

Modelagem *raster* para distribuição de viagens urbanas

Sérgio Pinto Bártoli
Pastor Willy Gonzales Taco
Yaeko Yamashita

Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes – CEFTRU
Programa de Pós-Graduação em Transportes – PPGT
Universidade de Brasília – UnB
sergio@bartoli.com.br; pwgtaco@hotmail.com; yaeko@unb.br

RESUMO

O artigo apresenta uma proposta metodológica de modelagem espacial em formato *raster* para distribuição de viagens urbanas utilizando os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Sensoriamento Remoto (SR) e o Método de Análise Hierárquica (MAH). Através de uma estrutura hierárquica a metodologia gera mapas de impedância do deslocamento e superfícies de custo a partir dos quais é obtida a matriz origem/destino. Para testar a validade da metodologia foi realizado um estudo de caso, no qual o coeficiente de determinação (R²) obtido revela que o modelo tem capacidade de explicar aproximadamente 81% dos dados relativos ao número de deslocamentos entre zonas de tráfego.

ABSTRACT

This research presents a proposal methodology of space modeling in format to raster for distribution of urban trips using the Geographic Information Systems (GIS), Remote Sensing (RS) and the Analythic Hierarchy Process (AHP). Through a hierarchic structure the methodology generates maps of impedance of the displacement and surfaces of cost from which origin/destination matrix is gotten. To test the validity of the methodology a case study was carried through, getting itself that the coefficient of determination (R²) gotten discloses that the model has capacity approximately to explain 81% of the relative data to the number of displacements between traffic zones.

1. Modelagem espacial *raster*

A demanda por transporte acontece no espaço urbano em função da distribuição espacial das atividades. Para se compreender melhor a questão da demanda e dos deslocamentos da população, se faz necessário o entendimento das relações e das variáveis que envolvem esse processo. Dentre as principais variáveis, destacam-se o uso do solo, as atividades socioeconômicas e o sistema viário (VASCONCELOS, 1996). Para se analisar o relacionamento espacial entre esses fatores, o artigo apresenta uma metodológica de modelagem espacial *raster* para distribuição de viagens urbanas, fazendo uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Sensoriamento Remoto (SR) e do Método de Análise Hierárquica (MAH). A vantagem do trabalho em relação às tradicionais está relacionada ao nível de agregação das informações (SHAW, 1993). Nas propostas tradicionais, as unidades de estudo denominadas como Zonas de Tráfego (ZT) são definidas geralmente em função do uso e ocupação do solo e o sistema viário (ANTP, 1997). Enquanto os modelos *raster* podem apresentar níveis diferentes de agregação, pois utilizam a menor forma disponível de representação da informação, que é o *pixel*.

2. Metodologia de modelagem espacial *raster* para distribuição de viagens urbanas

Este item apresenta a proposta metodológica composta de cinco etapas, junto às ferramentas necessárias para sua realização (SIG, SR, MAH), assim como os produtos gerados, conforme Bartoli (2000).

2.1. Diagnóstico espacial da área analisada (Etapa 1)

Consiste na realização de um levantamento espacial (foto-interpretção) do sistema de transporte urbano, identificando os fatores que poderiam afetar a distribuição de viagens, tais

como: uso e ocupação do solo urbano (localização, identificação, caracterização e análise do adensamento dos diversos padrões de uso do solo encontrados, das atividades industriais, comerciais e de serviços); diagnóstico do sistema viário (identificação e classificação quanto às condições de fluxo, da qualidade do pavimento, da topografia da região); e, diagnóstico do sistema de transporte por ônibus (obtenção dos itinerários e a configuração das linhas de ônibus existentes).

2.2. Georeferenciamento de dados e informações (Etapa 2)

Equivale à criação do projeto no ambiente SIG, e as principais tarefas desta etapa são: georeferenciamento da base digital e das fotografias aéreas (identificar a distribuição das atividades e dos deslocamentos no ambiente urbano); definição da estrutura da base de dados geográfica (organização dos dados em índices e categorias de acordo com o tipo e natureza das informações); avaliação e classificação das informações; transformação dos vetores de informação em feições geográficas (pontos, linha e áreas) e ligação dos mesmos com suas tabelas do banco de dados.

4.3. Análise espacial da estrutura urbana (Etapa 3)

Envolve a determinação da geração de viagens, a determinação dos fatores de atração e a avaliação da acessibilidade. Utilizam-se informações qualitativas e quantitativas obtidas através da etapa anterior. As quantitativas são aquelas que apresentam uma forma de mensuração definida (número de viagens geradas, distância, tempo de viagem, velocidade). As qualitativas estão relacionadas a fatores subjetivos, que normalmente não apresentam uma forma trivial de mensuração (atratividade, qualidade do sistema viário, segurança). Para evitar subjetividades na ponderação da importância das informações, recomenda-se o uso do Método de Análise Hierárquica (SAATY, 1991).

4.3.1. Geração e atração de viagens

Será obtida através da classificação do uso e ocupação do solo para determinar o comportamento das diversas áreas da cidade em relação à capacidade de gerar deslocamentos. A técnica consiste na obtenção destas informações através da identificação dos padrões de uso do solo desenvolvida por Taco (1997).

4.3.2. Análise espacial da acessibilidade e julgamento da estrutura hierárquica e cálculo de prioridades

O objetivo é avaliar o ambiente urbano identificando os critérios para serem representados graficamente por meio de um modelo de dados *raster* e classificando-os mediante a aplicação de uma escala de priorização (MAH). Procura avaliar os critérios escolhidos, as suas importâncias perante a distribuição de viagens, e calcular as prioridades entre os critérios e alternativas, levando em consideração a estrutura hierárquica de decisão para a distribuição de viagens, conforme Figura 1. Os critérios que devem ser utilizados para a confecção do mapa *raster* de acessibilidade são: condições de fluidez do tráfego (avaliar os índices de congestionamento de todas as vias, pois interfere diretamente no tempo de viagem); topografia (interfere principalmente no deslocamento a pé); acessibilidade de pedestres (priorizar o espaço urbano para o deslocamento dos pedestres, podendo se trabalhar com uma diversidade maior de elementos para julgar os deslocamentos a pé na área urbana).

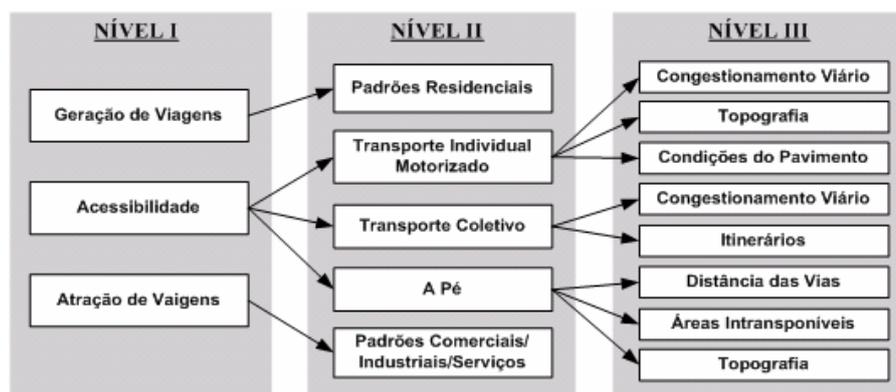


Figura 1: Estrutura hierárquica para a obtenção da distribuição de viagens

O cálculo das prioridades é obtido pelo julgamento paritário dos critérios da estrutura de decisão (Figura 1), para os níveis I, II e III. É realizado mediante comparação da importância relativa de um sobre outro, em função de suas características quantitativas e/ou qualitativas. Os elementos do último nível de critério são chamados de alternativas. Com o julgamento dos critérios e alternativas são obtidas as prioridades finais de cada alternativa. As regras do julgamento para a priorização dos critérios que definem a distribuição de viagens são:

- **Condições de fluidez do tráfego:** Comparando separadamente o grau de congestionamento das vias (congestionado, normal e livre) e as alternativas identificadas para pavimentação e declividade;
- **Uso e ocupação do solo:** Analisando a área urbana para deslocamentos fora das vias (a pé), distinguindo as regiões intransponíveis;
- **Sistema de transporte coletivo por ônibus:** Analisando o itinerário dos ônibus, distinguindo as vias onde existe o serviço;
- **Classificação dos pixels:** Após a verificação das prioridades entre as alternativas, faz-se uma relação de proporcionalidade para cada critério entre os pesos associados de cada alternativa com a somatória total dos pesos.

4.3.3. Elaboração dos mapas temáticos

Os mapas necessários são:

- **Da geração de viagens:** Cada *pixel* armazena um valor relacionado à capacidade de geração de viagens da parcela da área urbana que ele representa;
- **Da atração de viagens:** Este mapa possibilita a escolha do *pixel* que melhor represente a atratividade de viagens para cada zona de tráfego;
- **Dos fatores ponderados:** Para confecção do mapa de acessibilidade em relação ao transporte público, transporte individual motorizado e deslocamento a pé;
- **Da acessibilidade de toda a área urbana:** Obtido da sobreposição ponderada pela matriz de julgamento de todos os mapas de deslocamento.

4.4. Modelagem das superfícies de custo (Etapa 4)

Visa obter as superfícies de custo, que serão utilizadas como elementos de impedância ao deslocamento. O fator impeditivo às viagens é inversamente proporcional à distribuição de viagens, ou seja, quanto maior a impedância associada entre uma zona geradora e atratora de viagens, menor a quantidade de viagens alocada para este par de zonas. Usualmente, o fator impeditivo adotado é a distância entre os pares de zonas. Entretanto a modelagem *raster* possibilita um tratamento sistêmico de todos os fatores desejados (quantitativos ou

qualitativos), resultando no mapa de acessibilidade, que representa a facilidade/dificuldade de se deslocar no ambiente urbano.

Para a confecção da superfície de custo é necessária a escolha de um ponto inicial, no qual a rotina de processamento possa calcular o custo associado a todos os outros *pixels* do mapa a partir deste. A escolha deste ponto está associada à localização de um *pixel* que represente com mais intensidade a atração de viagens da unidade de estudo (zoneamento) escolhida, seja ele por concentração de atividades ou por questões geográficas. A Figura 2(a) apresenta o mapa *raster* de acessibilidade, que é uma representação matricial na qual cada célula arquiva uma informação. A coloração de cada uma das células desta matriz possibilita uma diferenciação visual em classes. A Figura 2(b) representa uma superfície de custo, na qual foi adotado que o ponto inicial seria a célula da interseção entre a linha 2 e a coluna 3 (célula $a_{2,3}$). A partir desta célula, a rotina implementada pelo SIG analisa todas as possibilidades para as demais células, armazenando o valor do somatório do caminho de menor custo para cada uma delas. Isto pode ser melhor compreendido analisando a célula $a_{6,3}$. O menor custo de deslocamento para se sair da célula $a_{2,3}$ e se chegar na célula $a_{6,3}$ está representado na Figura 2(b), onde o valor associado a esta célula (366) equivale à somatória dos valores $100+100+83+83$, correspondendo as células $a_{3,3}$, $a_{4,3}$, $a_{5,2}$ e $a_{6,3}$.

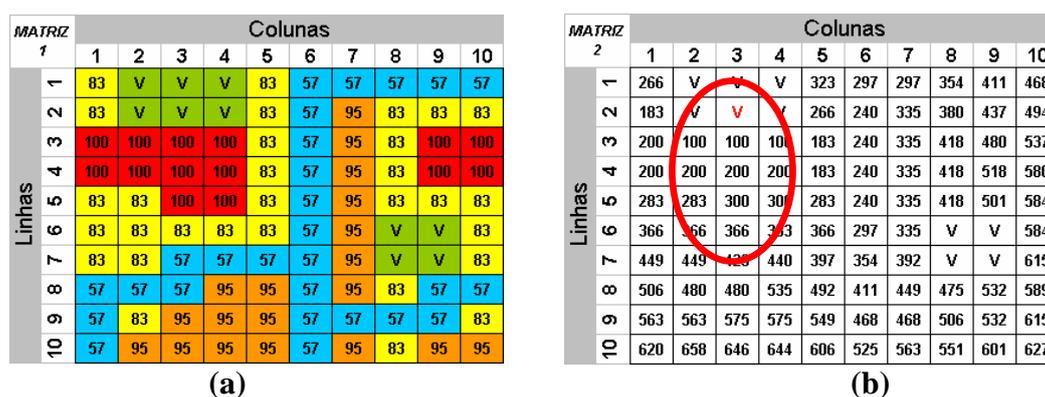


Figura 2: Matriz representativa de um (a) Mapa de Custo e de uma (b) Superfície de Custo

4.5. Obtenção da matriz de origem/destino estimada (Etapa 5)

Os dados referentes à distribuição de viagens serão obtidos através do cruzamento do mapa de geração de viagens e as superfícies de custo, ou seja, o valor de cada *pixel* do mapa de geração (que armazena o valor da geração de viagens para a parcela de espaço geográfico que ele representa) será dividido pelo valor do *pixel* correspondente no mapa de superfície de custo. Esse mapa armazena o valor representativo do menor custo de deslocamento entre o *pixel* em questão e o escolhido como mais representativo da atividade de viagens da unidade de estudo adotada. Essa operação é realizada para considerar a impedância existente em cada *pixel* para a realização dos deslocamentos. Finalizado o processo, deve-se agrupar as informações de acordo com as unidades de estudo adotadas, para obtenção dos valores que representam o fluxo de viagens. Desta forma, os resultados encontrados serão os valores das células de uma matriz O/D, composta por elementos V_{ij} , representativa da quantidade de viagens entre a unidade de origem i e a unidade de destino j .

5. Aplicação da metodologia

A metodologia foi aplicada na cidade satélite de Sobradinho localizada a cerca de 23,5km a nordeste de Brasília, às margens da rodovia BR-020, ocupando uma área aproximada de 573 km². Sobradinho é uma cidade-dormitório, pois parte da sua população desenvolve atividades

ligadas ao Plano Piloto. Concomitantemente, a sua estrutura oferece autonomia de uma cidade com atividades próprias nos setores industrial, comercial, agrícola e de serviços.

5.1. Uso e ocupação do solo urbano e diagnóstico do sistema viário e de transporte coletivo urbano por ônibus - STC

O projeto urbanístico da cidade de Sobradinho apresenta setores funcionais com destinações muito rígidas, conforme os padrões de zoneamento característicos das outras cidades do Distrito Federal. São eles: setor residencial-comercial; quadra comercial; setor industrial; e áreas isoladas, conforme Figura 3(a).

A classificação hierárquica das vias de Sobradinho é apresentada na Figura 3(b), sendo constituída por vias arteriais, principais, secundárias, e locais. O sistema viário existente no tempo da aplicação da metodologia foi considerado em boas condições de tráfego e de pavimentação em bom estado de conservação. Foram identificadas apenas algumas vias onde as condições de fluxo de veículos se apresentam congestionadas (Figura 3(c)). Ainda em relação ao sistema viário, a questão das declividades na área urbana central não oferece grandes dificuldades para o deslocamento motorizado.

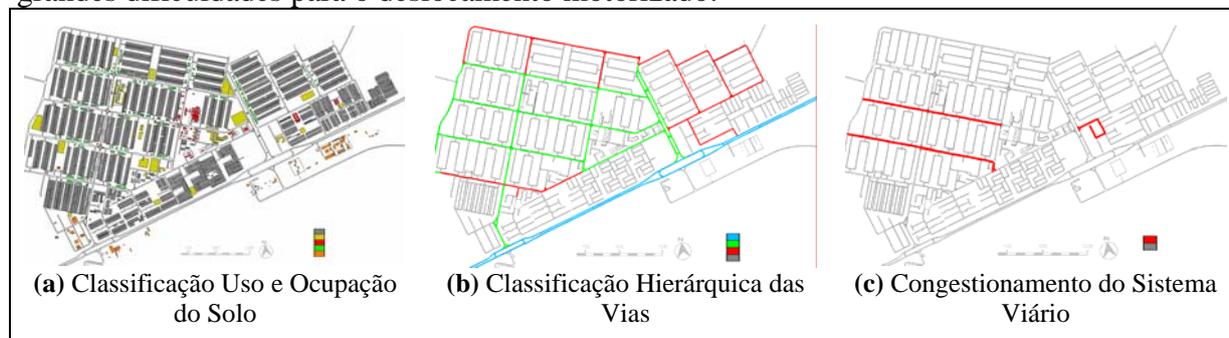


Figura 3: Caracterização urbana e classificação viária

As linhas do transporte coletivo por ônibus da cidade de Sobradinho foram agrupadas em três percursos, devido à sobreposição existente entre os trajetos de ônibus. Totalizando 30 linhas de ônibus, o STC envolve linhas internas circulares, com o percurso representado pela Figura 4(a), e linhas externas de ligação entre Sobradinho com Brasília, Planaltina e Planaltina de Goiás, que não são objeto de análise.

5.2. Georreferenciamento e criação do banco de dados geográfico

Em paralelo à etapa de diagnóstico, elaborou-se a base de dados, inserindo no sistema os mapas cartográficos e as ortofotos. As outras características a serem utilizadas no projeto são provenientes da etapa de diagnóstico (CODEPLAN, 1991). O *software* de SIG utilizado foi o *MGE - Modular GIS Environment* da *Intergraph Corporation* (1994), que manipula dados tanto na estrutura vetorial como *raster*, oferecendo ferramentas de transformação *raster/vetor/raster*. O banco de dados geográfico está representado por uma Base Digitalizada com as informações sobre o sistema viário, edificações, curvas de nível, e coordenadas (*UTM*) da cidade de Sobradinho numa escala de 1:10.000; Fotografias Aéreas de 1991 georreferenciada pelo método de pontos de controle, em uma escala de 1:2.000; e, Feições Geográficas das residências; comércios; indústrias; serviços; escolas; malha viária, hospitais.

5.3. Análise espacial da estrutura urbana

Este item está subdividido em duas partes. A primeira trata do processo de classificação do uso e ocupação do solo, com o objetivo de se estimar a geração de viagens; e a segunda da

localização e ponderação com o método de tomada de decisão utilizado (MAH) dos fatores intervenientes na confecção do mapa de acessibilidade. Na estimativa de geração de viagens utilizaremos o índice de geração de viagens desenvolvido por Taco (1997), e cujo mapa é apresentado na Figura 4(b).

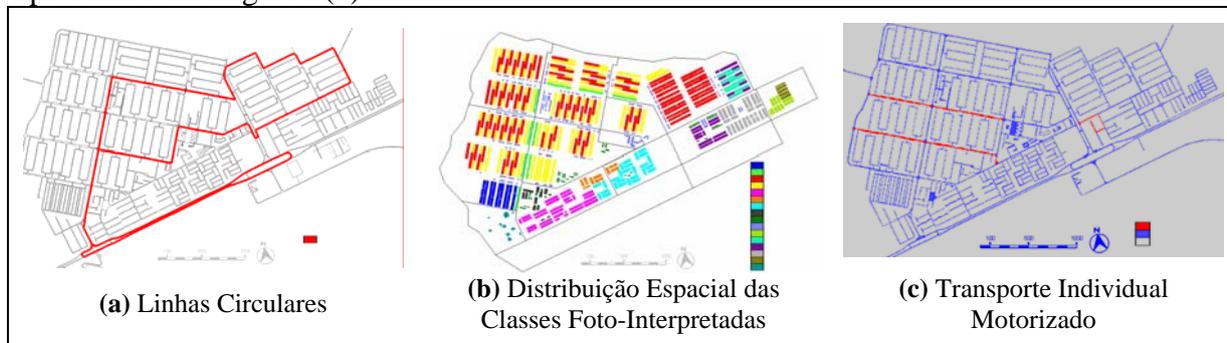


Figura 4: Mapas de características urbanas

Os elementos a serem ponderados para confecção do mapa de acessibilidade são o transporte coletivo, o transporte individual motorizado e a pé. A determinação da estrutura hierárquica para geração do mapa de acessibilidade está baseada na identificação das condições de declividade, pavimentação e congestionamento das vias, aliada às possibilidades de deslocamento a pé nas demais áreas. Na fase de diagnóstico, foi constatado que apenas o critério relacionado à fluidez do tráfego foi considerado e julgado um a um de forma a se poder priorizar a área urbana de Sobradinho para o transporte individual motorizado. Os julgamentos do estudo foram realizados por um grupo de 4 técnicos de transportes com formação específica na área. A Tabela 1 ilustra esse julgamento e sua representação *raster* é apresentada na Figura 4(c). Na análise dos deslocamentos realizados pelo transporte coletivo, foi avaliada primeiramente a sua oferta, identificando as vias onde trafegam os ônibus. Considerando que algumas dessas vias apresentam fluxos intensos e congestionamentos, resolveu-se aplicar também uma ponderação em relação a este critério. A matriz de julgamento para o transporte coletivo está apresentado na Tabela 1, e o resultado final deste julgamento está apresentado na Figura 5(a).

Tabela 1: Julgamento utilizado para Transporte Individual Motorizado e Coletivo (Nível II)

	Transporte Individual Motorizado				Transporte Coletivo			
	(α_1)	(α_2)	(α_3)	P	(α_1)	(α_2)	(α_3)	P
Vias Não Congestionadas	1	0,14	0,11	1,25	1	0,2	0,11	1,31
Vias Congestionadas	7	1	0,11	8,11	5	1	0,11	6,11
Área sem serviço	9	9	1	19	9	9	1	19

Para a definição dos critérios de impedância nos deslocamentos a pé, adotou-se as áreas contíguas às vias, como aquelas que por questão de facilidade e segurança, favorecem a esta modalidade de deslocamento. A matriz de julgamento para o deslocamento a pé pode ser vista na Tabela 2, e o mapa representativo ao deslocamento a pé está apresentado na Figura 5(b).

Tabela 2: Julgamento utilizado para deslocamento a Pé (Nível II)

Transporte a Pé	(α_1)	(α_2)	(α_3)	P
Próximo as Vias	1	0,33	0,11	1,44
Distante das Vias	3	1	0,14	4,14
Nas Vias	9	7	1	17

Os julgamentos do nível I da estrutura hierárquica e cálculo de prioridades tem por finalidade avaliar os critérios escolhidos e analisar a importância de cada um deles frente às possibilidades de deslocamento. Os julgamentos dos três critérios do transporte individual

motorizado (ζ_1); transporte coletivo (ζ_2) e deslocamento a pé (ζ_3) estão apresentados na Tabela 3. O valor do julgamento foi atribuído à variável $a_{i,j}$, onde i é o índice relativo à linha, $\forall i \in \{1, \dots, 3\}$, e j é o índice da coluna da matriz, $\forall j \in \{1, \dots, 3\}$.

Tabela 3: Matriz de Julgamentos para o Nível I

Fatores intervenientes no cálculo do Mapa de Custo	(ζ_1)	(ζ_2)	(ζ_3)	$P\zeta_i$
Transporte Individual Motorizado (ζ_1)	1	0,14	0,11	1,25
Transporte Coletivo (ζ_2)	7	1	0,2	8,2
Deslocamento a Pé (ζ_3)	9	5	1	15

O cálculo das impedâncias ao movimento se traduz na somatória ponderada pelas prioridades do Nível I acima exposto, de todos os mapas de deslocamentos, segundo os seus respectivos critérios de análise. O resultado final da análise está apresentado na Figura 5(c), no mapa de custo onde cada *pixel* representa um Índice de Dificuldade de Deslocamento (IDD), ou seja, um fator que pondera a dificuldade em se deslocar sobre a parcela do espaço geográfico que o *pixel* representa na área urbana. Os valores atribuídos a cada *pixel* na Figura 5(c) estão em escala indefinida, sendo importante apenas a relação de proporcionalidade entre eles.

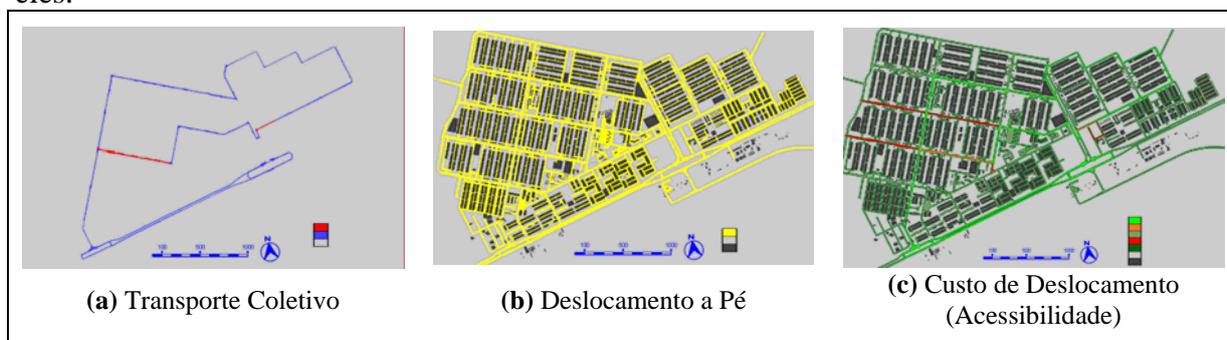


Figura 5: Resultado da análise em formato *raster*

5.4. Obtenção e análise das superfícies de custo por zonas de tráfego

Os fatores acima podem ser representados através de um mapa de impedância, chamado aqui de superfície de custo, que equivale a um *grid* em que cada *pixel* e que representa o menor custo de deslocamento entre um ponto inicial e os seus seguintes. Deve-se salientar que o objetivo deste estudo de caso é validar a metodologia comparando-a com a matriz O/D de 1991. Em função disto, os valores de distribuição de viagens devem estar agrupados conforme as unidades de estudo (ZT), mostradas na Figura 7(a).

Para cada uma das 14 ZT foi determinado um ponto que melhor representava a disposição espacial dos pólos atratores de viagem, e para cada uma dessas ZT foi modelada uma superfície de custos. Como pode ser visto na Figura 6(b), os valores para cada célula são visualizados em níveis de cor reclassificados em intervalos de 500 e 500 IDD's.

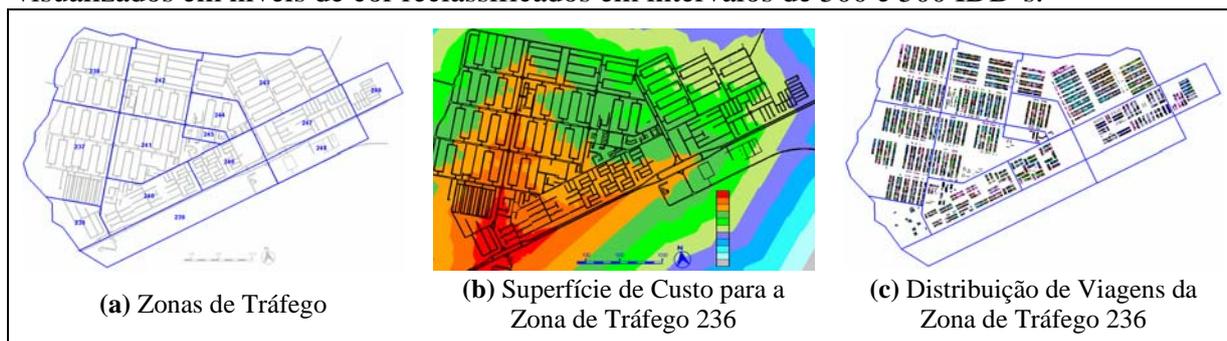


Figura 6: Mapas temáticos *raster* da área urbana de Sobradinho

5.5. Obtenção da matriz O/D

Os mapas que representam a distribuição de viagens para cada ZT apresentam pouca interpretação visual. Para efeito ilustrativo, um dos 14 mapas representativos da distribuição de viagens da ZT 236 é apresentado na Figura 6(c). A única interpretação possível desse mapa é a distinção dos valores dos *pixels*, em função da desuniformidade das cores do mapa e a reclassificação em faixas de distribuição que também não fornece grandes informações. A interpretação deste mapa e dos outros 13 devem ser feitas através de histogramas, na qual se faz a multiplicação separado por ZT do valor do *pixel* pela sua frequência, obtendo assim o número total de viagens atraídas por cada ZT.

6. Análise de resultados

Para avaliação dos resultados, elaborou-se o diagrama de dispersão da matriz O/D estimada x observada. Da análise pode-se inferir uma boa relação entre a matriz observada e a matriz estimada. A ressalva a ser feita neste gráfico é a concentração excessiva de pontos no eixo das ordenadas, onde, alguns valores que na matriz observada são diferentes de zero, e na matriz estimada são nulos. Isto pode ser explicado pelo fato de que a metodologia utilizada para cálculo da geração de viagens focaliza as classes residenciais ou residenciais mistas. Com isso, as ZT 239 e 248 (que apresentam um comportamento exclusivamente comercial) não apresentam valores para a geração de viagens, e por consequência, não possuem distribuição de viagens.

7. Conclusões e recomendações

No planejamento de transporte pode-se observar um grande avanço na concepção dos modelos matemáticos desenvolvidos para estudar a distribuição de viagens, principalmente através da utilização de funções mais complexas. Em contrapartida, o custo de levantamento das informações necessárias praticamente inviabiliza a aplicação em cidades de pequeno e médio porte. Desta forma, procurou-se explorar na modelagem proposta o potencial da análise espacial, através da modelagem *raster* o qual possibilitou a obtenção da Matriz O/D.

8. Referências

- ANTP - Associação Nacional de Transportes Urbanos - Transporte Humano: Cidades com Qualidade de Vida, São Paulo, Brasil (1997).
- BARTOLI, S. P. Metodologia para Distribuição de Viagens Urbanas com a Utilização do Sistema de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília DF (2000).
- BRUTON, M. J. Introdução ao Planejamento dos Transportes, Ed. Interciência/EDUSP, São Paulo (1979).
- CODEPLAN - COMPANHIA DO DESENVOLVIMENTO DO PLANALTO CENTRAL. Pesquisa Domiciliar de Transporte, Brasília (1991).
- INTERGRAPH. MGE – Modular GIS Environment – Grid Analyst, Estados Unidos (1994).
- OPENSHAW, S. Human systems modelling as a new grand challenge area in science. *Environment and Planning A*, v. 27, p. 159-164, (1995).
- PAPACOSTAS, C. S.; PROVEDOUROS, P. D. *Transportation Engineering and Planning*, Second Edition, Prentice-Hall International, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey (1993).
- SAATY, T.L. *Método de Análise Hierárquica*, McGraw-Hill, Rio de Janeiro (1991).
- SHAW, S. L. *GIS for Urban Travel Demand Analysis: Requirements and Alternatives*. *Comput., Environ. and Urban Systems*, USA, v. 17, p. 15-29, (1993).
- TACO, P.W.G. Modelo de Geração de Viagens com Aplicação dos Sistemas de Informação Geográfica e Sensoriamento Remoto. Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, DF (1997).
- VASCONCELLOS, E. A. *Transporte Urbano nos Países em Desenvolvimento*, São Paulo, Editoras Unidas (1996).