no padrão espacial que se configura (Figura 59), e confirmados por vários lugares a surgirem em lugares similares na ordenação dos 20 iniciais (Tabela 27).

Numa análise comparativa entre os resultados das matrizes D, L e Pi, para o período entre o PRN45 e o PRN2000, aquilo que se verifica é:

- Uma maior similitude entre as matrizes de distâncias topológicas (D) e de distância física (L), e uma maior diferenciação destas com os resultados apurados pela matriz do potencial de interacção (Pi) dos lugares, para o grafo da rede do PR45, resultado da introdução da variável população na análise do Pi, e que estava ausente das matrizes D e L
- Uma situação de menor afinidade entre D e L, em favor de um ganho de proximidade entre os resultados de L e Pi, para o PRN2000. A introdução deste novo padrão é resultante de duas políticas dos planos rodoviários, nomeadamente a desafectação de algumas estradas de 'Itinerários principais e complementares' para 'outras estradas' e de se privilegiarem as ligações entre lugares mais distantes fisicamente uns dos outros.

FIGURA 59 POTENCIAL DE INTERACÇÃO DOS LUGARES DA REDE DO PRN2000

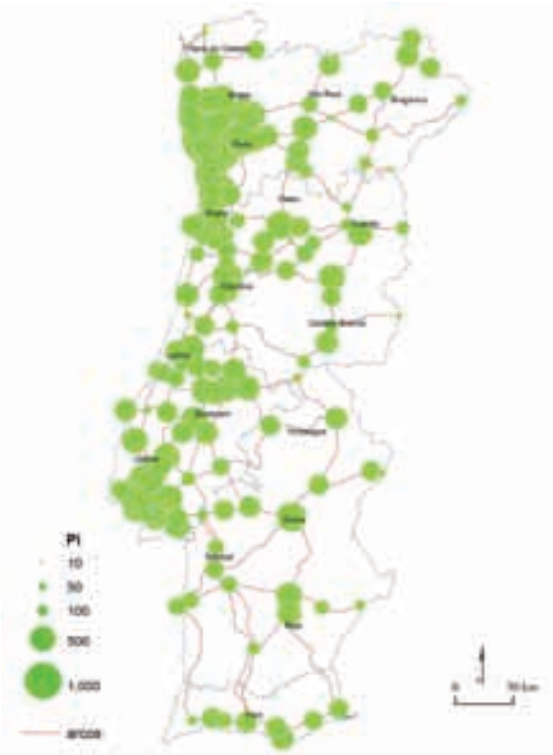


TABELA 27 HIERARQUIA DA REDE DE LUGARES, A PARTIR DA MATRIZ P DO PRN2000

Ordenação	Lugar	Pi
1	**Matosinhos - Vila do Conde**	**8023.74**
2	Maia	7598.24
3	Guimarães	6399.64
4	Ermesinde	6030.48
5	Famalicão	5780.22
6	Matosinhos	5596.13
7	Odivelas	5311.95
8	Póvoa de Varzim	5202.13
9	Vila do Conde	5199.60
10	Póvoa de Varzim - Esposende	4779.15
11	Rio Tinto	4715.31
12	Coimbra - Mealhada	4432.29
13	Aveiro	4336.44
14	Évora	4255.75
15	Viseu	3966.36
16	Sto Tirso	3952.28
17	Valongo	3942.63
18	Gondomar	3813.80

19	Ramada	3784.60
20	Alverca	3661.70
156	Palhais	151.45
162	Celorico da Beira	121.04
163	Miranda do Douro	119.28
164	Marateca	112.85
165	Coina	104.85
166	Vila Verde Ficalho	74.96
167	Vila do Bispo	68.93
168	Trancoso	65.09
169	Barragem do Fratel	44.14
170	Carriço	37.23
171	Óbidos	32.86
172	Caia	31.12
173	Murça	17.94
174	Vila Verde da Raia	16.81
175	nó Valença	12.21
176	Monfortinho	10.18
177	Barca de Alva	8.85
178	Penacova	7.91
179	Nelas	7.17
180	Valença	6.32
116	**Lisboa**	**776.12**

Da leitura do mapa (Figura 59) verifica-se que, embora os padrões espaciais se mantenham tal como nos PR45 e PRN85, existem contudo algumas alterações na configuração do padrão. A linha litoral ocidental aparece agora mais sinuoso e menos linear, com recuos no Distrito de Coimbra, e extensões s para o interior, junto às Áreas Metropolitanas do Porto e até Guimarães, a norte, e a Área Metropolitana de Lisboa até Santarém, a sul.

Quanto ao litoral sul, o padrão que o Pi mostra, configura-se num eixo de relação dos lugares do Sotavento e do Barlavento, sempre mais junto à costa em detrimento do interior. Estes são padrões que revelam uma estrutura da rede que privilegia o litoral e as ligações entre as principais cidades.

Menos modificado está o padrão do corredor interior, que continua a mostrar forte resiliência às alterações de geografia e topologia, com os lugares de Beja, Évora, Estremoz, Portalegre, Ponte-de-Sôr, Castelo Branco, Guarda, Viseu, Peso da Régua, Vila Real e agora também Bragança, a acentuarem as suas posições na hierarquia, abafando a capacidade gravítica dos restantes lugares do Interior (cf. Tabela 27 e Anexo). Quanto aos lugares de Miranda do Douro, Barca de Alva, Vilar Formoso, Monfortinho, Caia e Vila Verde de Ficalho, as suas excentricidades espaciais, reforçadas pela menor acessibilidade e baixo valor da população aí residente, determinam o seu baixo Pi.

Numa análise mais local, verifica-se um alargamento da expressão espacial do Pi de lugares da periferia do Porto, onde a coesão é relativamente maior, até norte (Viana do Castelo, Guimarães, Famalicão), e para sul (Coimbra, Mealhada), todos ligados

pela IC1, IP1 e IC2, num contínuo ininterrupto. É ainda a norte, que mais se nota o reforço do Pi dos lugares que compõem o polígono transversal litoral/interior (Aveiro, Coimbra, Guarda e Viseu).

Mais a sul, por comparação, a expressão espacial do Pi da Área Metropolitana de Lisboa é curiosamente radiada a partir de Odivelas (cf. Figura 59), Tal deve-se, conforme o formalismo de cálculo do Pi deixa antever, sobretudo às características topológicas regionais, que consistem nomeadamente numa maior acessibilidade entre os lugares a norte (existe um anel rodoviário que garante baixas distâncias topológicas entre todos os lugares) e também a maiores valores relativos da população desses lugares. A sul, as ligações rodoviárias privilegiam as ligações mais distantes, o que influencia determinantemente o Pi desses lugares, não obstante aí se localizarem alguns dos 20 mais populosos lugares, nomeadamente Lisboa, Amadora, Costa da Caparica, Almada e Setúbal.

6.3. O PROBLEMA 'MUNDO PEQUENO' PARA ANÁLISE DA EFICÁCIA E VULNERABILIDADE DA REDE DE TRANSPORTES RODOVIÁRIOS

As métricas da Teoria dos Grafos para estudar e medir as características estruturais das redes não se esgotam nos algoritmos de Kansky e Shimbel. No final do séc. XX, impulsionada pela incursão das redes pelos mais variados sistemas e domínios (quer do saber, quer do negócio) e pela internet, surge uma 'nova ciência': a ciência das redes (Barabási, 2003; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Bersini, 2005; Watts, 2004), com novos algoritmos para tentar perceber melhor a realidade estrutural subjacente às estruturas em rede, e por elas descritas.

À medida que muitas das redes espaciais, que os geógrafos estudam, de estradas, de ferrovias, de telecomunicações, de saneamento, entre outras, foram adquirindo maior dimensão, por aumento do nível de conforto e de qualidade de vida das sociedades, deixou de ser possível a monitorização às suas dinâmicas de uma forma evidente e manual. O desenvolvimento da computação e a ubiquidade da internet por todos os domínios da sociedade e da ciência e tecnologia veio permitir não só a integração da algoritmia da Teoria dos Grafos nos modelos geográficos de base matemática, mas também o desenvolvimento de novos métodos e algoritmos. O Problema 'Mundo pequeno' é um desses exemplos, cujas métricas vêm ajudar a melhor compreender a implicação das redes no território, bem como ajudar à exploração da evolução estrutural das redes em contexto espacial (Xie; Levinson, 2006).

Estudos acerca das redes complexas e das propriedades 'Mundo pequeno' das redes têm recebido especial atenção nos últimos anos (Watts e Strogatz, 1998; Strogatz, 2001; Batty, 2001; Barabási *et al*, 2002, 2003; Watts, 2004; Xu e Sui, 2007), com físicos, matemáticos e sociólogos com formação matemática a criarem medidas e modelos capazes de avaliar as propriedades estruturais das redes, e a prever os seus comportamentos. Uma rede 'Mundo pequeno' é uma rede que se encontra, quer do ponto de vista do modelo representacional, quer da sua estrutura e das propriedades dos

seus arcos e nós, a meio caminho entre as chamadas redes regulares[118] e redes aleatórias (Watts; Strogatz, 1998; 2004).

Do ponto de vista métrico, as análises empíricas denotaram que as redes 'Mundo pequeno' são caracterizadas por apresentarem simultaneamente altos índices de acessibilidade, ou seja, baixos valores de caminho-mais-curto (D), o que é próprio das redes aleatórias, e um elevado coeficiente de *clustering* (Cc), típico das redes regulares. A conjugação destas duas medidas, vem possibilitar uma nova perspectiva da influência das redes sobre o território (Jiang, 2006; Xu; Sui, 2007), permitindo medir e avaliar a densidade de conexões na vizinhança de um nó, a eficácia da estrutura da rede (facilidade de fluxo entre os diferentes nós da rede), e a sua vulnerabilidade (importância das ligações na conectividade da rede). (Watts e Strogatz, 1998; Dorogovtsev e Mendes, 2003; Watts, 2004).

Para grafos planares[119] e não-orientados, o Coeficiente de *clustering* (*Cc*) de um nó *ni* vem traduzir a densidade de conexões na vizinhança desse nó. É medido de acordo com o rácio entre as ligações que os seus vizinhos têm e o total de ligações possíveis entre eles. Formalmente:

$$Cc_i = \frac{k_i}{3(k\text{-}2)}$$

em que *ki* é o número de arcos (ligações directas)[120] ligados ao nó *ni*, e 3(*k*-2) o número de possíveis ligações (outros arcos) entre todos os vizinhos de *ni*; sendo k, o número de nós vizinhos de *ni.*

O *Cc* assume valores no intervalo compreendido entre {0, 1}, sendo que 1 significa que todos os nós vizinhos de i estão ligados entre si; e 0, quando não existe qualquer ligação entre os vizinhos de i. Em ambos os casos podem ou não (caso em que existem subgrafos) estar ligados aos outros nós do grafo.

Para análise da totalidade do grafo, o *Cc* consiste na média dos *Cc* verificados para cada um dos nós do grafo, ou seja:

$$Cc_i = \frac{\sum_{i\text{-}1}^{n} \left(\frac{k}{3(k - 2)}\right)}{n - 1}$$

e surge como uma medida de conectividade e de facilidade de ligação que o grafo permite.

Quanto ao cálculo da medida de acessibilidade D (cf. Cap. 2), o que importa é sobretudo o índice de acessibilidade média de Shimbel (D_t), e não o índice de cada um

118 Cf. Cap.3.

119 O algoritmo encontrado na literatura da especialidade apenas fazia referência a grafos não planares, pelo que o algoritmo que aqui se aplica é foi adaptado e ajustado, uma vez que se está a trabalhar com redes cujos grafos são planares.

120 Valor retirado da matriz de conectividade C^1 (cf. Cap. 2).

dos nós da rede (D). Claro que para se obter o índice geral é necessário efectuar-se primeiro a análise individual dos nós da rede.

Índice de acessibilidade de Shimbel (*D*)[121]

$$Di = \sum_{j-1}^{n} dij$$

Índice de acessibilidade média de Shimbel (Di_t)[122]

$$Dit = \frac{\sum_{j-1}^{n} dij}{n - 1} \quad ,$$

Assim, seguindo a metodologia adoptada para a análise das redes com base na Teoria dos Grafos, far-se-á também agora uma análise faseada pela cronologia das redes, começando pela Rede de Estradas Romanas, passando pela Rede de Itinerários de 1800, Rede do PR45, do PRN85, até à Rede de estradas do PRN2000 (cf. Tabela 28).

TABELA 28 MEDIDAS MUNDO PEQUENO: COEFICIENTE DE CLUSTERING E ACESSIBILIDADE MÉDIA DE SHIMBEL

	Cc	Cc100	Di_t	Dit100
Romanos	0.35	35	1293	12.93
Itinerários de1800	0.54	54	2828	28.28
PRN45	0.57	57	5201	52.01
PRN85	0.41	41	2066	20.66
PRN2000	0.51	51	1762	17.62

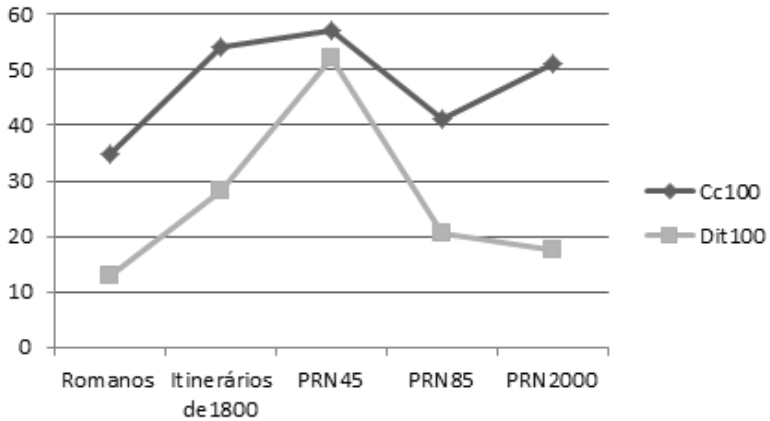
Da leitura da tabela pode verificar-se que existe uma relação entre os valores *Cc* das redes e as distâncias dos nós dessas mesmas redes. Para uma leitura mais clara das propriedades 'Mundo pequeno' das redes, ajustam-se e simplificam-se os resultados (*Cc100* e *Dit100*), referente aos valores de *Cc* e Di_t respectivamente, multiplicado por 100, no primeiro caso e, dividido por 100, no segundo caso.

Pela leitura do gráfico de linhas pode verificar-se que a dinâmica das redes de estradas, a partir de uma determinada altura (PRN85), deixa de ser tipicamente regular, (com altos coeficientes de *clustering*), ou tipicamente aleatórias (com baixos índices de distâncias mais-curtas entre os seus nós), para passarem a ser redes 'Mundo pequeno', que evidenciam ambas as características, ou seja, um elevado *Cc* e um baixo Di_t, conforme o PRN2000 atesta.

121 Que significa a soma das distâncias topológicas de um nó a todos os outros nós do grafo, ou seja indica o número de arcos a percorrer, num caminho-mais-curto, para se chegar de um nó *i* ao nó *j*.

122 Que representa a média do somatório das distâncias topológicas de um nó a todos os outros nós do grafo.

FIGURA 60 EVOLUÇÃO DAS PROPRIEDADES 'MUNDO PEQUENO, PARA A REDE DE ESTRADAS DE PORTUGAL CONTINENTAL



Em suma, e atendendo às características 'Mundo pequeno' e às implicações que têm sobre o território, a rede de estradas do PRN2000 denota ser uma rede eficaz, na medida em que permite bom fluxo (de informação, bens, pessoas, etc.) ao longo dos seus arcos e com o intuito de servir os nós que a compõem. O alto coeficiente de *clustering* (Cc > 0.5) assinala, por sua vez, a boa conectividade dos nós, o que uma relativa facilidade de acesso entre os nós (relativamente baixo Di_t), vem demonstrar isso mesmo.

Outra das características estruturais que as redes ocultam, mas que as medidas obtidas pela Teoria dos Grafos e das Redes Complexas mostram é a vulnerabilidade da rede. Apesar de ser uma característica estrutural da rede, a vulnerabilidade da rede obtém-se pela análise individual dos nós, a partir das relações que desenvolvem uns com os outros. Tendo sido originalmente introduzido pela Sociologia (Freeman, 1977), só mais tarde, pela mão dos cientistas físicos (Kim, *et al*, 2002) é que são testados noutras redes, especialmente nas redes da *World Wide Web* e internet (Barabási, 2003).

A medida de vulnerabilidade foi designada por Freeman de *betweenness* (grau de intermediação ou coeficiente de influência) enquanto uma medida de centralidade das Redes Complexas, que permite expressar o controlo, a importância ou a influência de um ou mais nós sobre o fluxo da rede, identificando um ou mais nós responsáveis. Ou seja, a medida determina qual o nó que mais vezes é 'ponte' no caminho-mais-curto (caminhos geodésicos) entre todos os nós da rede.

Para verificar qual o nó ou quais os nós com maior influência sobre o fluxo da rede, adoptou-se o algoritmo de Freeman, (*B*):

$$B_m = \frac{P(i, m, j)}{P(i, j)} \quad ,$$

Para verificar analisar a totalidade da rede:

$$B_m = \sum_{i-j} \frac{P(i, m, j)}{P(i, j)}$$

em que o número total de caminhos mais-curtos entre os nós *i* e *j* é *P(i,j)* > 0, e *P(i, m, j)* significa que na comunicação de *i* e *j*, passa-se por *m*.

Ao adaptar-se mais esta medida das Redes Complexas à Geografia, e em particular às redes das estradas de Portugal Continental, espera identificar-se e medir, qual ou qual(is) o(s) lugar(es), no decurso da evolução da rede de estradas, que mais influência exerceram e, simultaneamente, qual é ou quais são, os que maior vulnerabilidade trazem à rede. Ou seja, quanto maior o valor obtido, maior é a influência do nó na rede e, ao mesmo tempo, maior a vulnerabilidade da rede, no caso de esse nó ser eliminado de dela.

As tabelas e figuras abaixo permitem, quer a identificação, quer a quantificação do ou dos lugares que maior influência exercem sobre o fluxo da rede. Contudo, e tal como nas medidas anteriores, dado o elevado número de nós e arcos de algumas das redes, apenas se fará aqui nota dos 5 mais influentes, remetendo-se a totalidade das métricas dos outros nós para anexo.

Assim, para a primeira rede (Rede de Estradas Romanas), os lugares 'ponte' são:

TABELA 29 LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO, SEGUNDO AS ESTRADAS ROMANAS

Lugar	*B*
Scallabis (Santarem)	1712.00
Arabriga (Alenquer)	1711.00
Terrugem	1693.00
Ad Septem Aras (Campo Maior)	1681.00
Emerita (Mérida)	1680.00

Apesar de se ter destacado os 5 lugares com maior grau de intermediação da rede, são claramente os 2 primeiros (Scallabis e Arabriga) os que maior poder têm no controlo do fluxo da rede, ou seja, são os lugares pelos quais mais vezes se tem de passar para ir de qualquer nó para outro nó da rede, seguindo o caminho-mais.curto. A figura 61, com a georreferenciação dos lugares na rede, ajuda a melhor perceber a relativa disposição destes lugares em relação aos outros.

FIGURA 61 GRAFO DA REDE DE ESTRADAS ROMANAS COM IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES COM MAIS GRAU DE INTERMEDIAÇÃO

Estes resultados indicam ainda tratar-se de uma rede muito vulnerável (cf. 6.4.), pouco complexa do ponto de vista da sua estrutura, com débil organização espacial. A eliminação de um nó da rede leva imediatamente à quebra de fluxo na rede e à criação de sub-grafos.

Chama-se a atenção para o facto de, apesar do algoritmo do caminho mais-curto (D) estar na base de cálculo do índice de Freeman (*B*), isso não implica que tenha de existir coincidência de lugar, ou seja, que o lugar com maior índice D (o que está mais perto de todos os outros), seja forçosamente o lugar com maior grau de intermediação (*B*).

No caso das Estradas Romanas, o lugar próximo da rede, relativamente a todos os outros (com maior índice D) é Ad Septem Aras (Campo Maior), enquanto Scallabis (Santarem) é o lugar que é mais vezes nas ligações entre todos os lugares da rede.

É óbvio que se pode também verificar casos em que o lugar mais acessível, segundo D, seja também o que apresenta maior grau de intermediação segundo *B*. Com efeito, é o que se verifica na Rede de Itinerários de 1800 (Tabela 30), em que os lugares identificados como os com maior grau de intermediação são:

TABELA 30 LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO, SEGUNDO A REDE DE ITINERÁRIOS DE 1800

Lugar	*B*
Madalena	15114.37
Pavia	13380.63
Arraiolos	13301.60
Asseiceira	13180.38
Tomar	12741.57

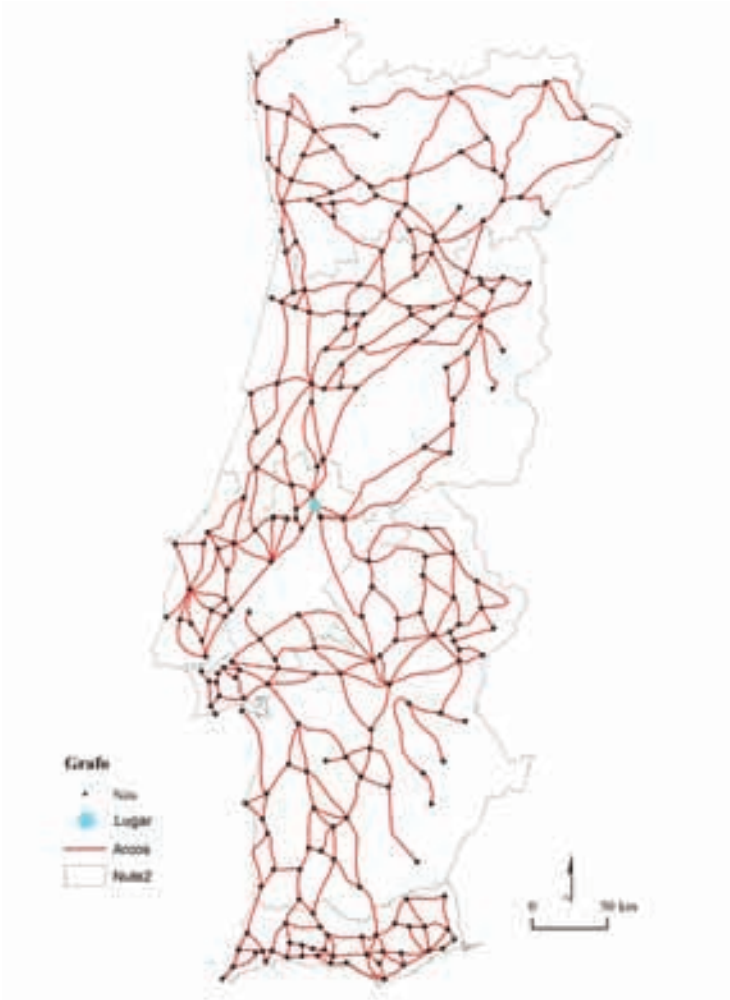
Numa leitura cruzada entre os lugares cimeiros das tabelas D e B, pode comprovar-se que o lugar de Madalena é também o mais acessível entre os outros que constam da tabela 30. Esta situação decorre do facto de se estar na presença de uma rede que dominantemente se assume como regular, ou seja, com elevado coeficiente de *clustering* (graus de conectividade muito semelhante entre todos os nós da rede).

Comparando estes resultados com os obtidos para a Rede de Estradas Romanas, cujos valores de *B* ponham em evidência dois nós, no caso da Rede de Itinerários de 1800, apenas um lugar (Madalena) se destaca.

Quanto à disposição espacial que ocupa relativamente aos outros lugares que compõem a rede, veja-se a Figura 62 abaixo.

Considerando a estrutura em malha da rede e uma equilibrada distribuição dos lugares por todo o território encontra-se a justificação para o padrão espacial que mostra uma maior proximidade física entre o lugar mais acessível (cf. Figura 37 - Madalena), o lugar mais central (Figura 38 - Abrantes) e o lugar mais com maior grau de intermediação (Figura 62 - Madalena).

FIGURA 62 GRAFO DA REDE DE ITINERÁRIOS DE 1800, COM IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO



Para a Rede do PR45, igualmente muito ramificada e com uma boa cobertura do território, os lugares que revelam um maior grau de intermediação são:

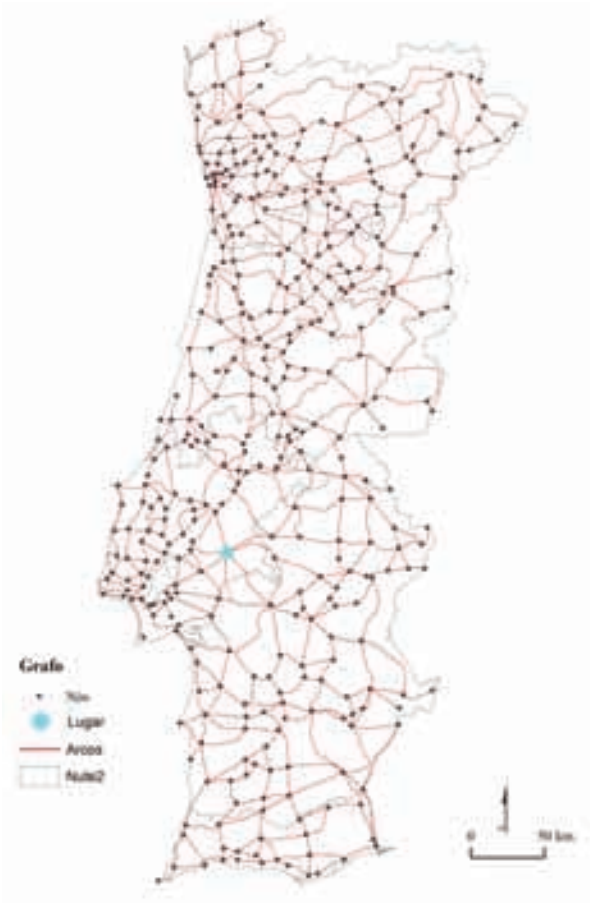
O que se verifica para esta rede do PR45, é que entre os lugares mais acessíveis (evidenciados pela matriz D) e os lugares com maior grau de intermediação *B*, apenas o lugar de Castelo Branco, que se posiciona entre os 10 mais acessíveis, surge na tabela dos lugares com maior grau de intermediação, embora com um índice muito inferior. Todos os restantes lugares apresentam agora, relativamente ao número de passagens de caminhos-mais-curtos, valores bastante abaixo dos máximos (cf. Anexo).

TABELA 31 LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO, SEGUNDO O PR45

Lugar	*B*
Coruche	23119.31
Montemor-o-Novo	17972.18
Fundão	17513.38
Alpalhão	16133.83
Castelo Branco	15897.65

Contudo, ao proceder-se ao mapeamento dos resultados devolvidos pelo modelo, o padrão espacial volta a revelar a existência de uma proximidade espacial entre o lugar acessível (Figura 40), com os lugares mais centrais (Figura 41) e de maior grau de intermediação (Figura 63).

FIGURA 63 GRAFO DO PR45, COM IDENTIFICAÇÃO DO LUGAR COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO



Para o ano de 1985, o Plano Rodoviário Nacional traçado vem uma vez mais revelar a importância da litoralização, na espacialização e estrutura da rede de estradas de Portugal Continental. Da leitura da tabela 32, verifica-se que são os lugares de Coimbra e de Leiria os que apresentam maiores graus de intermediação da rede, logo secundados por Condeixa e Pombal e, embora já com menor peso nas ligações caminho-mais-curto na rede, surge Coruche, que assim continua passados 40 anos, como um dos lugares 'ponte' da rede de estradas, isto é, como um dos lugares pelo qual mais vezes se passa para se movimentar entre lugares na rede de estradas do PRN85

TABELA 32 LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO, SEGUNDO O PRN85

Lugar	*B*
Coimbra	5541.82
Leiria	5473.53
Condeixa	4834.03
Pombal	4744.40
Coruche	3901.26

Se comparados os quadros do grau de intermediação de 1945 com o de 1985, verifica-se que existe uma mudança na hierarquia, cuja materialização no território se manifesta com um movimento de aproximação para o litoral. Destaque ainda para o facto de se verificar a existência de uma semelhança entre os lugares que ocupam o topo da hierarquia dos mais acessíveis (Tabela 15), com os lugares de maior grau de intermediação (Tabela 32) aliás, tal como já se havia constatado através da Rede de Itinerários de 1800.

A sublinhar o que atrás foi referido acerca da análise comparativa entre os lugares em destaque, atente-se às figuras 43 (do lugar mais acessível), à figura 44 (do lugar mais central) e à figura 63 (do lugar com maior grau de intermediação), que mostram um padrão espacial revelador da existência de maior proximidade espacial entre esses lugares, a saber: lugares mais acessíveis (Leiria, Pombal, Condeixa, Fátima, …); lugar mais central (Ansião) e lugar com maior grau de intermediação (Coimbra).

No PRN2000, com um aumento do número de arcos e ligeira alteração ao número de nós, foi óbvio o aumento de conectividade (maior *Cc*) e o encurtamento das distâncias (menor D). Mas que implicações podem essas mudanças provocar na rede em termos de vulnerabilidade da rede e da localização do nó ou nós 'ponte' na geografia da rede? E que diferenças ou semelhanças se vão agora revelar entre as principais medidas de análise à estrutura da rede?

FIGURA 64 GRAFO DO PRN85, COM IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO

TABELA 33 LUGARES COM MAIOR GRAU DE INTERMEDIAÇÃO, SEGUNDO O PRN2000

Lugar	*B*
Coimbra	5688.84
Anadia	4709.11
Condeixa	4568.86
Ansião	4291.94
Albergaria-a-Velha	3962.07

A tabela dos valores do grau de intermediação dos lugares da rede do PRN2000, vem mostrar a tendência que já se adivinhava, tanto pela relação entre os valores obtidos para as outras redes, como pela estrutura da rede quanto à distribuição espacial dos lugares (nós da rede), o que ajudar a explicar uma maior coincidência espacial entre os lugares mais acessíveis (Tabela 16), o nó mais central da rede (Figura 51) e o lugar de maior grau de intermediação (Figura 65).

FIGURA 65 GRAFO DO PRN2000, COM IDENTIFICAÇÃO DOS LUGARES COM MAIS GRAU DE INTERMEDIAÇÃO

Da análise à figura 64, a expressão geográfica que ressalva é uma maior concentração de arcos e de nós junto do litoral e um vazio a sueste de Coimbra e noroeste de Castelo Branco. Realidade que aliada à única ligação Castelo Branco, Covilhã vem tornar fulcral a posição de Coimbra no contexto das ligações rodoviárias nacionais. Com efeito, se atentarmos bem ao mapa, verifica-se que o PRN2000 adquiriu quase a forma de um 'laço', com Coimbra a fazer de nó.

Acerca dos resultados que a medida de Freeman (*B*) mostra sublinhe-se o facto de que, quanto maior for o valor do grau de intermediação e maior a diferença entre esse valor e os valor obtidos para os restantes lugares, maior é vulnerabilidade da rede, ou seja maior é a dependência da rede face ao lugar com maior grau de intermediação. Tentando apontar algumas das consequências da dependência da rede a um lugar, no que respeita à rapidez (caminho-mais-curto) de circulação, destaquem-se os problemas de trânsito, nomeadamente o congestionamento de tráfego, os problemas económicos, que se traduzem na perda de tempo, aumento do consumo de gasolina, no desgaste das viaturas, e na diminuição de produção, os problemas sociais, com reflexo ao nível da saúde dos automobilistas, e os problemas ambientais, mais precisamente o aumento da poluição, tanto da atmosfera como sonora. Em síntese, pode-se afirmar que o grau de intermediação é para a Geografia, uma medida fundamental ao exercício de planeamento e da análise espacial.

6.4. ANÁLISE COMPARATIVA

Apesar de já se ter vindo a fazer uma leitura comparativa entre as medidas efectuadas, ao longo dos pontos anteriores deste capítulo, existem algumas medidas-chave para a compreensão do efeito das alterações da rede de transportes sobre o território, desde a estrutura viária implantada pelos Romanos até ao PRN2000:

- Medidas estruturais e de conectividade: índice alfa (α), o índice gama (γ), o diâmetro da rede e o coeficiente de *clustering* (*Cc*) que relembre-se, medem respectivamente o grau de conectividade da rede, através da avaliação do seu estado de maturidade e da influência das relações vizinhas entre os nós na eficiência da rede;
- Medidas de Acessibilidade e centralidade[123]: índice de distâncias mais-curtas (D), o índice de distâncias físicas mais-curtas (L), o Potencial de interacção (Pi) e o grau de intermediação de Freeman (*B*) que relembre-se, medem respectivamente a facilidade de circulação na rede, o potencial de interacção de um nó relativamente a todos os outros nós da rede e o nó pelo qual mais vezes se tem de passar para nos deslocarmos na rede;
- Medidas de Distribuição espacial: medida de centralidade e a medida de tendência de distribuição, cujo significado é de mostrar qual a tendência espacial de evolução da rede de estradas e comparar com a rede de cidades

Para as medidas estruturais e de conectividade, a tabela seguinte faz a síntese e permite a comparação dos valores obtidos ao longo do período de evolução das redes de estradas.

Na análise da tabela, destaque-se a semelhança dos resultados obtidos, para o índice gama (γ), e para o coeficiente de *clustering* (*Cc*), o que significa que só pontualmente é que as relações de proximidade entre os nós revelam alguma diferença face às relações entre todos os nós Para além disso, a constituir também nota de referência óbvia é a proporcionalidade que existe entre os índices de conectividade ($\boldsymbol{\alpha}$), (γ)

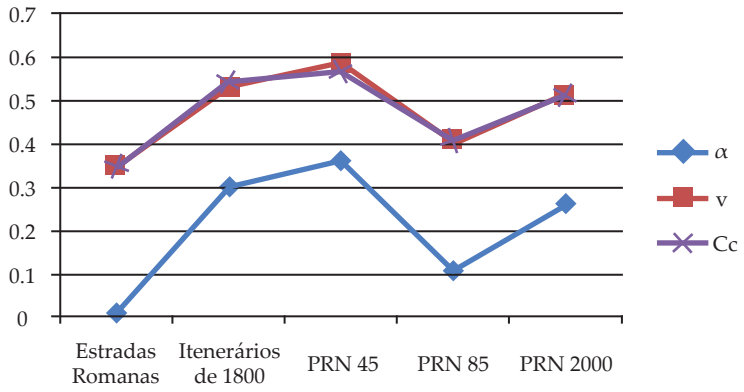
123 Como estas são características de cada um dos nós da rede, e dado o elevado número de nós, as tabelas inseridas somente destacam os primeiros 10 nós. As tabelas na íntegra estão nos Anexos.

TABELA 34 VALORES DAS MEDIDAS ESTRUTURAIS E DE CONECTIVIDADE PARA AS REDES DE ESTRADAS DE PORTUGAL CONTINENTAL.

	α	γ	Diâmetro	*Cc*
Estradas Romanas	0.01	0.35	42	0.35
Itinerários de 1800	0.30	0.53	31	0.54
PRN45	0.36	0.58	37	0.57
PRN85	0.11	0.41	35	0.41
PRN2000	0.26	0.51	26	0.51

e (*Cc*), como de resto é fácil verificar pelo gráfico 2, abaixo, e que significa que se tratam de medidas que acima de tudo se complementam, mais do que diferem. Ou seja, em conjunto permitem ao analista tirar conclusões com maior segurança, do que analisadas individualmente (cf. Cap. 2 e Cap. 3).

FIGURA 66 EVOLUÇÃO DOS ÍNDICES ESTRUTURAIS E DE CONECTIVIDADE DAS REDES DE ESTRADAS DE PORTUGAL CONTINENTAL



Numa análise geral das redes, o que estes valores vêm dizer é que se partiu de uma rede de fraca conectividade, desconexa e com uma estrutura em árvore (ou espinha), em que faltam caminhos alternativos para circular entre os lugares (nós) que compõem a rede, para uma rede com índices de conectividade elevados, coesa e com vários caminhos alternativos para ir de um lugar para outro. Nesta perspectiva estrutural, pode afirmar-se que a rede de estradas em Portugal Continental foi gradualmente ganhando uma maturidade cujo reflexo territorial se verificou com uma aproximação geral dos lugares (como mostra a diminuição do diâmetro da rede e o aumento dos restantes indicadores de conectividade) e, consequentemente, um aumento da eficiência da rede, conforme dá indicação o aumento do *Cc*.

Ainda referente aos indicadores estruturais, que devem ser sempre lidos conjuntamente, conforme se menciona no Cap. 2, pode constatar-se dois períodos-chave: o que antecede o PR45 e o que sucede ao PR45. Até ao PR45 é fácil perceber que a rede foi ganhando conectividade com o contínuo aumento dos índices (α) e (γ); contudo, do PR45 para o PRN85, o que se verificou foi uma diminuição desses mesmos índices (cf. Cap. 2), o que levaria a supor que a rede tinha retrocedido no processo natural de aumento de conectividade e coesão.

Todavia, e tal como atrás se fez referência, estes valores não podem ser lidos isoladamente; o facto de ter existido uma diminuição do indicador de diâmetro da rede, significa que houve um encurtamento das distâncias entre os lugares mais afastados da rede e, por conseguinte, um ganho de coesão. O território encolheu.

O período marcado pela passagem do PRN85 ao PRN2000 vem reforçar esta conclusão. Com efeito, apesar de uma diminuição da complexidade da rede (menor número de nós e arcos), a estrutura da rede, ou seja, a forma como os nós se ligam uns aos outros através dos arcos aumenta a sua conectividade e coesão, apesar a diminuição do diâmetro da rede, e dos índices (α) e (γ) voltarem a subir.

Quanto à análise interna da rede, as medidas de acessibilidade e centralidade vão mostrar as características individuais dos nós e dos arcos, dando conta, de um modo geral, não só da maior ou menor facilidade de deslocação entre os nós, mas também identificando e hierarquizando quais os nós e os arcos responsáveis pelo ganho ou perda de eficiência da rede. A tabela abaixo (Tabela 35) permite fazer essa leitura, ao longo da evolução temporal das redes.

TABELA 35 LUGARES COM MAIORES VALORES NAS MEDIDAS DE ACESSIBILIDADE E DE CENTRALIDADE PARA AS REDES DE ESTRADAS DE PORTUGAL CONTINENTAL

	Medida de distância topológica (D)	**Medida de distância física (L)**	**Potencial de interacção (Pi)**	**Grau de intermediação (*B*)**
Estradas Romanas	Ad Septem Aras (Campo Maior)	Aritium Vetus (Alvega)	-	Scallabis (Santarem)
	Emerita (Mérida)	Alpiarça	-	Arabriga (Alenquer)
	Assumar	Tubucci (Tramagal)	-	Terrugem
	Elvas	Almeirim	-	Ad Septem Aras (Campo Maior)
	Abelterium (Alter do Chão)	Marateca	-	Emerita (Mérida)
Itinerários de 1800	Madalena	Ansião	-	Madalena
	Asseiceira	Tomar	-	Pavia
	Pavia	Alvaiázere	-	Arraiolos
	Tomar	Madalena	-	Asseiceira
	Arraiolos	Asseiceira	-	Tomar

PR45	Sertã	Palhota	Porto	Coruche
	Orvalho	Amêndoa	Vila Nova de Gaia	Montemor-o-Novo
	Vila de Rei	Vila de Rei	Coruche	Fundão
	Sardoal	São João do Peso-Cardigos	Leça do Bailio	Alpalhão
	Vila Velha de Ródão	Cardigas	Setúbal	Castelo Branco
PRN85	Leiria	Gafanha da Nazaré	Montijo	Coimbra
	Pombal	Ílhavo	Setúbal	Leiria
	Condeixa	Vagos	Gaia	Condeixa
	Fátima	Aveiro	Coimbra	Pombal
	Alcanena	Alverca	Barreiro	Coruche
PRN2000	Coimbra - Mealhada	Leça do Balio	Matosinhos - Vila do Conde	Coimbra - Mealhada
	Anadia	Infesta - Porto	Maia	Anadia
	Condeixa	Gaia	Guimarães	Condeixa
	Ansião	Porto	Ermesinde	Ansião
	Penacova	Matosinhos	Famalicão	Albergaria-a-Velha

A análise aos resultados expostos na tabela 35 deve ser feita de duas formas: na horizontal, faz-se uma comparação entre os lugares que permanecem, ou não, entre os 5 de topo na hierarquia estabelecida a partir dos valores das medidas da Teoria dos Grafos e das Redes Complexas; na vertical, podem-se comparar as mudanças ocorridas para as diferentes redes de estradas, no que se reporta aos lugares mais acessíveis, com maior potencial de interacção e maior grau de intermediação.

Da leitura na horizontal da tabela, conforme se pode verificar pelas células a cor cinza, existem alguns lugares que permanecem no topo da hierarquia das medidas enunciadas, o que é revelador da influência da estrutura da rede face ao território, ou seja à organização e padrão espacial que se formam.

Para as Estradas Romanas, são Ad Septem Aras (Campo Maior) e Emerita (Mérida), são os lugares que se repetem, assinalando também alguma semelhança (porque não são simultaneamente topo da hierarquia de todas as medidas) entre D (lugares mais acessíveis) e *B* (lugares por onde mais vezes se tem de passar para nos deslocarmos na rede).

Quando se passa à análise das medidas para a Rede de Itinerários de 1800, a disposição espacial dos lugares sobressai (fruto de uma mais equitativa cobertura do território pela rede) e as semelhanças entre as medidas aumenta, com os lugares Madalena e Asseiceira a permanecerem, ou seja, são simultaneamente os lugares mais acessíveis topologicamente (D), dos mais acessíveis fisicamente (L) e os que mais vezes intermedeiam as possíveis ligações entre lugares da rede (*B*).

A rede de estradas do PR45 vem reforçar ainda mais as semelhanças entre os resultados obtidos a partir dos modelos isotrópico (D) e dos modelos anisotrópico (L), com

Vila de Rei a permanecer como sendo o 3º lugar mais acessível da rede. Isto significa que a forte conectividade da rede (confirmada pelos indicadores de conectividade atrás referidos) é assegurada sobretudo por relações de vizinhança, isto é, de ligações directas entre vizinhos.

Saliente-se ainda, para a rede do PR45, o facto de o lugar com maior grau de intermediação (*B*), não ser também o mais acessível se acordo com a medida de distância topológica (D), nem da medida de distância física (L), embora seja um dos lugares que maior poder gravítico revela (Pi) e que maior grau de intermediação apresenta Referimo-nos a Coruche que, fruto da estrutura em malha da rede, boa cobertura do território desta e do facto de haver altos valores de acessibilidade para a maioria dos lugares, assim surge como um lugar de grande influência na facilidade de circulação na rede e do seu grau de eficiência.

Para o PRN85, duas situações merecem referência:

- Ao contrário do verificado para o PR45, em que a estrutura muito equilibrada da rede no território justificava a proximidade espacial entre os lugares mais influentes e atenuava as diferenças entre os resultados das medidas D e L, o que se verifica agora é a permanência de lugares mais acessíveis topologicamente (D) e com maior grau de intermediação na rede (B). A justificação para esta situação decorre, uma vez mais, da mudança na estrutura espacial da rede, e que se traduz por um privilegiar das ligações entre os lugares mais afastados na rede e uma diminuição do peso das relações de vizinhança. Leiria, Pombal e Condeixa permanecem como sendo os mais acessíveis topologicamente e também os que maiores graus de intermediação revelam.
- Tal como verificado para a rede do PR45, um dos lugares com maior poder de interacção é também o lugar que maior grau de intermediação apresenta, e que no caso é Coimbra. Ocorre assim uma mudança espacial, relativamente a PR45, de Coruche para Coimbra, o que evidencia uma politica de litoralização da rede, no que respeita aos itinerários principais e complementares.

Para o PRN2000, a leitura da tabela 35 vem agora mostrar que o lugar com maior potencial de interacção já não é o lugar que também, maior grau de intermediação apresenta. O retomar do reforço das ligações regionais e consequentemente das relações de vizinhança, faz com que a influência de D e L reassumam importância na rede.

Contudo, como a estrutura da rede não sofreu significativas transformações, como confirmam os resultados das medidas de conectividade da rede (cf. 6.1.) permanece como característica da rede a semelhança de resultados manifestada pelos lugares topologicamente mais acessíveis (D) e os lugares com maior grau de intermediação (B). Coimbra, que no PRN85 era o lugar em destaque, vai continuar a sê-lo, na política rodoviária materializada pelo PRN2000.

Numa síntese, e conhecendo a distribuição dos lugares pelo território, de resto assinalada pelos mapas que foram sendo apresentados nos pontos 6.1., 6.2. e 6.3. deste capítu-

lo, o que sobressai dos resultados obtidos pelas medidas de acessibilidade e centralidade, é uma gradual litoralização dos nós e arcos que compõem a rede e uma deslocação para norte do grupo dos lugares mais acessíveis, mais centrais, com maior grau de intermediação e com maior potencial de interacção. Este é de resto um padrão espacial que os resultados das medidas de distribuição territoriais (Tabela 36 e Figura 65) deixam perceber e que se vinha configurando no território já desde as Estradas Romanas.

As Medidas de distribuição espacial (nomeadamente a medida central e da elipse do desvio padrão), que permitem sobretudo resumir as localizações dos lugares (nós) da rede no território, quando confrontadas com as medidas topológicas da rede, permitem confirmar, ou não, tendências de emergência de padrões espaciais.

Relembrando, a medida central é uma função determinada a partir do somatório das distâncias euclidianas (D_e) entre um nó e todos os outros nós. Quanto menor o seu valor, mais central a localização do nó no espaço geográfico. A elipse do desvio padrão vai verificar a existência ou não de uma tendência de distribuição espacial em torno do nó mais central a partir de uma determinada distribuição espacial de nós da mesma natureza.

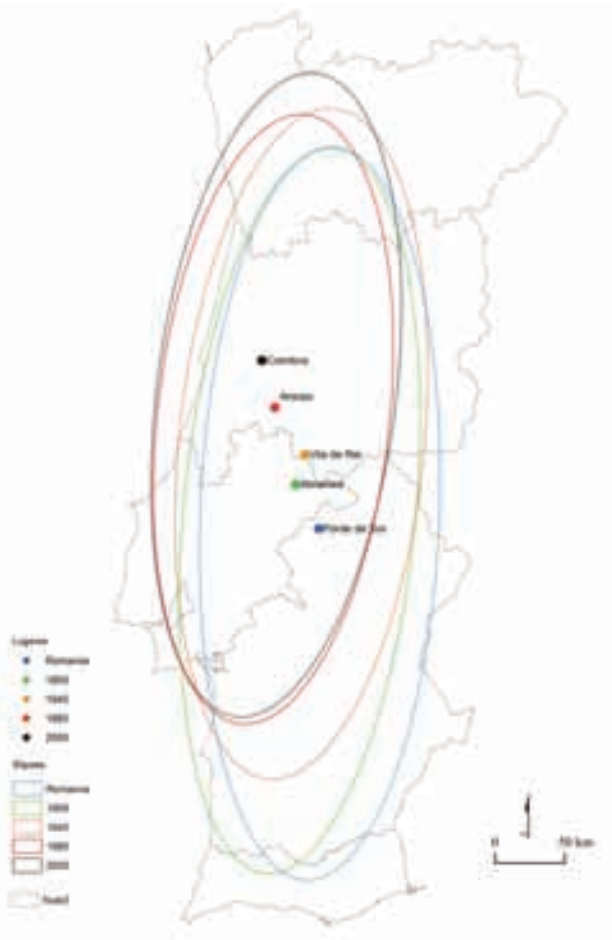
TABELA 36 LUGARES DE MAIOR ACESSIBILIDADE PELAS MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TOPOLÓGICAS, DESDE AS ESTRUTURAS VIÁRIAS DOS ROMANOS ATÉ AO PRN2000

	MEDIDAS TERRITORIAIS	*MEDIDA TOPOLÓGICA (D)*
	Nó mais central	Nó mais acessível
Romanos	Ponte de Sôr	Ad Septem Aras (Campo Maior)
1800	Abrantes	Madalena
1945	Vila de Rei	Sertã
1985	Ansião	Leiria
2000	Coimbra	Coimbra-Mealhada

Assim, numa análise comparativa no tempo entre os lugares que se destacam das medidas enunciadas na tabela 36, o que se verifica é a existência de uma mudança de padrão espacial, guiada pelos lugares mais acessíveis topologicamente e os mais centrais fisicamente, no sentido este – oeste, ou seja no sentido do litoral (cf. Figura 67).

Anote-se ainda, para o facto de existir uma alteração tendencial de aproximação espacial entre o lugar mais acessível topologicamente das redes de estradas e o lugar mais central das redes, até à sobreposição espacial. Ou seja, para a rede do PRN2000, o lugar mais central da rede é também o lugar topologicamente mais acessível da rede. É a estrutura espacial da rede, isto é a sua configuração no território que vai determinar esse padrão, mais precisamente a forma em 'laço' da rede do PRN2000, em que Coimbra assume-se como nó, vai ser a principal responsável pelo padrão que o mapa da figura 65 revela.

FIGURA 67 MEDIDAS DE DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL: LUGARES MAIS CENTRAIS E ELIPSES DE TENDÊNCIA, PARA OS GRAFOS DAS REDES DE ESTRADAS, DESDE O PERÍODO ROMANO AO PRN2000.



Sintetizando, de acordo com as medidas topológicas da Teoria dos Grafos, para análise da acessibilidade da rede de estradas constata-se o gradual deslocamento das elipses de desvio padrão, de sueste para noroeste dos lugares mais centrais de acordo com a estrutura da rede. Nota de destaque também para o facto de a Área Metropolitana do Porto estender cada vez mais a sua área de influência, conforme prova a progressiva aproximação dos lugares mais centrais.

Em jeito de conclusões, o que o capítulo 6 da análise aos resultados vem mostrar é que, o modelo *geo*_grafo criado pode constituir um útil instrumento de apoio, tanto para investigadores e académicos, como para agentes que intervêm no território (técnicos e políticos).

Capítulo 7
Considerações Finais

Esta dissertação estruturou-se, para além da introdução e das considerações finais, em cinco capítulos. Nos capítulos, 2, 3 e 4, aos quais se pretendeu imprimir um cariz conceptual e teórico, dissertou-se sobre um estado da arte, uma análise de conceitos, a definição desses conceitos, e a apreciação dos modelos e dos métodos já testados. Nos capítulos 5 e 6, através dos quais se demonstrou que o modelo *geo*_grafo criado se adapta bem à modelação com dados geográficos, fez-se a implementação do modelo e analisaram-se os resultados.

Que relevância apresentam os resultados da dissertação? Esta é a questão à qual responderemos nestas considerações finais.

7.1. A PERTINÊNCIA DO MODELO: A INTRODUÇÃO DA COMPONENTE ESPACIAL E A ADERÊNCIA DOS RESULTADOS À ANÁLISE GEOGRÁFICA

A análise dos resultados privilegiou a verificação da eficácia do modelo recorrendo à análise do significado geográfico das medidas que devolve. Efectivamente, a informação decorrente da aplicação do modelo (medidas de conectividade e ligação, medidas de acessibilidade e de centralidade, potencial de interacção, coeficiente de *clustering*, 'Mundo Pequeno' e medida de Freeman ou grau de intermediação) foi analisada com o intuito de encontrar a sua pertinência para a análise da realidade e interpretação geográfica do território. Tratou-se da verificação da pertinência das medidas resultantes do modelo, ou seja, tratou-se fundamentalmente de verificar se as medidas serviam a análise, mais do que propriamente a análise geográfica dessas medidas. Ou, dito de outro modo, não se partiu da realidade para chegar à realidade por meio do método, mas sim da concepção do modelo, para chegar ao teste da aderência do modelo à realidade e à verificação da pertinência geográfica dos resultados que devolve.

Do capítulo 2, sobre a Teoria dos Grafos, fica um conhecimento acerca da sua origem e desenvolvimento, dos principais métodos e algoritmos de análise que incorpora, e da sua importância no domínio das ciências geográficas, com destaque para a Geografia Humana. Neste ponto explicou-se ainda como, quando e de que forma se estabeleceu a relação entre a investigação em transportes, os SIG, a Geocomputação e o território, e que originou, o que se chama de SIG-T. Para uns autores, SIG-T é um sub-ramo da Geografia dos Transportes; para outros, um novo domínio científico (CIG-T), interdisciplinar, mas independente e com métodos próprios. Sobre esta temática, o capítulo 4 desta dissertação dá particular atenção.

O capítulo 3 é acerca de uma nova ciência: a ciência das Redes Complexas, e constitui o mais entusiasmante tema de investigação científica deste novo século. Tendo por base a Teoria dos Grafos, as Redes Complexas constituem uma ciência interdisciplinar que procura através das propriedades das redes, como o 'Mundo Pequeno', o Coeficiente de *cluster*, os *hubs* e a Lei de Pareto, operacionalizar, representar e compreender quaisquer dos sistemas que nos rodeiam, sob a forma de rede. É no mapa das relações, que os cientistas da actualidade acreditam estarem as respostas para alguns dos problemas que assolam a sociedade actual, nomeadamente da crise económica, passando pelas epidemias e doenças infecto-contagiosas, assim como problemas de índole mais geográfica, nomeadamente a génese e desenvolvimento do sistema de cidades (Batty, 2001).

Foi para provar esta tese que os investigadores, mediante diversa algoritmia, procuraram encontrar respostas para questões como: Como se determina a eficiência da rede? Como se mede o grau de vulnerabilidade da rede? Quais os nós mais importantes da rede? Quais os nós que polarizam a conectividade da rede? A que se deve essa conectividade preferencial por alguns nós? É aleatória ou ordenada a formação e evolução das redes?

O capítulo 4 debruça-se sobre os SIG-T. Neste capítulo disserta-se sobre a importância dos SIG-T para os estudos geográficos, sobre a razão e amplitude dessa importância sublinhando: a origem e evolução dos SIG-T; os modelos de SIG-T e suas características; as funcionalidades desses modelos; as suas principais aplicações e tendências de evolução futura.

A necessidade de se saber mais acerca dos *programas* disponíveis – comerciais e gratuitos -, levou a um conhecimento mais aprofundado acerca das suas características, funcionalidades, vantagens e desvantagens de acordo com as respostas para os problemas que esta dissertação colocava. O estudo dos *programas* existentes, experimentados em ambientes e aplicações muito diversificados, foi essencial para tomar decisões sobre a ideia central desta dissertação.

Trata-se de uma dissertação dominantemente metodológica, com o enfoque na modelação computacional de redes que exigiu a programação até então inexistente. A adopção desta abordagem na dissertação levantou algumas questões fulcrais logo na fase inicial, nomeadamente: 1) devia-se utilizar um *programa* comercial já

testado e condicionar a modelação à algoritmia disponibilizada e consequentemente desenvolver mais a componente de análise geográfica dos resultados; ou 2) devia-se criar um *programa* de raiz, com os métodos e o interface gráfico de utilizador? ou 3) se não seria preferível criar um documento com uma sequência de códigos que incorpora-se, simultaneamente, a algoritmia e as ordens de execução, mas sendo hóspede de um *programa* de SIG?

Na realidade, esta terceira opção só surgiu quando já se tinham eliminado as duas anteriores, fruto do trabalho de investigação que resultou no capítulo 4, e que se deveu, de um modo geral, à não integração de funções de análise espacial. Todavia, e de um modo particular, a eliminação das duas primeiras opções ficou a dever-se: 1) ao facto dos *programas* existentes não permitirem a georreferenciação do grafo, como era o caso do *UCINET* e *NETDRAW*; 2) ao facto desses *programas* não permitirem o cruzamento de mais do que uma variável em operações de análise espacial; 3) ao facto de serem programas com um modo de funcionamento vulgarmente designado de 'caixa-preta', isto é, que não permitem acesso ao código e não explicam o algoritmo de cálculo (como o caso do *ArcGIS Network Analysis* e o *TransCAD*). Pelas razões referidas esses programas não se ajustam integralmente nem às exigências de uma *client-driven research* nem tão pouco a uma *curiosity-driven research methodologies* propostas por Wellar (2010).

A programação impôs-se como opção e expõe-se no Capítulo 5. Essa opção 'desenhou' parte do perfil da dissertação e o modelo criado (modelo *geo*_grafo), ele próprio objecto de investigação, e sustentou a metodologia de análise de redes. Todo o processo de criação computacional do modelo *geo*_grafo veio revelar-se como a parte mais exigente, mas também a mais aliciante, quer pela aprendizagem a que conduziu quer pela inovação que introduz nos métodos de análise espacial formalizados e implementados em Sistemas de Informação Geográfica.

A passagem de uma situação de utilizador – ainda que experiente e com conhecimentos científicos de base para manusear a informação a partir de um qualquer *programa* de SIG -, a programador capaz de criar um modelo próprio, com capacidade de dar resposta às questões que se vão colocando, significou uma opção orientada para a investigação de índole metodológica. Significou também liberdade científica, que se estendeu desde a escolha e teste da algoritmia à possibilidade de criar novos métodos de análise, mais ajustados ao objecto de estudo e às questões que se iam colocando.

Na fase inicial de manuseamento e de ensaio, quando a opção de programação ainda estava em discussão, testou-se o *programa* gratuito (versão experimental) de redes UCINET e o NETDRAW, uma vez que tinham a vantagem de possuir alguma da algoritmia da Teoria dos Grafos, que interessava. Contudo, havia algumas questões e necessidades não suprimidas, como a georreferenciação da informação (grafo das estradas) que não era contemplada, o que não é compatível com a análise territorial das redes, uma vez que a localização e a distância física são variáveis fundamentais na explicação da dinâmica das redes no tempo.

Um outro aspecto condicionante dos programas em questão era impossibilidade de vectorização das redes pelo *programa*, bem como a construção das matrizes a partir das redes digitalizadas. Este aspecto é tão mais condicionante quanto maior for o número de arcos e nós da rede; acrescia ainda o inconveniente de não disponibilizar a algoritmia utilizada, mas apenas uma explicação do que fazem algumas das funcionalidades e comandos, o que retira a oportunidade de crítica científica e consequente rigor à investigação. Esta questão era sobretudo delicada pelo facto de existirem, para algumas das medidas da Teoria dos Grafos, mais do que um algoritmo de cálculo.

O TransCAD também foi um *programa* que se considerou usar, contudo a questão de ser 'caixa-preta' e não possuir muita da algoritmia necessária - uma vez que é sobretudo um *programa* T-SIG, ou seja orientado para problemas de transportes e não de análise espacial -, levou ao seu abandono, já que este era um aspecto que deixa o investigador e o utilizador reféns do *programa.*

A opção pela programação tornava-se cada vez mais plausível. Um estágio no Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA) da University College London (UCL), coordenado por Michael Batty e a troca de impressões com colegas e investigadores residentes, bem como com o próprio Michael Batty, foi o que dissipou quaisquer dúvidas quanto à opção de programar, e contribuiu para a redefinição do objecto da dissertação: concepção de um modelo de análise espacial de redes, 'formalização' do modelo e programação.

A escolha da linguagem de programação (LP) obedeceu a dois critérios: a) é uma LP capaz de ser lida por vários *programas*, em particular o *ArcGIS*, que foi o programa de SIG escolhido para servir de hospedeiro; b) é uma LP que se caracteriza por uma relativa facilidade de aprendizagem e de utilização que exige menor experiência. A opção recaiu sobre a LP *Visual Basic for Applications* (VBA).

Em síntese, criou-se um modelo vectorial SIG-T, que pode correr dentro de quaisquer *programas* SIG que aceite *VBA*. O modelo chamou-se de *geo*_grafo, porque trabalha informação geográfica através de algoritmia de análise de redes, nomeadamente algoritmia proveniente da Teoria dos Grafos (nomeadamente medidas de acessibilidade e centralidade e medidas de conectividade e ligação) e das Redes Complexas (em particular medidas decorrentes do Problema 'Mundo Pequeno').

Esta opção traz para o utilizador um conjunto de vantagens que se traduzem em dois níveis:

- Liberdade técnica – o utilizador tem totais de poderes de edição e manuseamento da informação geográfica a operar, nomeadamente na vectorização da rede, na construção e sua modificação. O facto de o utilizador poder controlar esta funcionalidade, faz com que haja um controle do erro, e um enorme ganho de tempo, já que a construção de matrizes é processada automaticamente pelo

modelo *geo*_grafo a partir da rede vectorizada, em vez de ser manual como o exige os *programas* UCINET e NETDRAW;

- Liberdade científica – o facto de ser um programa de código aberto, confere ao modelo *geo*_grafo uma maior flexibilidade no que respeita à sua actualização e aderência à análise da informação geográfica introduzida. Ou seja, ao utilizador e investigador é-lhe sempre permitido acesso ao código e adição de mais algoritmia, ajuste ou subtracção da já existente, consoante o objecto de estudo e a evolução científica o exija.

Em particular, o modelo *geo*_grafo permite, a partir das medidas da Teoria dos Grafos, caracterizar a estrutura da rede de transportes, indicando o grau de conectividade e de coesão da rede, e verificar da maior ou menor acessibilidade de um lugar e sua localização geográfica no território, ao longo do tempo, dando assim indicações da dinâmica espacial determinada pela dinâmica da rede. Estas funcionalidades traduzem-se ainda na capacidade de criar diversos cenários, o que é uma vantagem para o investigador.

No que respeita às medidas das Redes Complexas, o modelo *geo*_grafo vem permitir verificar a presença da propriedade 'Mundo Pequeno' (altos índice de clusterização (*Cc*) e simultaneamente baixo valor de distância média topológica (Di_t)), da rede, ou seja os nós da rede exibem um comportamento de facilidade de relacionamento (é possível ir de um nó para qualquer outro nó da rede) e ao mesmo tempo facilidade de acessibilidade (em poucos arcos, chega-se a qualquer nó da rede).

Apesar de não ser uma propriedade 'Mundo Pequeno', a medida de Freeman ou grau de intermediação (também designada de *Betweeness B*) das Redes Complexas permite ao analista identificar espacialmente qual o nó pelo qual se tem mais vezes que passar, na deslocação entre nós da rede de estradas, o que contribui, em termos de conhecimento da rede, juntamente com as outras medidas, para uma melhor gestão, um melhor planeamento e mais eficaz tomada de decisão.

Para além das medidas acima citadas, com base tanto da Teoria dos Grafos como das Redes Complexas, criou-se uma outra medida para dar resposta a questões que ainda estavam por responder, nomeadamente a questão decorrente da capacidade de atracção dos nós entre si, e de como isso é ou não determinado pela topologia da rede. Ou seja, será que os nós mais acessíveis da rede são os nós de maior capacidade de atracção? A criação da medida de Potencial de interacção (Pi) da rede permite responder a essa questão.

A medida Pi é uma adaptação do modelo gravítico, com a medida de Shimbel (D) da distância topológica. Tal como está consignado nos domínios da Física e largamente aplicado em estudos geográficos, o potencial gravítico de um qualquer corpo, é directamente proporcional ao peso das suas massas e inversamente proporcional à distância que os separa. Para o modelo *geo*_grafo fez-se uma adaptação, em que se substituiu a variável distância física entre os lugares, por uma distância topológica (D), já que o fenómeno distância física estava já coberto pela análise da matriz L,

pretendendo assim obter-se uma percepção mais aproximada da influência da acessibilidade em função da população residente dos lugares, e assim medir o potencial de interacção, para verificar que padrões espaciais se configuram.

A algoritmia para as medidas referidas foi desenhada a partir da criação de um código que se estruturou em 5 partes:

- Main – módulo que tem as declarações que determinam a sequência de operações a realizar;
- CMatrix – módulo onde se definem as operações algébricas necessárias ao cálculo de matrizes;
- NetworksMXDAnalysis – módulo-chave, na medida que é a partir dele que se consegue extrair de um conjunto de dados vectoriais (grafo sob a forma de mapa) para a matriz base (C^1), necessária para a construção de todas as outras matrizes, derivada e ponderadas. Este é o módulo que permite dispensar o utilizador da construção da matriz, o que implica não apenas enorme ganho de tempo, como também minimiza prováveis erros nessa construção; sobretudo quando se tratam de grafos com centenas de nós e arcos;
- Dijkstra – módulo em que se declara o algoritmo para determinar o caminho-mais-curto entre quaisquer pares de nós;
- NetworkMatrix – módulo com as declarações necessárias a calcular os índices de conectividade e acessibilidade e exportá-los sob a forma de ficheiro *.txt, com registos temporais de execução. O módulo tem ainda uma declaração que permite verificar automaticamente o número de sub-grafos existentes num grafo.

A partir destes códigos, o modelo *geo*_grafo criado permite uma análise do efeito estruturante das redes de transportes sobre o território, mediante procedimentos automáticos que permitem uma melhor compreensão da relação entre os sistemas de transporte e o território, cuja escala ou complexidade da rede poderiam, de outra forma, colocá-los fora do alcance de compreensão. O capítulo 6 faz o relato dessa pretensão ao expor os resultados obtidos do ensaio à modelação das redes de estradas de Portugal Continental, operadas a partir do modelo *geo*_grafo.

7.2. AS OPORTUNIDADES DE DESENVOLVIMENTO DO MODELO: CONDIÇÕES PARA DIFUSÃO DO MODELO E CRIAÇÃO DE NOVAS FUNCIONALIDADES DE ANÁLISE

Todavia, o modelo *geo*_grafo apresenta limitações. Os resultados revelam a necessidade de desenvolvimentos futuros que podem e devem ser considerados, nomeadamente a continuação de um trabalho de aperfeiçoamento e de desenvolvimento do modelo, tanto no que respeita à algoritmia de análise de redes, com destaque para os algoritmos provenientes das Redes Complexas, por se tratar de uma ciência recente e reconhecida com estando ainda num estado exploratório, e a formulação de uma maior autonomização do modelo, sobretudo no que respeita à necessidade que este ainda possui de um programa que lhe sirva de hospedeiro.

Quanto às possibilidades que se colocam para difusão do método, não basta que o código criado possa ser lido por muitos dos *programas* SIG disponíveis. Dada a utilidade e importância para a análise de redes, é imprescindível que o modelo possa estar disponível para todos, enquanto um *programa* de uso livre e gratuito com um interface amigável próprio, para que qualquer utilizador menos experiente em computação, mas com interesses de investigação em redes, possa fazer uso. Para concretizar esse objectivo impõe-se a criação de raiz de um *programa*, ou seja, em vez de se estar a usar um *programa* SIG como hospedeiro, se possa programar algumas das funcionalidades de base dos SIG e integrá-las no modelo.

Um outro objectivo para futuros desenvolvimentos, e consequente difusão do modelo, prende-se com um problema que o modelo *geo*_grafo apresenta e que consiste na velocidade de processamento. De forma a tornar-se mais célere, o modelo *geo*_grafo deverá fazer 'correr' de forma independente algumas das suas funções. A criação de um programa autónomo, é uma vez mais, uma solução possível, já que um código a correr dentro de um *programa* já existente torna-se sempre mais lento que um *programa* autónomo.

Quanto às condições necessárias para que o modelo adquira maiores capacidades de análise, modelação e cenarização, o facto de ser autónomo e mais flexível, vai ainda permitir ao modelo *geo*_grafo a possibilidade de adquirir uma outra funcionalidade que se considera fundamental e que lhe dará uma maior robustez computacional e acrescida utilidade: a função de simulação, ou seja a de se poder, de uma forma célere e com a mesma precisão e rigor já assegurados, criar cenários hipotéticos e futuros, com base num conjunto de regras. Para este segundo caso, impõe-se a integração de algoritmia de métodos estocásticos, nomeadamente os autómatos celulares e os multi-agentes.

Em suma, o modelo *geo*_grafo tem a pretensão de se afirmar não apenas como um instrumento para apoio à investigação centrada nos métodos, como é o caso desta dissertação, mas também como um instrumento para uma investigação centrada na análise. Esta flexibilidade do modelo confere-lhe também potencial utilitário para a prática do exercício de planeamento e ordenamento territorial, e de apoio à tomada de decisão fundamentada.

É ainda objectivo do modelo *geo*_grafo, que o seu uso não seja orientado exclusivamente às redes territoriais, como as ensaiadas nesta dissertação, mas que possa estender a sua utilidade na investigação de outras redes, como as redes sociais (as reais ou criadas a partir da internet), económicas, ambientais, aéreas, desportivas ou quaisquer outras cujo sistema possa ser representado sob a forma de grafo, mas sempre com expressão ou influência espacial.

Por fim, uma nota crítica aos resultados. De um ponto de vista estritamente analítico, os resultados finais saídos do modelo *geo*_grafo devolvem perspectivas muito diferentes da realidade em função da configuração da rede, e do número de nós e de arcos. Ou seja, aquando da vectorização da rede, o utilizador deverá ter desde

logo um claro entendimento de onde deve quebrar a rede para criar os nós do grafo, uma vez que a não quebra da rede no sítio pretendido, vai originar a não criação de um nó que vai ter implicações nas medidas topológicas e consequentemente na explicação que se poderá retirar acerca das características da rede, nomeadamente na ordenação hierárquica dos nós no que respeita os índices de acessibilidade.

Para o caso desta dissertação, crê-se que a harmonização conceptual dos termos 'itinerários principais' e 'itinerários complementares' deveria ter sido feito numa fase inicial, já que na análise ao longo do tempo que se fez, o significado dos termos materializava-se no território de forma diferente, isto é, as redes de estradas sofriam alterações que deviam ser conceptualmente consideradas no modelo, para fins comparativos. Ainda que esta harmonização conceptual em nada interfira com a pertinência do modelo em si, a sua não consideração tem implicações nos resultados e na análise da realidade que deles se retira.

Apenas a título de exemplo, note-se que a não integração do nó referente ao lugar 'Vendas Novas' no grafo da rede de estradas do PRN 85 (cf. Figura 42), apenas por não estar contemplado como um itinerário principal (apesar de segundo o PR45 estar), vai implicar uma quebra na relação que a rede tem com os lugares mais para o interior (Évora, Mourão, Beja, entre outros) e consequentemente nas medidas obtidas, e consequentemente na análise da realidade.

Em jeito de conclusão, a importância do modelo *geo*_grafo criado pode ser categorizada em duas facções: uma, mais orientada para os agentes que intervêm no território (técnicos e políticos); e uma segunda facção, mais científica e orientada para os investigadores e académicos.

Da primeira, a importância do modelo criado decorre em larga medida da importância que tem para o Ordenamento do Território (OT), quer na fase de execução das principais figuras de planeamento, quer na fase de tomada de decisão. O facto de não existir um modelo que englobasse todas as medidas contempladas, quer as topológicas da Teoria dos Grafos e das Redes Complexas, quer as territoriais, e, simultaneamente, permitisse a georreferenciação e cruzamento de informação a partir de uma Base de Dados é por si só um contributo. No entanto, dadas as propriedades e características que as redes encobrem e que estas medidas vêm revelar, constitui mais um reforço do papel fundamental que conferem ao OT. Com efeito, a noção exacta e devidamente calculada do grau de conectividade e coesão de uma rede, a indicação e identificação espacial e topológica do(s) nó(s) mais acessível(eis), mais central(ais), que mais vezes é atravessado(s) nas deslocações efectuadas na rede e que maior poder de interacção detém, são informações preciosas para quem projecta um plano, assim como para quem tem de tomar decisões que interferem com a acessibilidade e a mobilidade das pessoas, de bens e de informação.

Relativamente à facção mais orientada para os investigadores, também dois ramos podem ser beneficiados com o modelo *geo*_grafo: um ramo composto por aqueles que se dedicam ao desenvolvimento de modelos e aperfeiçoamento da tecnologia; e

o ramo composto pelos analistas teóricos. Para os primeiros, o modelo constitui um contributo tecnológico, na medida em que veio preencher uma lacuna (conforme se explicou no Cap. 5), que era a inexistência de um programa que possuísse toda a algoritmia utilizada, ou que não a tendo, permitisse a sua criação. Para os segundos, o modelo é sobretudo um instrumento 'amigável', quanto à sua utilização, como resultado da criação de um *plugin* para correr sobre um programa anfitrião mundialmente conhecido dos utilizadores de SIG.

Em suma, o modelo *geo*_grafo tem a pretensão de poder contribuir para um pequeno avanço na investigação geográfica, quer na parte da modelação, quer para a formulação de teorias e a criação de novos conhecimentos acerca das redes.

BIBLIOGRAFIA

AAVV (1995) - *Dictionary of Contemporary English*. Longman group Ltd. Essex

ABREU, D. (2005) - Análise de dados II. Relatório sobre O programa, os conteúdos e os métodos de ensino das matérias da disciplina de Análise de Dados II. Provas para obtenção do título de Professor agregado do Departamento de Geografia da Faculdade de Letras, Universidade de Lisboa, Lisboa.

ABREU, D. (2006) - Os Transportes. *In* Medeiros, C. A. (dir.) *Geografia de Portugal*. Vol. 3, Círculo de Leitores, Lisboa, vol. 3: 333-365.

ALAIN, G. (1995) - *Dicionário prático de matemática*. Terramar, Lisboa.

ALARCÃO, J. (1974) - *Portugal Romano*. 33ª Ed. Colecção Historia Mundi, Ed. Verbo, Lisboa.273pp

ALARCÃO, J. (1987) - A cidade romana em Portugal. A formação de «lugares centrais» em Portugal, da idade do ferro à romanização. *Cidades e História*: 35-69.

ALARCÃO, Jorge (1990) coord. - Nova História de Portugal, vol. I. Portugal: das origens à romanização. Lisboa, Editorial Presença.558pp.

ALBERT R.; BARABÁSI, A.-L. (2002) - Statistical mechanics of complex networks. *Review of Modern Physics*, 74: 47-97.

ALEGRIA, M. F. (1990) - *A Organização dos Transportes em Portugal (1850-1910)*. CEG, Lisboa.

ALLAIN, R. (2004) - *Morphologie urbaine. Géographie, aménagement et architecture de la ville*. Armand Colin, Genève.

ANDREY, J.; RODRIGUE, J.-P. (2009) – Methods in Transport Geography. In *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, http://people.hofstra.edu/geotrans.

ANSELIN, L. (1998) - Exploratory spatial data analysis in a geocomputational environment. *Proceedings of the 3rd International Conference on Geocomputation'98*, Bristol, UK.

ARMSTRONG, M. (2000) - Geography and Computer Science. *Annals of the Association of American Geographers*, 90(1):146-156.

ASCHER, F. (2001) - *Les nouveaux principes de l'urbanisme*. Editions de l'Aube, Paris.

BAILLY. A. (1988) – Geography of Transportation: a behavioural approach. La geografia española y mundial en los años ochenta, Universidad Complutense, Madrid: 237-245.

BALARKRISHNAN, V. (1997) – Theory and Problems of Graph Theory. Schaum's Outline Series. McGraw-Hill. New York.

BARNES, J.; HARARY, F. (1983) – Graph Theory in Network Analysis. Social Networks, vol. 5(2):235-244.

BANGER, S. (2002) - Geocomputation: A technique for spatial analysis. *GIS@ development*, October 2002. [Acedido em 26 de Junho de 2006]. http://www.gisdevelopment.net/magazine/gisdev/2002/oct/gctsa2.shtml.

BARABÁSI, A. L. (2003) - *Linked. How everything is connected to everything else and what it means for business, science, and everyday life*. Plume, New York.

BATTY, M. (2001) - Cities as small worlds. *Environment and Planning B: Planning and Design* 28: 637-638.

BATTY, M. (2003) - *Network geography*. Working papers, 63, CASA, London.

BATTY, M. (2005) - *Cities and complexity. Understanding cities with cellular automata, agent-based models and fractals*. MIT Press, London.

BEAVERSTOCK, J.; SMITH, R.; TAYLOR, P. (2000) - World-City Network. A New Metageography? *Annals of the Association of American Geographers*, 90: 123-134.

BERRY, B.; MORRIL, R.; TOBLER, W. (1964) - Geographic Ordering of Information: New opportunities. *The Professional Geographer*, 16 (4): 39-44.

BERRY, B.; MARBLE, D. (1968) - *Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography.* Prentice-Hall Inc., New Jersey.

BERSINI, H. (2005) - *Des réseaux et des sciences. Biologie, informatique, sociologie: l'omniprésence des réseaux*. Vuibert, Paris.

BERTALANFFY, L. (1950) – An Outline of General System Theory. The British Journal for the Philosophy of Science. Vol. 1, Nº2 :134-165.

BLACK, W. R. (2003) - *Transportation. A Geographical Analysis.* The Guilford Press, New York.

BRUNET, R. (1996) - L'Europe des réseaux. *In* Pumain, D.; Saint-Julien, T. (ed.) *Urban Networks in Europe: Réseaux Urbains en Europe*. France. John Libbey Eurotext: 131-150.

BRUNET, R. (2001) - Models in geography? A sense to research. *Cybergeo: European Journal of Geography*. 12th European Colloquium on Quantitative and Theorethical Geography, St. Valery-en-Caux, France.

BURROUGH, P. (1989) - Fuzzy mathematical methods for soil survey and land evaluation. *Journal of soil science*, 40: 477-492.

BURTON, I. (1963) - The Quantitative Revolution and Theoretical Geography. *In Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. Prentice-Hall, New Jersey: 13-23.

CAMPOS, L.; VILAR, S.; LEVI, L. (1999) - *Programação em Visual Basic 6*. FCA, Lisboa.

CAMPOS, L. (1995) - *Dicionário de computadores*. 2ª Ed., Editorial Presença, Lisboa.

CARAÇA, J. (2005) - *Conceitos fundamentais da matemática*. Gradiva, Lisboa.

CARDILLO, A. *et al* (2006) - Structural properties of planar graphs of urban street patterns. *Physical Review E*, 73: 1-8.

CASTELLS, M. (2002) - *A Sociedade em rede. A era da informação: economia, sociedade e cultura*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

CASTELLS, M. (2004) - *A galáxia internet. Reflexões sobre a internet, negócios e sociedade*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

CHISHOLM, Michael, (1967). General Systems Theory and Geography. *In* Transactions of the Institute of British Geographers, Nº42; pp. 45-52. JSTOR

CHORLEY, R. (1964) - Geography and Analogue Theory. *Annals of the Association of American Geographers*, 54(1): 127-137.

CHORLEY, R.; HAGGET, P. (ed.) (1967) - *Models in Geography*. Methuen & Co. Ltd. London.

CHORLEY, R.; HAGGET, P. (1967) - Models, Paradigms and the New Geography. *In* Chorley, R.; Hagget, P. (ed.) *Models in Geography*. Methuen & Co., Ltd. London: 19-4.

CHORLEY, R.; HAGGET, P. (1969) - *Network Analysis in Geography*. Edward Arnold, London.

CORTESÃO, J. (1964) - *Os factores democráticos na formação de Portugal*. Livros Horizonte, Lisboa.

COSTA, N. (2007) - As alterações da acessibilidade e da mobilidade: uma função da velocidade. *In* CEG (ed.) *Geophilia. O sentir e os sentidos da Geografia.* CEG, Lisboa: 155-169.

COSTA, N. (2007) - *Mobilidade e Transporte em Áreas Urbanas. O caso da Área Metropolitana de Lisboa.* Dissertação de doutoramento em Geografia Humana, Universidade de Lisboa, Lisboa.

DIESTEL, R. (2005) - *Graph Theory*. Electronic version of the third Edition, Springer. New York.

DOROGOVTSEV, S.; MENDES, J. (2003) - *Evolution of Networks. From biological nets to the internet and WWW*. Oxford University Press, New York.

DU, G. (2001) - Using GIS for Analysis of Urban Systems. *Geojournal* 52: 213-221.

EHLEN, J.; DOUGLAS, C. (2002) - Geocomputation: What is it? *Computers, Environment and Urban Systems*, 26: 257-265.

FEDERAL INTERAGENCY COORDINATING COMMITTEE ON DIGITAL CARTOGRAPHY (1988), GUPTIL, S. Ed. – A Process for Evaluating Geographic Information Systems. U. S. Department of the Interior. U. S. Geological Survey. Denver Colorado: 88-105.

FERNANDES, F. (2008) - *O Efeito das Infra-estruturas rodoviárias no Ordenamento e Desenvolvimento do Território: O caso da Ilha de Santiago, Cabo Verde*. Dissertação de Mestrado em Gestão do Território, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

FISHER, M. (2003) - GIS and Network Analysis. *In* Hensher D., *et al* (eds.) *Handbook of Transport Geography and Spatial Systems*. Pergamon, Oxford, vol. 5: 391-408.

FORESMAN, T. (ed.) (1998) - *The History of Geographic Information Systems. Perpectives from the Pioneers*. Prentice Hall, New Jersey.

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNDSON, C.; CHARLTON, M. (2002) - *Quantitative Geography. Perspectives on Spatial Data Analysis*. SAGE Publications Inc., California.

FREEMAN, L. C. (1977) – A Set of Measures of Centrality Based on Betwenneess. Sociometry, vol. 40 (1):35-41.

Gabinete da Área de Sines (1973) – Plano Geral da Área de Sines. Presidência do Concelho. Lisboa. 579pp.

GAHEGAN, M. N. (1999) - What is Geocomputation? *Transactions in GIS* 3: 203-206.

GALEANA, Ó. (2004) - *Análisis espacial del transporte aéreo de carga en México*. Instituto mexicano del transporte, Querétaro.

GARRISON, W. (1960) - Connectivity of the Interstate Highway System. *In Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography*. Prentice-Hall, New Jersey: 239-249.

GARRISON, W.; MARBLE, D. (1961) - *The Structure of Transportation Networks*. U.S. Department of Commerce, Office of Technical Services, Washington D.C.

GASPAR, Jorge (1970) – Os Portos Fluviais do Tejo. FINISTERRA. Revista Portuguesa de Geografia. Vol. V, nº10. Lisboa. Centro de Estudos Geográficos:153-204.

GASPAR, Jorge (1981) - *A área de influência dos lugares centrais de Évora. Sistema de funções e lugares centrais*. CEG, Lisboa.

GASPAR, Jorge *et al.* (1984) - Um poliedro complexo: olhar sobre a estrutura científica do Centro de Estudos Geográficos. *In* CEG (ed.) *Livro de homenagem a Orlando Ribeiro.* CEG, Lisboa: 37-58.

GASPAR, Jorge (1998) - Nós e os Outros. *InforGeo. A Interdisciplinaridade na Geografia Portuguesa: Novos e Velhos Desafios*, 12-13: 3-10.

GASPAR, Jorge (2005) - 45 Anos de Geografia. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia*, 40(79): 35-46.

GASPAR, Jorge; JENSEN-BUTLER, C.; JEPPESEN, S. (1986) - Telecomunicações e desenvolvimento regional em Portugal: um projecto para a região Centro. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia* 21(41): 5-56.

GASPAR, Jorge; RODRIQUEZ, J. (2006) - As Redes de Transportes e de Telecomunicação. *In* Medeiros, C. A. (dir.) *Geografia de Portugal*. Círculo de Leitores, Lisboa, vol. 4: 59-83.

GASPAR, Joaquim (2004) – Dicionário de Ciências Cartográficas. Lidel. Lisboa. 327pp.

GASTNER, M.; NEWMAN, M. (2006) - The spatial structure of networks. *The European Physical Journal B* 49: 247-252.

GORMAN, S; KULKARNI, S.; (2003) - Spatial Small Worlds: New Geographic Patterns for an Information Economy. *Environment and Planning B:* 1-55 (prelo)

GOULD, P. (1991) - Dynamic Structures of Geographic Space. *In* Brunn S. D.; Leinbach, T. R. (ed.) *Collapsing Space and Time: Geographic Aspects of Communication and Information*. Harper Collins, London: 3-30

GRAHAM, S.; MARVIN, S. (2001) - *Splintering urbanism. Networked infrastructures, technological mobilities and the urban condition*. Routledge, London.

GRAHAM, S. (2004) - *The cybercities*. Routledge, London.

GRANOVETTER, M. (1983) - The Strength of Weak Ties. A Network Theory Revisited *in* American Sociological Association, vol. 1:201-233.

GRIBKOVSKAIA, I. *et al* (2007) - The Bridges of Königsberg - A Historical Perspective. *Wiley InterScience.*

GRUEAU, C. (1994) - *Mise en Ouvre d'un Système d'Information Géographique pour la gestion municipale: Réalisation d'un prototype environnemental pour la ville de Lisbonne*. Rapport de Stage, Lisboa, CNIG.

HAGGETT, P. (1965) - *Locational Analysis in Human Geography*. Edward Arnold Pub, London.

HAGGETT, P. (1967) - Network Models in Geography. *In* Chorley. R, Hagget, P. (ed.) *Models in Geography*. Methuen & Co., Ltd., London: 609-668.

HAGGETT, P. (2001) - *Geography. A global synthesis*. Prentice Hall, Harlow.

HAGERSTRAND, T.; GASPAR, J. (1969) - O momento actual da Geografia Humana na Suécia. *Finisterra. Revista Portuguesa de Geografia* (separata), 5(7).

HALL, P. (1992) - *Urban & Regional Planning*. Routledge, London.

HALL, P. (2002) - *Cidades do Amanhã.* Editora Perspectiva, São Paulo.

HAYES, B. (2000) - Graph theory in practice: part I. *American Scientist*, 88: 9-13.

HAYNES, K.; FOTHERINGHAM, S. (1984) - *Gravity model overview, Gravity and Spatial Interactions Models*. Sage, California.

HENSHER, *et al* [Ed. (2004)] – Handbook of Transport Geography and Spatial Analysis. Handbooks in Transport, vol. 5. UK:677pp.

INE (2001) - Manual de Procedimentos da Construção da Base Geográfica de Referenciação de Informação de 2001. Lisboa. INE.

JAMES, G.; CLIFF, A.; HAGGETT, P.; ORD, J. (1970) - Some Discrete Distributions for Graph with Applications to Regional Transport Networks. *Geografiska Annaler, Series B, Human Geography*, 52(1): 14-21.

JIANG, B. (2006) - Small World Modeling for Complex Geographic Environments, 259-271. In Complex Artificial Environments: Simulation, Cognition and VR in the Study and Planning of Cities. Springer. Heidelberg: 259 - 271.

JULIÃO, R. (1998b) - Measuring Accessibility – a GIS based methodology for accessibility evaluation. *In* GIS PlaNET'98, USIG, Lisboa.

JULIÃO, R. (2001) – Tecnologias de Informação Geográfica e Ciência Regional. Contributos Metodológicos para a Definição de Modelos de Apoio à Decisão em Desenvolvimento Regional. Dissertação de doutoramento em Geografia. Departamento de Geografia e Planeamento Regional da Faculdade de Ciências Sociais e Humanas da Universidade Nova de Lisboa.

KANSKY, K. (1963) - *Structure of Transportation Networks: Relationships Between Network Geometry and Regional Characteristics*. Research paper, 84, Department of Geography, University of Michigan, Michigan.

KANSKY, K.; DANSCOINE, P. (1989) - Measures of Network Structure. *Flux* 1: 89-121.

KAO, R. (1963) – The Use of Computers in the Processing and Analysis of Geographic Information. Geographical Review, Vol.53, Nº4:530-547.

KIM, B. J. *et al*. (2002) – Path Finding Strategies in Scale-free Networks. Physical review E, vol. 65, 027103:4pp.

KUBY, M.; TIERNEY, S.; ROBERTS, T.; UPCHURCH, C. (2005) - *A Comparison of Geographic Information Systems, Complex Networks, and Other Models for Analyzing Transportation Network Topologies*. N. C. report, NASA, Hannover.

LAURINI, R. (2001) - *Information systems for urban planning. A hypermedia co-operative approach.* Taylor & Francis, London.

LAY, M. (2005) - The history of transport planning. *In* Button K. J.; Hensher D. A. (ed.) *Handbook of Transport Strategy, Policy and Institutions*, Elsevier.

LEMA, P. (1980) - *Desenvolvimento das funções centrais em Trás-os-Montes*. Dissertação de doutoramento em Geografia Humana, Universidade de Lisboa, Lisboa.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. (1994) – *Remote Sensing and Image Interpretation*. 3ª Ed., John Wiley & Sons. New York

LO, C.; YEUNG, A. (2002) - *Concepts and techniques of Geographic Information Systems*. Keith Clarke (Ed.). Prentice Hall Series in Geographic Information Science, Prentice Hall, New Jersey: 492pp.

LLOYD-EVANS, S.; Robert, B. (1998) - *The city in the developing world*. Longman, Harlow.

LOBATO, L. *et al*. (Coord.) (2005) - *A Concepção da Rede Ferroviária no Sistema Global de Transportes*. CP, DGTTF, Lisboa.

LONGLEY, P.; BORKKS, S.; MCDONNELL, R.; MACMILLIAN, B. (1998) -*Geocomputation. A primer.* John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex

LONGLEY, P.; GOODCHILD, M.; MAGUIRE, D.; RHIND, D. (2001) - *Geographic information systems and science*. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.

MACHADO, J. R. (2000) – *A Emergência dos Sistemas de Informação Geográfica na Análise e Organização do Espaço*. Dissertação de Doutoramento em Ciências do Ambiente na especialidade em Ordenamento e Território. FCG/UNL – FCT/MCT, Lisboa.

MARQUES, O.; DIAS, J. (2003) - *Atlas Histórico de Portugal e do Ultramar Português*. Centro de Estudos Históricos da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

MATOS, A. T. (1980) - *Transportes e comunicação em Portugal, Açores e Madeira (1750-1850).* Universidade dos Açores, Ponta Delgada.

MATOS, J. (2000) - *Fundamentos da Informação Geográfica*. Lisboa, LIDEL.

MATTOSO, J. (Coord) (1993) - *Os recursos e os poderes. História de Portugal. Antes de Portugal*. Ed. Estampa, Lisboa, vol. 1: 385-394.

MERCHANT, D. C. (1987) – Spatial Accuracy Propoerties of Nature Drainage Systems and their Representation in a E4 Phase Space, *Journal of Geology*, 66 (1):33-56.

MERENNE, E. (2003) - *Géographie des transports*. Presses Universitaires des Rennes, Rennes.

MILGRAM, S. (1967) - The small-world problem. *Psychology. Today*, 2: 60-67.

MILLER, H.; SAHAW, S. (2001) - *Geographic information systems for transportation. Principles and applications*. Oxford university press, New York.

MILLER, H. J. (1999) - Potential contributions of spatial analysis to geographic informations systems for transportation (GIS-T). Forthcoming in *Geographical Analysis (30th anniversary issue).*

MINISTÉRIO DAS CIDADES, ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E AMBIENTE (2005) - *Programa Nacional das Políticas de Ordenamento do Território*. DGOTDU, Lisboa.

MITCHELL, A. (2005) - *The ESRI Guide to GIS Analysis*. ESRI Press, Redlands, California, vol. 2.

MITCHELL, W. - (2000) *e-topia*. MIT, Massachusetts.

MITCHELL, W. (2004) - *ME++ The cyborg self and networked city*. MIT, Massachusetts.

MORIN, E. (2008) - *Introdução ao Pensamento Complexo*. 5ª Ed, Instituto Piaget, Lisboa.

MUN, S.-I. (1997) - Transport network and system of cities. *Urban economics*, 42: 205-221.

NEGROPONTE, N. (1996) - *Ser Digital.* Caminho, Lisboa.

NEWMAN, M. (2003) - The structure and function of complex networks. *SIAM Review* 45:167-256.

NEWTON-SMITH, W. H. (2005) - *Lógica. Um curso introdutório*. Gradiva, Lisboa.

NIJKAMP, P. (1978) - Gravity and Entropy Models. The State of the Art. *Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk*, University of Amsterdam, Hague,

NYSTUEN, J.; DACEY, M. (1961) - A Graph Theory Interpretation of Nodal Regions. *In* Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography. New Jersey. Prentice-Hall: 407-418.

NYSTUEN, J. (1963) - Identification of Some Fundamental Spatial Concepts. *In* Spatial Analysis. A Reader in Statistical Geography. New Jersey. Prentice-Hall: 35-41.

ODUM, E. (1988) - *Fundamentos de Ecologia*. 4ªEd., Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa.

ONO, H.; MURAYAMA, Y. (2003) - Development of integrated spatial analysis systems using open sources. *Proceedings of the 7th International Conference on Geocomputation' 2003*. Southampton, UK.

OPENSHAW S.; ABRAHART, R. (1996) Geocomputation. *Proceeding1st International Conference on Geocomputation*. University of Leeds, UK.

OPENSHAW, S. (2000) - Geocomputation. *In* Openshaw, S.; Abrahart, R. (ed.) *Geocomputation*. Taylor&Francis, London: 1-31.

OPENSHAW, Stan *et al*. (2000) - Geocomputation research agendas and future. *In* Openshaw, S.; Abrahart, R. (ed.) *Geocomputation*. Taylor&Francis, London: 388-407.

O'SULLIVAN, D. B. (2000) - Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes. Tese de doutoramento. University College of London. London.

PARK, R. E. (1999) - *La ciudad y otros ensayos de ecología urbana*. Ediciones del Serbal, Barcelona.

PENG, Z.-R.; TSOU, M.-H. (2003) - *Internet GIS. Distributed Geographic Information Services for the Internet and Wireless Networks*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

PEETERS, D. *et al* (1998) - Transportation networks and the location of human activities. *Geographical Analysis*, 30 (4): 355-371.

POTRYKOWSKI, M.; TAYLOR, Z. (1982) - *Geografía del Transporte*. Ariel, Barcelona.

PUMAIN, D. ; SAINT-JULIEN, T. (Ed.) (1996) - *Urban Networks in Europe/ Réseaux Urbains en Europe*. France. John Libbey Eurotext.

PUMAIN, D. (2001). Opening Plenary: Communicating about Theoretical Geography. *Cybergeo: European Journal of Geography.* 12th European Colloquium on Quantitative and Theoretical Geography. St-Valery-en-Caux. France.

RAMOS, P. (2007) – Desenhar Bases de Dados com UML. 2ª Ed. Edições Sílabo. Lisboa. 251pp.

RIBEIRO, O. (1989) - *Opúsculos Geográficos. Síntese e Método*. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

ROCHA, J.; MORGADO, P. (2007) - A Complexidade em Geografia. *In* CEG (ed.) *Geophilia. O sentir e os sentidos da Geografia.* CEG. Lisboa: 137-153.

RODRIGUE, J-P *et al.* (2009) - *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, http://people.hofstra.edu/geotrans.

ROSE, A. (2001) - *Uma avaliação comparativa de alguns Sistemas de Informação Geográfica aplicados aos Transportes*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Brasil.

SALGUEIRO, T. (2005) – Cidades e Sistema Urbano. *In* Medeiros, C. A. (dir.) *Geografia de Portugal*. Sociedade, Paisagens e Cidades. Círculo de Leitores, Lisboa, vol. 2: 176-189.

SANTA-RITA, A. J. (2006) - *As Estradas em Portugal. Da Monarquia ao Estado-Novo (1900-1947*). Edições Universitárias Lusófonas, Lisboa.

SARGENT, R. (2005) - Validation and verification of simulation models. *Proceedings of the 1999 Winter simulation conference*. Orlando, Florida: 130-143.

SHAW, S.-L.; RODRIGUE, J.-P. (2009) – Geographic Information System for Transportation. In *The Geography of Transport Systems*, Hofstra University, Department of Global Studies & Geography, http://people.hofstra.edu/geotrans.

SHIMBEL, A. (1953) - Structural parameters of communication networks. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, 15: 501-507.

SILVA, A.; ROSE, A.; RODRIGUES, D. (2003) - An Assessment method for GIS-T software. *International conference on computers in urban planning and urban management*, 8, Sendai.

SILVA, H. (2009) - *Perfil Nacional de Metadados para Informação Geográfica (Perfil MIG).* SNIG, IGP, Lisboa.

SIMÕES, J. (2006) - An Agent-Based-Approach to Spatial Epidemics through GIS. Tese de Doutoramento, UCL, University of London.

STEFANOVIC, P.; DRUMMOND, J.; MULLER, J. P. (1989) - It's Response to the Need for Training in CAL and GIS, International Seminar Proceedings, Dehra Dun, INCA:450 - 460.

STROGATZ, S. (2001) - Exploring complex networks. *Nature*, 410: 268-276.

SUI, D. (2004) - Tobler's first law of geography. A big idea for a small world? *Annals of the American Association of Geographers*, 94: 269-277.

TAAFFE, E. (1962) - The Urban Hierarchy: An air passenger definition. *Economic Geography*, 38(1): 1-14.

TAAFFE, E.; MORRIL, R.; GOULD, P. (1963) - Transport Expansion in Underdeveloped Countries: A Comparative Analysis. *Geographical Review*, 53(4): 503-529.

TAAFFE, E.; MORRIL, R.; GOULD, P. (1973) - Transport Expansion in Underdeveloped Countries: A comparative analysis (shortened version of the study published in 1963). *In* Hoyle (ed.) *Transport and Development*. Geographical Readings. Macmillan Press, London: 32-49.

TAAFFE, E.; GAUTHIER, H. (1973) - Geography of Transportation. *In* Foundations of Economic Geography Series. Englewood Cliffs. Prentice Hall

TAAFFE, Edward; GAUTHIER, Howard; O'KELLY, Morton. (1996). Geography of Transportation. Second Edition. New Jersey. Prentice Hall.

TAYLOR, P. (2004). *World city network. A global urban analysis*. Routledge, New York.

TENEDÓRIO, J. *et al* (2006) - Modelos Geográficos e sistemas complexos. Técnicas de geocomputação aplicadas à previsão de alterações de linha de costa. Actas do ESIG 2006. USIG, Oeiras, Portugal.

THOMAS, I. (2002) - *Transportation networks and the optimal location of Human activities. A numerical geography approach*. Edward Elgar, Cheltenham.

TOBLER, W. (1970) - A Computer Movie Simulating Urban Growth in the Detroit Region. *Economic Geography. Proceedings of the International Geographical Union. Commission on Quantitative Methods*, 46: 234-240.

TOBLER, W. (1976) - Spatial Interaction Patterns. *Journal of Environmental Systems.* 6, (4): 271-301.

TORRENS, P.; BENENSON, I. (2004) - Geosimulation. Automata-based modeling of urban phenomena. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.

TRAVERS, J.; MILGRAN, S. (1969) - An Experimental Study of the Small World Problem. *Sociometry*, 32 (4): 425-443.

TSAKIRIS, G.; *et al* (1994) – *Accuracy Issues of Geographic Data and Processes for Estimating Water Resources Availability*. *In* Tsakiris e Santos (Ed.), *Advances in Water Resources Technology and Management*, Ewra, A. A. Balicema, Roterdam: 9-13.

TUCKER, A. (2001) - *Applied Combinatorics*. 4th Ed. John Wliey & Sons.

TRUDEAU, R. (1993) – *Introduction to Graph Theory*. Dover Publications, Inc. New York.

VAREJÃO, F. (2004) - *Linguagens de programação. Conceitos e técnicas*. Elsevier, Rio de Janeiro.

WATTS, D.; STROGATZ, S. (1998) - Collective Dynamics of 'Small-world' networks. *Nature*, 393: 440-442.

WATTS, D. (2004) - *Six degrees. The science of a connected age*. Vintage, London.

WATTS, D. (2006) - *Seis grados de separación. La ciencia de las redes en la era del acceso*. Paidos, Barcelona.

WELLAR, B. (2010) – Significant Advances in Applied Geography from Combining Curiosity-driven and Client-driven Research Methodologies. *International Journal of Applied Geospatial Research*. IGI Global. Vol.1, Issue 1.

WILSON, A. (1997) - Land-use/Transport Interaction Models. Past and Future. *Journal of Transport Economics and Policy*, 32: 3-23

WILSON, A. (2000) - *Complex spatial systems. The modeling foundations of urban and regional analysis*. Prentice Hall, Harlow.

WILSON, R. (1987) - *Introduction to graph theory*. Longman Scientific & Technical, New York.

WORBOYS, M. (1998) - *GIS. A Computing Perspective.* Taylor & Francis, London.

XIE, F.; LEVINSON, D. (2006) - Measuring the Structure of Road Networks. *Geographical Analysis*, 39 (3): 1-30.

XU, Z. (2007) - *Small-World Characteristics in Geographic, Epidemic, and Virtual spaces: A Comparative Study*. Tese de Doutoramento, Office of Graduate Studies of Texas A&M University, Texas.

XU, Z.; SUI, D. (2007) – Small-world Characteristics on Transportation Networks: A Perspective from network autocorrelation In Journal of Geographical Systems, vol. 9:189-205.

ZHAN, B. (1998) - Shortest paths algorithms: An evaluation using real road networks. *Transportation Science*, 32 (1): 65-73.

CEG

MOPT
modelação, ordenamento
planeamento territorial

FCT
Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E ENSINO SUPERIOR