

Modelação em SIG da distribuição espacial e temporal da população em meio urbano com alta resolução - utilidade em avaliação de risco e gestão de emergências

Sérgio Freire

e-GEO, Centro de Estudos de Geografia e Planeamento Regional. Faculdade de Ciências Sociais e Humana. Universidade Nova de Lisboa
sfreire@fcsh.unl.pt

1. Introdução

Desastres naturais ou com causa humana (terramotos, incêndios florestais ou urbanos, epidemias, fugas tóxicas, actos de terrorismo, etc.) ocorrem geralmente sem aviso prévio e podem vitimar grande número de pessoas. A quantificação rigorosa da população exposta a eventos potenciais ou reais é reconhecida uma componente-chave da modelação de perdas enquanto ferramenta para uma eficiente gestão do risco (CHEN *et al.*, 2004; FEMA, 2004; NRC, 2007), devendo ser uma actividade fundamental no domínio da protecção civil.

Informação cartográfica actual e detalhada sobre a distribuição da população é essencial para suporte à tomada de decisão em praticamente todas as fases do processo de gestão de emergências, se for produzida a escalas espaciais e temporais apropriadas (SUTTON *et al.*, 2003). Os dados dos recenseamentos populacionais apenas registam o local de residência e pernoita habitual da população, embora a distribuição espacial desta varie significativamente da noite para o dia, em especial nas Áreas Metropolitanas. Devido apenas aos movimentos pendulares, a população diurna de concelhos das Áreas Metropolitanas de Lisboa e Porto chega a diferir em mais de 50% dos valores censitários. Por outro lado, a disponibilização de informação demográfica na forma de um total para zonas censitárias ou administrativas coloca problemas na sua análise (e.g., MAUP, falácia ecológica), sendo habitual assumir-se uma distribuição constante e exaustiva nessas zonas, ou resumir a distribuição ao seu centróide. Estes factos implicam que estudos baseados unicamente nessa informação (e.g., OLIVEIRA *et al.*, 2005) poderão incorrer em erros de estimação significativos, em especial no período diurno.

Assim, quando um desastre ocorre, saber-se quantas pessoas poderão estar na zona afectada nesse momento é informação preciosa para planear adequadamente respostas de emergência e evacuação, sendo

igualmente útil em actividades de planeamento (simulação) para avaliação e mitigação do risco. Os simuladores de cenários sísmicos actualmente existentes em Portugal estimam os danos humanos ao nível da freguesia baseando-se nos quantitativos populacionais do *Censos 2001*. Torna-se pois importante representar com maior detalhe a variação da distribuição da população no espaço e no tempo. A disponibilização destes dados num formato matricial SIG facilita a sua integração com outros dados espaciais para análise ou modelação.

Devido em grande parte à natureza complexa da população enquanto variável geográfica, diversas abordagens têm sido seguidas para estimar a sua distribuição espacial, incluindo modelação do tipo estatístico (correlação), de superfícies, e cartográficas (FISHER e LANGFORD, 1996). Porém, muitos destes métodos exigem adopção de assumpções demasiado simplificadoras da realidade ou desagregam a população com base em parâmetros heurísticos ou empíricos, o que enfraquece a confiança nos resultados. Adicionalmente, a ausência de valores negativos e a preservação de volume - a condição picnofiláctica de Tobler (1979) - são requisitos básicos necessários para criação de distribuições realistas.

A incorporação da dimensão temporal na distribuição da população foi demonstrada pelo projecto LandScan (DOBSON *et al.*, 2000) e expressa no conceito de população ambiente, como sendo uma média temporal da densidade populacional que tem em consideração a mobilidade e as actividades humanas. No entanto, a resolução espacial desses dados (30 segundos de arco, quase 1 km), embora aceitável para uso a escalas regionais e nacionais, é insuficiente para a maioria dos usos práticos em Portugal. Por outro lado, a superfície de população ambiente constitui um compromisso entre as distribuições diurna e nocturna que em rigor não representa nenhuma destas. Assim, foi reconhecida a necessidade de criação de bases de dados de distribuições da população com resolução

espacial e desagregação temporal acrescidas, o que está a ser feito para os EUA (BHADURI *et al.*, 2002).

O presente estudo teve por objectivos o desenvolvimento e teste de um modelo para cartografar as distribuições diurnas e nocturnas da população em Portugal, que fosse baseado em dados estatísticos concretos e permitisse análise à escala local por via da sua elevada resolução espacial. Este esforço está em sintonia com as actuais recomendações internacionais no sentido de melhorar análises de vulnerabilidade (BALK, 2006; NRC, 2007).

2. Metodologia

A metodologia foi implementada num software de Sistema de Informação Geográfica, o ArcGIS 9.1 (ESRI). Devido a alguns dados terem uma base concehial, cada município foi modelado separadamente. Para cada um foram produzidas *grids* de população residencial nocturna, população residencial diurna, população diurna deslocada nos locais de trabalho ou estudo, e população diurna total. A estrutura raster proporciona unidades uniformes e flexíveis que facilitam a re-agregação para qualquer zonamento, sendo assim convenientes para modelação e análise.

Foi adoptada a resolução-base de 25 metros porque se pretendeu aproximar a dimensão da residência unifamiliar (meio quarteirão), e porque no teste efectuado de sensibilidade do modelo à resolução, um aumento da resolução para 12,5 m originou apenas ganhos marginais na exactidão dos resultados.

2.1. Área de estudo

Os concelhos de Cascais e Oeiras em 2001 constituem a área deste projecto-piloto. Cascais e Oeiras são dois dos dezoito concelhos que integram a Área Metropolitana de Lisboa, a principal área metropolitana do país (Figura 1).

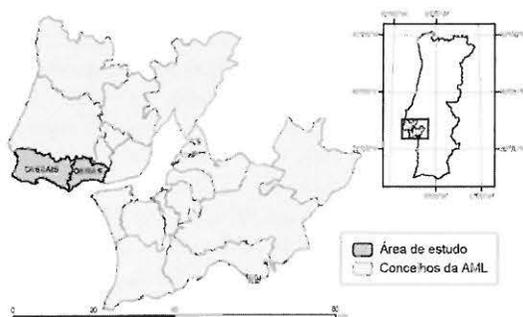


Figura 1
Localização da área de estudo.

A área de estudo tem uma população total residente de 332.811 habitantes (INE, 2001), resultando numa densidade populacional média de 2332 habitantes/km², bem acima da média nacional que é de 112 habitantes/km². No entanto, essa densidade varia significativamente no interior destes concelhos. Mesmo ao nível da secção estatística alguns polígonos são bastante extensos e não traduzem realisticamente a desigual distribuição de população no seu interior.

A escolha desta zona teve por base os seguintes factores: a) as suas características geográficas, nomeadamente o seu carácter simultaneamente urbano e suburbano, com forte actividade económica, b) a disponibilidade e acesso a dados de *input*, e c) familiaridade pessoal com a área, facilitadora das actividades de verificação e trabalho de campo.

2.2. Dados

Neste exercício de modelação espacial, são utilizados dois tipos gerais de dados: a) informação censitária e estatística e b) dados fisiográficos (Tabela 1). A informação censitária mais recente (2001) fornece os quantitativos populacionais a serem espacializados, enquanto o segundo tipo de dados permite definir as unidades espaciais usadas para desagregar os valores dos Censos.

Tabela 1
Dados usados para modelar distribuições nocturna e diurna da população.

Dados	Fonte	Data	Tipo
Eixos de via	GeoPoint	2004	Vectorial (linha)
Uso do solo (COS'90; CLC2000)	IGP; IA	1990; 2000	Vectorial (polígono)
Censos (BGRI)	INE	2001	Vectorial (polígono)
Quadros de pessoal	DGEEP	2001	Tabela
Movimentos pendulares	INE	2001	Tabela (matriz O/D)

Os dados de *input* apresentam elevada consistência temporal, com a excepção dos eixos de via. Devido à importância destes dados na modelação, na fase de pré-processamento foi decidido modificá-los de forma a representarem a realidade em 2001. A cartografia de uso e ocupação do solo também foi corrigida e melhorada na área de estudo.

2.3. Modelo

A modelação da distribuição da população assenta numa técnica de cartografia dasimétrica que

usa eixos de via (i.e., ruas) como base de referência para a desagregação da população (Figura 2). Na Figura 2, dados de *input* estão assinalados a cinzento claro, produtos intermédios ou sub-produtos a cinzento escuro, e resultados principais a branco e negro. Esta metodologia foi adaptada duma abordagem proposta e testada pelo Laboratório Nacional de Los Alamos, EUA (MCPHERSON e BROWN, 2003).

A distribuição nocturna foi obtida por interpolação da população censitária ao nível da secção estatística para vias residenciais rasterizadas. Para máximo rigor e elevada resolução espacial, a distribuição populacional diurna incorpora a componente trabalhadora e estudante através da informação sobre localização de empresas e serviços públicos e privados (como escolas e hospitais) e respectiva população deslocada. Para tal foram geo-referenciados na área de estudo 4316 locais de trabalho e estabelecimentos de ensino, 1395 dos quais de forma manual com apoio de dados auxiliares e trabalho de campo, de forma a conseguir o rigor pretendido. Para os restantes foi possível proceder à geo-codificação semi-automática em ArcGIS usando o seu endereço (Figura 2).

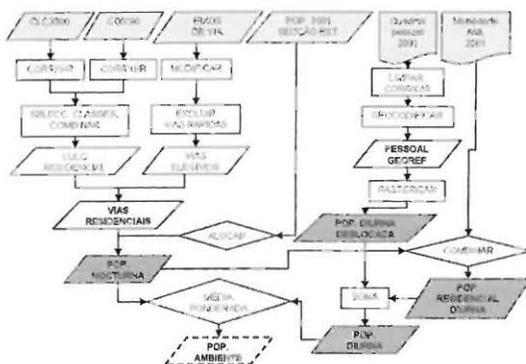


Figura 2 Modelo para cartografar a distribuição espacial e temporal da população.

A distribuição diurna resulta da combinação da população deslocada no local de trabalho ou estudo com a população que permanece na sua residência, de acordo com as estatísticas de mobilidade inter-concelhia (INE, 2003). Os totais da população assim distribuída respeitam os valores oficiais para cada zona de origem (secções estatísticas e concelhos).

3. Resultados

Os resultados originais são constituídos por superfícies matriciais com o número de pessoas por célula de 25 metros em 2001, representando assim

densidades populacionais por 625 m². As distribuições nocturna e diurna representam a densidade máxima num dia útil, assumindo que de noite toda a população está nas suas residências, e que no período diurno toda a população trabalhadora e estudante está presente nos locais de trabalho e estudo, e a remanescente na sua residência. Esta situação necessariamente constitui uma simplificação da realidade, mas mesmo assim preferível a uma média zonal por polígono censitário.

A população ambiente é estimada através duma média ponderada da população nocturna e população diurna, considerando a proporção de períodos nocturnos e diurnos que ocorrem numa semana típica de trabalho, de forma a representar num único indicador uma média temporal semanal da densidade populacional que tem em consideração as principais actividades humanas - repouso, trabalho e estudo.

3.1. Verificação e validação

A avaliação da qualidade da distribuição diurna da população foi limitada pela ausência de dados de referência apropriados, tendo no entanto os resultados sido controlados de duas formas: a) os dados de *input* (em especial os da DGEEP) foram verificados através de cruzamento com outras fontes (o que permitiu detectar e corrigir erros) e via trabalho de campo, quanto à sua localização, e b) os resultados foram comparados com dados de detecção remota para confirmar a exactidão posicional das distribuições. Os quantitativos de pessoal da DGEEP não foram disputados, tal como a informação censitária oficial.

A qualidade da distribuição nocturna (residencial) foi avaliada usando a maior resolução das subsecções estatísticas como referência, numa análise de correlação. As distribuições modeladas foram agregadas por subsecção e comparadas com os valores respectivos do *Censos 2001*. Obtiveram-se coeficientes de correlação de 0,84 para Cascais e 0,79 para Oeiras, concluindo-se que o desempenho da modelação nocturna é bastante satisfatório, dada a sua alta resolução espacial e considerando o elevado número de amostras usado (2433 subsecções em Cascais, 1456 em Oeiras).

4. Aplicações

Como exemplos de aplicação dos resultados no contexto da avaliação de risco e apoio a emergências, foram simulados os quatro cenários seguintes, meramente exemplificativos de diferentes tipos de emergências.

4.1. Cenário A: Acidente tecnológico (fuga tóxica gasosa)

Um camião-cisterna que transporta produtos químicos altamente tóxicos tem um acidente grave pelas 11h00 junto ao nó de Oeiras da auto-estrada A5, libertando imediatamente uma pluma tóxica que evolui por acção do vento fraco de NNW, direcção habitual na zona. A Figura 3 representa a análise da situação descrita, com indicação dos contornos da pluma tóxica contendo concentrações nocivas para a saúde humana.

4.2. Cenário B: Desastre natural (sismo)

Pelas 15h00, dá-se um sismo de grande intensidade com epicentro ao largo de Cascais que provoca grande destruição e colapso de estruturas no centro da vila. A Figura 4 representa análise da situação descrita, com indicação da área mais gravemente afectada.

4.3. Cenário C: Atentado terrorista (bomba)

Pelas 16h30 dá-se a detonação de um engenho explosivo de grande potência no CascaiShopping, em Cascais, provocando grande destruição de estruturas e um forte incêndio. A Figura 5 representa análise da situação descrita, com indicação da área mais gravemente afectada.

4.4. Cenário D: Surto epidemiológico

Através da manifestação lenta de sinais e sintomas, é descoberto que em Carnaxide, Oeiras, a população presente numa dada área foi exposta ao longo de várias semanas a um agente tóxico ou patogénico. A Figura 6 representa análise da situação descrita, com indicação da área potencialmente afectada.

Com base nas análises efectuadas em SIG dos cenários descritos, é possível comparar para o cálculo da população exposta os resultados da utilização directa dos dados dos censos 2001 ao nível da secção estatística (usando simples interpolação zonal) com os obtidos usando os dados do modelo (Tabela 2).

Em todos os cenários apresentados verificam-se discrepâncias significativas nos valores de população obtidos usando os dados do modelo *versus* utilização directa dos dados censitários. Nos cenários relativos a eventos diurnos (A, B, e C), o uso dos dados do INE resulta numa sub-estimação importante da população exposta, fornecendo uma base provavelmente irrealista que levaria a sub-dimensionar a resposta dos serviços de emergência.

Mesmo numa ocorrência mais dilatada no tempo (cenário D), a utilização dos dados do modelo (população ambiente) indica uma população média afectada nesse período 37% superior àquela identificada apenas com base nos dados censitários.

Para além da utilidade demonstrada no domínio da gestão de emergências, no campo da Saúde estes dados poderiam ter múltiplas utilizações (FREIRE, 2007): em epidemiologia; em estudos que relacionem saúde pública e factores ambientais com incidência localizada; na análise da capacidade dos serviços *versus* população na área de influência, designadamente considerando a variação temporal de população nessa área no dimensionamento da capacidade de resposta de unidades existentes; consideração da distribuição diurna da população como critério para localização de unidades de saúde, nomeadamente das de proximidade (e.g., centros de saúde e respectivas extensões).

5. Conclusões

Como a população não é estática, as actividades de protecção civil e segurança beneficiariam da utilização de dados fiáveis possuindo desagregação espacial e temporal acrescida para estimação das vulnerabilidades humanas.

A abordagem implementada, baseada em dados oficiais, permite modelar com assinalável rigor as distribuições diurnas e nocturnas da população, e suporta análise à escala local. Esta abordagem modela ainda correctamente as pessoas que trabalham no domicílio, por oposição a considerar população activa como ausente da residência. O principal valor destes resultados reside na sua elevada desagregação e resolução espacial, no facto das distribuições nocturnas e diurnas terem a mesma bases espacial de referência, e na aproximação com maior detalhe e realismo da distribuição populacional no período diurno, o que possibilita análises mais rigorosas nesse período. A combinação das duas distribuições resulta ainda numa única métrica que aproxima uma representação da população ambiente. O modelo cumpre ainda os requisitos necessários para desagregar população em superfícies - não existência de valores negativos e preservação dos totais por zonas de origem.

Dada a disponibilidade e características dos dados em Portugal, esta metodologia pode ser aplicada a qualquer concelho das Áreas Metropolitanas de Lisboa e do Porto (abrangendo 40% da população de Portugal), praticando-se as precauções referidas.

Futuras versões beneficiariam da modelação melhorada de actividades distribuídas (i.e., limpeza, segurança, etc.) e incorporação da população nos transportes, envolvida em outras actividades (compras

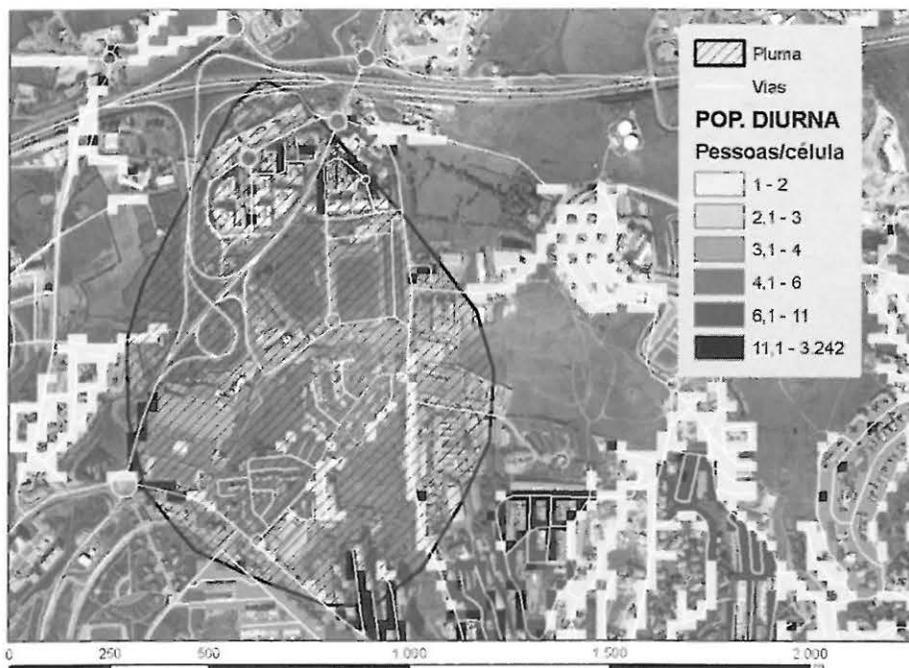


Figura 3
Cenário A.

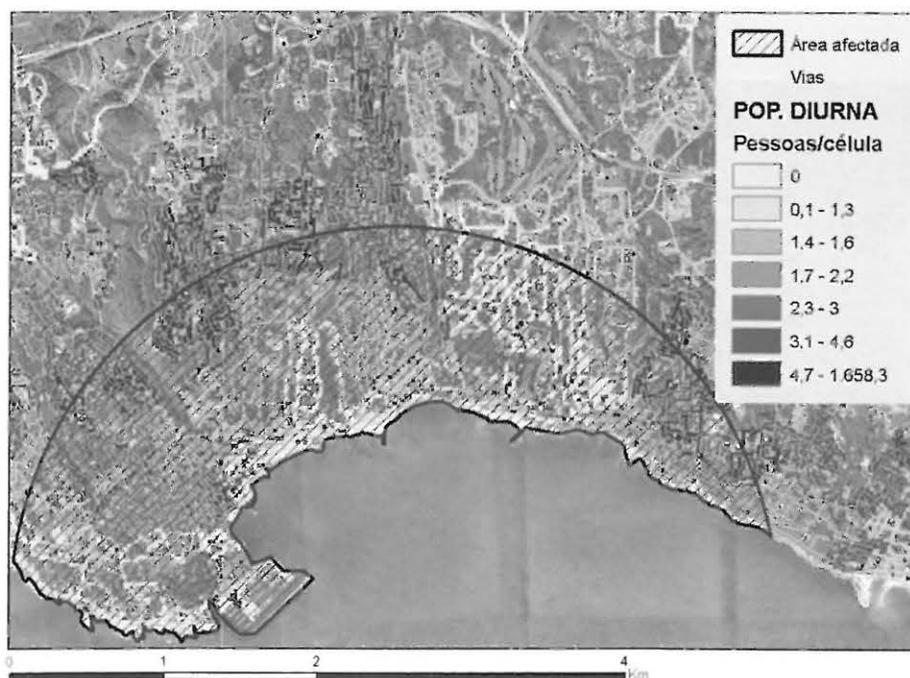


Figura 4
Cenário B.

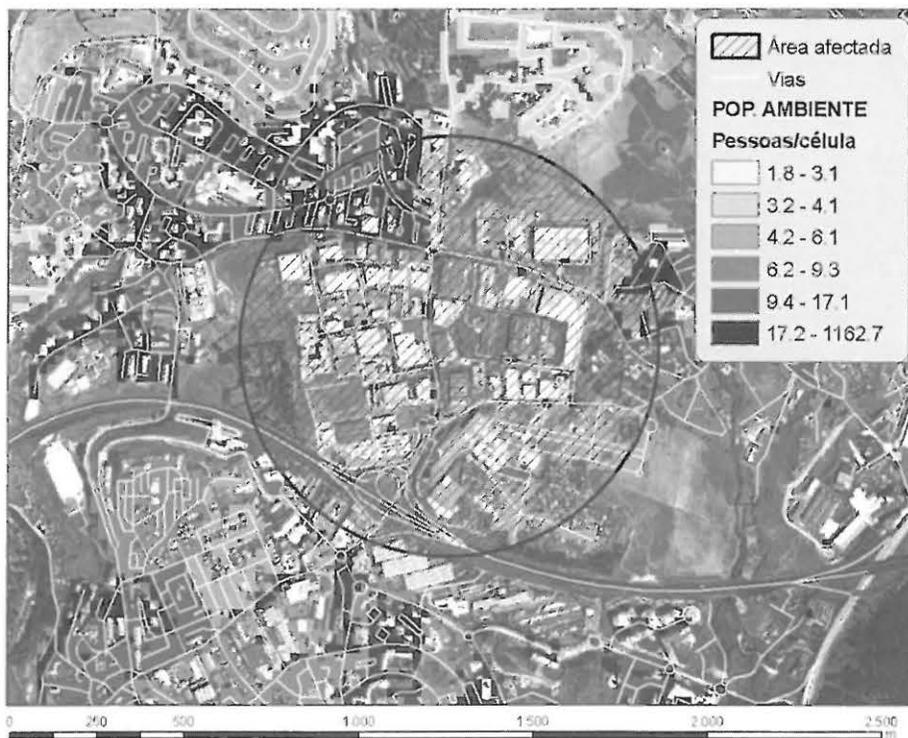


Figura 5
Cenário C.

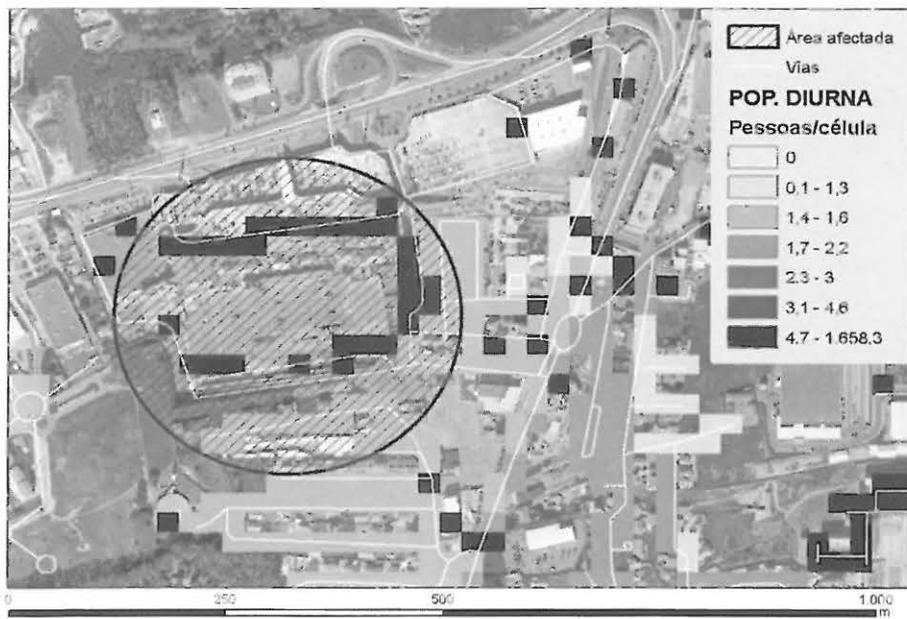


Figura 6
Cenário D.

Tabela 2
População total potencialmente afectada em cada cenário.

Cenários	População exposta			
	Dados INE (Secção)	Dados modelo (Pop. diurna)*	Diferença (pessoas)	Diferença (%)
A	2144	3950	1806	84%
B	22841	28944	6113	26%
C	86	2151	2065	2400%
D	4471	6106*	1635	37%

* No cenário D foi usada a superfície de população ambiente de base semanal.

lazer) e deslocada da habitação ou trabalho, bem como de segmentações temporais acrescidas (e.g., no ciclo diário ou variações sazonais). A existência de informação origem-destino mais desagregada, além de proporcionar modelação mais rigorosa da população residencial diurna, permitiria ainda representar e analisar cartograficamente fluxos de retorno ao domicílio que poderão ser relevantes nomeadamente para a resposta do sistema de saúde a ocorrências epidémicas. Na análise de vulnerabilidades humanas, seria ainda importante modelar a população envolvida em actividades no interior de edifícios e ao ar livre.

Agradecimentos

Este trabalho foi grandemente facilitado pela colaboração da GeoPoint Lda. Agradece-se também à Junta Metropolitana de Lisboa a cedência de informação relativa aos equipamentos escolares, proveniente do Sistema Metropolitano de Informação Geográfica - Grande Área Metropolitana de Lisboa.

6. Referências bibliográficas

- BALK, D. L.; DEICHMANN, U.; YETMAN, G.; POZZI, F.; HAY, S. I. e NELSON, A. (2006) - "Global mapping of infectious diseases: methods, examples and emerging applications". In HAY, S. I.; GRAHANA, A. J. e ROGERS, D. J. (Eds) - *Advances in Parasitology*, vol. 62. London: Academic Press, pp. 119-156.
- BHADURI, B.; BRIGHT, E.; COLEMAN, P. e DOBSON, J. (2002) - "LandScan: Locating People is What Matters". *Geoinformatics*, Vol. 5, No. 2, pp. 34-37.
- CHEN, K; MCANENEY, J.; BLONG, R.; LEIGH, R.; HUNTER, L. e MAGILL, C. (2004) - "Defining area at risk and its effect in catastrophe loss estimation: a dasymetric mapping approach". *Applied Geography*, 24, pp. 97-111.
- DOBSON, J. E.; BRIGHT, E. A.; COLEMAN, P. R.; DURFEE, R. C. e WORLEY, B. A. (2000) - "A Global Population Database for Estimating Population at Risk". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(7), pp. 849-857.
- FEMA (2004) - *Using HAZUS-MH for Risk Assessment*. Technical Manual, FEMA 433. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency. Disponível em www.fema.gov/HAZUS.
- FISHER, P. F. e LANGFORD, M. (1996) - "Modeling sensitivity to accuracy in classified imagery: A study of areal interpolation by dasymetric mapping". *The Professional Geographer*, 48, pp. 299-309.
- FREIRE, S. (2007) - "O Projecto DemoCarto: modelação a alta resolução das Distribuições Diurna e Nocturna da População para Planeamento e Tomada de Decisão". *Congresso Internacional sobre Planeamento Urbano - Avaliação do Impacte na Saúde*. Poster. Lisboa, Portugal, 23 Outubro.
- INE (Instituto Nacional de Estatística) (2001) - *Recenseamento Geral da População e da Habitação*. Lisboa.
- INE (Instituto Nacional de Estatística) (2003) - *Movimentos Pendulares e Organização do Território Metropolitano: Área Metropolitana de Lisboa e Área Metropolitana do Porto 1991-2001*. Lisboa.
- MCPHERSON, T. N. e BROWN, M. J. (2003) - "Estimating daytime and nighttime population distributions in U.S. cities for emergency response activities". Preprints: *84th AMS Annual Meeting*, AMS, Seattle, WA, 10 p.
- NRC (National Research Council) (2007) - "Tools and Methods for Estimating Populations at Risk from Natural Disasters and Complex Humanitarian Crises". *Report by the National Academy of Sciences*, Washington, D.C.: National Academy Press, 264 p.
- OLIVEIRA, C. S.; SÁ, F. Mota de e FERREIRA, M. A. (2005) - "Application of two different vulnerability Methodologies to Assess Seismic Scenarios in Lisbon". *Proceedings of 250th Anniversary of the 1755 Lisbon Earthquake*. November 1-4, Lisbon, Portugal.
- SUTTON, P.; ELVIDGE, C. e OBREMSKI, T. (2003) - "Building and evaluating models to estimate ambient population density". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(5), pp. 545-553.
- TOBLER, W. R. (1979) - "Smooth Pycnophylactic Interpolation for Geographical Regions". *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 74, Nº. 367, pp. 530-535.