

GEOINFORMAÇÃO EM URBANISMO

Cláudia Maria de Almeida, Gilberto Câmara e Antonio Miguel V. Monteiro (Org.)

Apresentação

“Geomatics in Urban Planning – Challenges & Perspectives”

Michael Batty

Prefácio

“Geoinformação em Urbanismo”

Cláudia Maria de Almeida, Gilberto Camara, Antonio Miguel Vieira Monteiro

I. Representações Computacionais do Espaço Urbano

1. “Territórios Digitais Urbanos”

Frederico Roman Ramos, Gilberto Camara, Antonio Miguel Vieira Monteiro

2. “Construindo Ontologias Urbanas”

Carolina Moutinho Duque de Pinho, Elizabeth Goltz, Gilberto Camara

II. Dimensões Humanas em Estudos Urbanos: Medidas Espaciais para as Desigualdades Socioterritoriais

3. “Indicadores Territoriais de Exclusão/Inclusão Social: Geoinformação como Suporte ao Planejamento de Políticas Sociais”

Patrícia Carneiro Genovez, Antonio Miguel Vieira Monteiro, Gilberto Camara, Corina da Costa Freitas

4. “De Conceitos a Medidas Territoriais: A Construção de Índices Espaciais de Segregação Urbana”

Flávia da Fonseca Feitosa, Gilberto Camara, Antônio Miguel Monteiro, Thomas Koschitzki, Marcelino Pereira dos Santos Silva

5. *“Armadilhas de Desigualdade: Detecção e Dinâmica Espacial, Trajetória das Desigualdades Sociais”*

Patrícia Carneiro Genovez, Antonio Miguel Vieira Monteiro, Gilberto Camara, Corina da Costa Freitas

III. Geotecnologias e Sensoriamento Remoto Orbital e Aerotransportado para a Compreensão do Urbano

6. *“A Relevância de uma Infra-Estrutura Geoinformacional como Subsídio ao Desenvolvimento de Políticas Urbanas”*

Marcel Fantin, Marcello Alves Costa, Antonio Miguel Vieira Monteiro

7. *“Compatibilização de Bases de Dados Censitários para Análises Multitemporais com o Auxílio de Imagens Landsat”*

Flávia da Fonseca Feitosa, Antonio Miguel Vieira Monteiro, Gilberto Camara

8. *“Classificação de Cobertura do Solo Urbano Utilizando Imagens de Alta Resolução Espacial”*

Carolina Moutinho Duque de Pinho, Cláudia Maria de Almeida, Hermann Jochan Heinrich Kux, Camilo Daleles Rennó, Leila Maria Garcia Fonseca

9. *“Laser Scanner Aerotransportado no Estudo de Áreas Urbanas”*

Jorge Antonio Silva Centeno, Edson Aparecido Mitishita

IV. Mudanças Ambientais Globais e Impactos em Centros Urbanos: a Geoinformação no Suporte à Previsão, Enfrentamento, Recuperação e Mitigação de Desastres Naturais

10. *“Geoinformação e Desastres Naturais em Áreas Urbanas: o Caso do Furacão Catarina”*

Emerson Vieira Marcelino, Isabela Pena Viana de Oliveira Marcelino, Frederico de Moraes Rudorff, Roberto Fabris Goerl

11. *“Tornados em Santa Catarina: Análise Meteorológica e Determinação da Vulnerabilidade Socioambiental com o Auxílio de Geotecnologias”*

Isabela Pena Viana de Oliveira Marcelino Marcelino, Ernani de Lima Nascimento, Nelson Jesus Ferreira

V. A Captura do Metabolismo Urbano: Modelos e Modelagem Computacional de Dinâmicas do Espaço Urbano e Regional

12. “Perspectiva Histórica de Modelos de Dinâmicas Urbanas e Regionais”

Cláudia Maria de Almeida, Antonio Miguel Vieira Monteiro, Gilberto Camara

13. “Modelagem de Dinâmica Intra-Urbana no Bairro Savassi, Belo Horizonte, Brasil”

Marcela Maria Guimarães Godoy, Britaldo Silveira Soares Filho

14. “Redes Neurais e Autômatos Celulares como uma Plataforma para a Simulação de Mudanças do Uso do Solo Urbano”

Cláudia Maria de Almeida, José Marinaldo Gleriani

15. “Modelos Dinâmicos Espaciais e sua Utilização na Análise de Mudanças do Uso do Solo Regional”

Julio Cesar Refosco

Prefácio

Nos últimos dois séculos, em particular nas últimas décadas, a humanidade presenciou a drástica mudança de população de áreas rurais para urbanas. Entre 1950 e 1995, a população urbana na Ásia, África, América Latina e Caribe cresceu mais de cinco vezes, passando de 346 milhões para 1,8 bilhões de pessoas. Projeções das Nações Unidas sugerem que as populações urbanas estão crescendo de forma tão rápida, que 80% do crescimento da população mundial entre 1990 e 2010 ocorrerá em áreas urbanas, sobretudo na África, Ásia e América Latina (United Nations, 1998).

Dois aspectos correlatos deste rápido crescimento da população urbana foram o aumento do número de grandes cidades e a dimensão sem precedentes históricos adquirida por tais cidades de grande porte. Há apenas dois séculos, havia apenas duas “mega-cidades” no mundo (cidades comportando um milhão de habitantes ou mais) – Londres e Pequim. Em 1950, havia 80, e em 1990, já se somavam 293 “mega-cidades”. Uma grande (e crescente) proporção destas “mega-cidades” encontram-se na África, Ásia e América Latina, e muitas possuem populações que cresceram mais de dez vezes entre 1950 e 1990 (Hardoy et al. 2001).

A grande parte das mega-cidades latino-americanas encontra-se em território brasileiro, muitas das quais constituem regiões metropolitanas. As estratégias de desenvolvimento adotadas no Brasil, assim como em muitos países latino-americanos, estiveram orientadas para mercados externos, objetivando eficiência econômica e crescente competitividade. Isto implicou o progressivo aparecimento de economias externas de aglomeração¹, levando a um padrão espacial de desenvolvimento altamente concentrado (Fernandes et al. 1977).

¹ O termo “economias de aglomeração” é usado em economia urbana para descrever os benefícios que as empresas obtêm quando se localizam próximas entre si. Isto está

Entretanto, esta estrutura de desenvolvimento multi-centralizada baseada em “economias de aglomeração” apresentava sérias limitações. Após um período inicial de bom desempenho econômico, as regiões metropolitanas começaram a se comportar como “deseconomias de aglomeração”, devido a problemas que incluem o crescente aumento do preço da terra; a possibilidade de colapso dos sistemas de transporte, telecomunicações e/ou abastecimento de água; maior tempo e custos despendidos para deslocamentos diários; maiores custos de mão de obra e conseqüente encarecimento da produção; problemas ambientais; exclusão social e criminalidade.

As regiões metropolitanas e as grandes cidades brasileiras concentram hoje a atenção das autoridades de gestão territorial em nível local, regional e nacional. O conhecimento da complexa realidade dessas áreas em suas múltiplas dimensões e de modo dinâmico torna-se imprescindível para geri-las de forma eficiente. Não se trata apenas do levantamento de dados brutos, mas da proficiente manipulação e interpretação dos mesmos a partir de processamentos quantitativos (matemáticos e lógicos) sobre uma base espacial, de forma a revelar características e processos intrínsecos aos fenômenos em análise.

Dito de outra forma, não basta somente a confecção de mapas digitais coloridos ilustrando, por exemplo, a exclusão social de uma determinada cidade por quantis, mas é fundamental que, com o auxílio de técnicas apropriadas de análise espacial, se possa extrair tendências do padrão de manifestação da exclusão social de forma contínua no espaço. Ou ainda, não é suficiente apenas mapear a ocorrência de crimes em um sistema georreferenciado, mas sim estudá-los de forma dinâmica, entendendo a sua proliferação no espaço e no tempo em articulação com inúmeras variáveis socioeconômicas e biofísicas, e como as estradas podem atuar como vetores de expansão da

relacionado com a idéia de economias de escala e efeitos em cadeia, segundo a qual, quanto mais empresas aproximarem-se umas das outras, menor o custo de produção e maior o mercado consumidor a ser atingido.

criminalidade. Nessa linha de pensamento, elaborar mapas estáticos de uso do solo urbano não mais atende às necessidades atuais dos gestores locais, mas é necessário que se permitam simulações de diferentes cenários futuros de expansão urbana e dinâmica de uso do solo em ambiente computacional.

Aí reside o desafio da Geoinformação em gestão urbana e regional, que pode ser entendida como um paradigma emergente na pesquisa multi e inter-disciplinar que se dedica a explorar a extrema complexidade de problemas socioambientais em um ambiente de Sistemas de Informações Geográficas - SIG. Openshaw (2000) argumenta que a Geoinformação não se reduz ao uso de técnicas computacionais para solucionar problemas espaciais, mas se refere, ao contrário, a uma forma totalmente nova de se fazer ciência em um contexto geográfico.

A Geoinformação (também conhecida como Geomática, Ciências da Informação Espacial, Geocomputação ou Engenharia da Geoinformação) deve necessariamente se apoiar em estruturas de percepção ambiental que proporcionem o máximo de eficiência em seu objetivo último, que se traduz na fundamentação de abordagens científicas subjacentes à transformação de dados geograficamente referenciados em conhecimento.

Em um futuro muito próximo, devido à desenfreada velocidade de mudanças conjunturais e de circulação da informação em um mundo cada vez mais globalizado, os métodos analógicos convencionais de planejamento tornar-se-ão rapidamente inadequados a gerar respostas rápidas às crescentes demandas, fazendo com que órgãos governamentais de gestão e planejamento não mais possam prescindir do uso da Geoinformação em seu dia-a-dia.

Este livro se propõe a tratar das inúmeras possibilidades oferecidas pela Geoinformação para lidar com os problemas urbanos e regionais atuais. O livro compreende cinco grandes temas, organizados em seções. A primeira delas, introdutória, expõe teorias e conceitos

fundamentais para a representação computacional do espaço urbano, revelando os requisitos básicos para a apreensão da complexidade inerente à esfera urbana em meio digital. A segunda seção aborda as dimensões humanas em estudos urbanos, tratando de tópicos relativos à mensuração das desigualdades socioterritoriais, como a exclusão/inclusão social e a segregação socioespacial de áreas residenciais. A seção seguinte trata da aplicação de geotecnologias e do uso de dados de sensores orbitais e aerotransportados aos mais diversos temas, como desenvolvimento de políticas públicas, mapeamento e cadastro urbano. Na quarta seção, apresentam-se estudos do uso da Geoinformação para a gestão de desastres naturais em centros urbanos em face da perspectiva contemporânea de mudanças ambientais globais. E, por fim, a quinta e última seção dedica-se a explorar um âmbito recente da Geoinformação – a modelagem dinâmica espacial – lidando com exemplos de simulações de uso do solo em escala intra-urbana, urbana e regional.

A importância em se dirigir especial atenção e se conduzir investigações aprofundadas sobre áreas urbanas, isoladamente ou em contexto regional, pode ser explicada pelo fato de que essas áreas não apenas irão abrigar a maior parte da população do planeta, conforme já exposto, como também pelo fato de que as mesmas detêm o controle da economia mundial na presente era da globalização, gerenciando os fluxos de capital financeiro, recursos naturais e industrializados, capital humano, informação, conhecimento tecnológico e científico e poder de decisão. De uma sábia e prudente administração de seus aparatos financeiros e institucionais, bem como de uma hábil gestão de sua estrutura física e ambiental, dependerá o sucesso da maior parte dos empreendimentos humanos.

Os editores

Referências Bibliográficas

Fernandes, C. L. L.; Medeiros, C. M.; Mendes, A. G. O elemento regional no processo de planejamento do Brasil - Notas preliminares. In: Cintra, A. O.; Haddad, P. R. ed. **Dilemas do planejamento urbano e regional no Brasil**. Rio de Janeiro: Zahar Editores, 1977. Cap. II, p. 51-168.

Hardoy, J. E.; Mitlin, D.; Satterthwaite, D. **Environmental problems in an urbanizing world: finding solutions for cities in Africa, Asia and Latin America**. London: Earthscan Publications Ltd, 2001. 446 p.

Openshaw, S. GeoComputation. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 1, p. 1-31.

United Nations. **World urbanization prospects: the 1998 revision database**. New York: United Nations Population Division, 1998. 640 p.

Preface

Michael Batty[†]

Almost as soon as digital computers were invented over fifty years ago, applications were made to social and economic problems which could be easily quantified. Operations research and systems simulation using computers were rapidly developed in the 1950s as part of the quest for scientific management in industry and government, while the use of computers for the routine storage and processing of large databases, particularly those dealing with financial transactions, dominated business applications. By the early 1960s, computer models were being fashioned for simulating transport systems and the location of land uses in cities, for rudimentary spatial forecasting, and for all kinds of population and economic prediction. Such applications set the tone for what followed as computers became ever faster and smaller, as they began to converge with communications systems, and as interacting with them became easier through the development of graphical user interfaces.

Today, the dominant uses of computers in urban planning are organised around these early developments, focusing primarily on the development of databases, spatial analysis, simulation modelling, forecasting and design, set within the wider context of the plan-making process. In fact, the outcomes of analysis and design are being increasingly communicated to users of all kinds using the very computer systems used to engage in analysis and design in the first place. In the last 20 years, the focus on representing cities and regions through their data has almost entirely moved to the digital realm with geographic information systems (GIS) becoming the focus around which such data is collected, stored, analysed, displayed and disseminated. Although GIS now forms a bedrock for such applications, the collection of data is increasingly being aided by remote devices, by sensing of all kinds which engage a variety of new technologies involving various kinds of geopositioning (GPS) being accomplished at a variety of spatial scales. Physical data across different scales acquired in this way is being complemented by new forms of population and related social and economic censuses which are being produced from a variety of online data as well as using traditional face-to-face and personal questionnaire surveys. Much of this data is going online while GIS is increasingly the only way in which users are able to unlock such data. At the same time, GIS itself is becoming more open with various kinds of storage and mapping systems being developed as open source infrastructure.

GIS and GPS are now the foundations on which built and natural environments complemented by social and economic structures are measured and represented within contemporary urban planning. Geography and geometry are both central to such forms of

[†] Michael Batty, Bartlett Professor of Planning, and Director, Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, 1-19 Torrington Place, London WC1E 6BT, UK
email: m.batty@ucl.ac.uk; web: <http://www.casa.ucl.ac.uk/>

representation, and there is a veritable cornucopia of new tools now available for representing, analysing and forecasting the future of urban and regional systems such as cities, rural areas, natural and built landscapes, spatial economic structures, and so on. But such systems of representation are only the beginning for on these now rest our techniques and tools for engaging in analysis of the problems that urban and regional planning seeks to address, and the plans and policies that represent the outcomes of such planning. This range of tools is often collectively referred to as ‘decision support’ with spatial decision support systems (SDSS), sometimes called planning support systems (PSS), being formally developed alongside the planning process. GIS forms the bedrock for the data contained therein represents the essential minimum for effective plan-making, even if such plan-making does not engage in any of the more sophisticated models and methods which are finding their way into planning practice.

Whilst GIS and GPS have been making enormous strides in enabling us to represent and display spatial data so effectively, spatial analysis and spatial simulation have not remained still. For the first time, we now have a statistical theory of spatial structure and dynamics that is internally consistent with mainstream scientific analysis and which is now built on these new forms of representation in GIS that focus on exploratory data analysis, consistent spatial estimation and calibration, and on relevant spatial forecasting, prediction and control. Age-old problems of spatial autocorrelation are being addressed in new ways as much due to the new power of massive simulation as to advances in mathematical theory. In terms of simulation modelling, there has been a sea change from aggregative static simulations of cross sections of urban and regional structures to more micro, disaggregate dynamic models which focus on defining the behaviour of multiple agents and objects in the system of interest. In terms of urban development, notions about representing cities as cells and urban transitions as rules have come onto the agenda and such cellular automata models relate well to GIS on the one hand (and especially the data held as raster layers within GIS) and new methods of statistical calibration on the other. Moreover the range of simulation has broadened from models based entirely on theory to those that deal with ‘stylized facts’ through to traditional models that meet the canons of scientific parsimony in terms of their match against publicly acceptable real data sets.

Planning support systems set all of this within a context of developing better and best plans although the idea of narrow optimisation no longer holds sway in that planning is now much more firmly embedded within its political context everywhere. Alternatives setting through scenario building is still a feature of such processes but there is a much deeper sense of engaging a wider public in seeking a consensus as to the urban future. In this, computers and GIS as well as our ability to communicate data analysis and plans across networks have become central. Indeed just as our confidence in being able to predict the future is now more qualified than it ever was, our ability to explore such futures has never been better through our new found abilities to disseminate and engage through online public participation. The addition of multimedia to PSS and to GIS as well as the ability to sample and vote for proposals online as well as to engage in community design from the bottom up in virtual design studios is opening up an entirely new dimension to the use of GIS, geomatics and spatial modelling in urban and regional planning. PP-GIS (public participation in GIS) is one of the key developments within PSS and such developments are being dramatically aided by new software for mapping and display such as *Google Maps* and

Google Earth which are essentially providing a spatial infrastructure and functionality that even the most inexpert user of GIS can relate to and fashion for their own use.

Many of these exciting developments in the use of geomatics in urban planning are examined in this book. New forms of remote sensing, cellular modelling, and new structures providing new tools for GIS and the use of these tools in public planning feature here. What is particularly important however is that the context of urban planning in Latin America in general and Brazil in particular determines how these new tools are being used. Cities and regions are very different here from those in North America, Europe and the Far East, for example. In some sense, Latin American cities are turned inside out in comparison with other western counterparts with problems of informal housing – favelas – and regional differences quite different from other parts of the world. Moreover the development of planning systems, the focus on sustainability and the need for *in situ* tools useful to local municipalities are key to applications of GIS, PSS, and geomatics in this context. The articles collected here are of considerable importance to the better practice of planning in Brazil as well as providing others around the world with a knowledge of how new techniques and tools can be fashioned for the local context. In fact these contributions are of wider import because there are many new methods here which are adding to our global arsenal of new tools for GIS and PSS which depend intimately on adapting the general principles of representation and simulation to specific contexts and applications.

Michael Batty
University College London
November 2005

Apresentação

Michael Batty[†]

Assim que os computadores digitais entraram em cena, há mais de cinquenta anos, a sua utilização se voltou para problemas sociais e econômicos que podiam ser facilmente quantificados. Pesquisas operacionais e simulação de sistemas utilizando computadores passaram a se desenvolver com rapidez nos anos de 1950 como parte de uma demanda por gestão científica na indústria e governo, ao passo que o uso de computadores para o armazenamento e processamento rotineiro de grandes bancos de dados, em especial aqueles vinculados a transações financeiras, dominava as aplicações no mundo dos negócios. No começo da década de 1960, surgiram os modelos computacionais destinados à simulação de sistemas de transportes e de alocação de usos do solo em cidades, além daqueles voltados a prognósticos espaciais rudimentares e aos mais variados tipos de previsão demográfica e econômica. Essas aplicações definiram a tônica das gerações seguintes, quando os computadores tornaram-se cada vez mais rápidos e menores, passaram a convergir para sistemas de telecomunicações e a apresentar interfaces gráficas.

Atualmente, os usos prevaletentes de computadores no Planejamento Urbano organizam-se em torno desses antigos temas, focando basicamente o desenvolvimento de bancos de dados, análise espacial, modelagem de simulações, prognóstico e projeto, definidos dentro do contexto mais amplo do processo de planejamento. Com efeito, produtos digitais e sistemas para análise e projeto são cada vez mais apresentados a novos usuários das mais diversas categorias. Nos últimos vinte anos, o foco da representação de cidades e regiões moveu-se quase que inteiramente para o âmbito digital através dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), nos quais os dados podem ser inseridos, armazenados, analisados, visualizados e disseminados. Embora os SIG constituam a base para tais aplicações, a coleta de dados passa a ser crescentemente auxiliada por dispositivos remotos, por sensoriamento de alvos que compreendem uma vasta gama de novas tecnologias, que por sua vez envolvem o uso de aparelhos de geoposicionamento (GPS) nas mais diferentes escalas. Os dados físicos adquiridos nessas escalas variadas são complementados por dados demográficos e socioeconômicos de censos, que podem ser tanto produzidos por recursos *online* ou através dos tradicionais questionários realizados em domicílio. Muitos desses dados tornam-se disponíveis online, enquanto que os SIG apresentam-se como a única possibilidade para explorá-los. Simultaneamente, os SIG propriamente ditos tornam-se também mais acessíveis, ao disponibilizarem sistemas para armazenamento, mapeamento e análise de dados de código aberto.

[†] Michael Batty, Bartlett Professor of Planning, and Director, Centre for Advanced Spatial Analysis (CASA), University College London, 1-19 Torrington Place, London WC1E 6BT, UK
email: m.batty@ucl.ac.uk; web: <http://www.casa.ucl.ac.uk/>

SIG e GPS constituem nos dias de hoje as fundações nas quais os ambientes naturais e antrópicos, complementados por atributos sociais e econômicos, são medidos e representados na esfera do Planejamento Urbano contemporâneo. Geografia e Geometria são temas centrais a essas novas formas de representação, e há uma profusão de novas ferramentas para a representação, análise e previsão do futuro de sistemas urbanos e regionais, como cidades, áreas rurais, paisagens naturais e antropizadas, estruturas espaciais econômicas, entre outras. Mas esses sistemas de representação integram apenas o começo de um amplo conjunto de técnicas e ferramentas para a análise de problemas que o Planejamento Urbano e Regional procura enfrentar. Esse conjunto de ferramentas é freqüentemente denominado como “suporte à decisão”, e assim, Sistemas Espaciais de Suporte à Decisão (SESD), algumas vezes chamados de Sistemas de Suporte ao Planejamento (SSP), desenvolvem-se paralelamente ao processo de planejamento. Os SIG representam o arcabouço para esses dados e uma plataforma essencial mínima para um processo de planejamento efetivo, ainda que este processo não se vincule a nenhum dos modelos e métodos sofisticados que encontram cada vez mais espaço nas práticas atuais de planejamento.

Enquanto os SIG e GPS permitiram enormes avanços na representação e visualização de dados espaciais, métodos de análise e simulação espacial ainda não se consolidaram de maneira efetiva em meio à comunidade de planejadores. Pela primeira vez, dispomos de uma teoria estatística da estrutura e dinâmica espacial que é internamente consistente com as principais correntes de análise científica e que é construída a partir das novas formas de representação em SIG, com foco em análises exploratórias de dados, parametrização e calibração espacial e em prognósticos e controle. Velhos problemas de auto-correlação espacial estão sendo enfrentados de novas formas, principalmente devido ao potencial de simulações robustas assim como a avanços em teoria matemática. Em termos de modelagem dinâmica, houve uma sensível mudança de simulações agregadas de estruturas urbanas e regionais estáticas em direção a modelos dinâmicos desagregados, também chamados de micro-modelos, que se voltam para a definição comportamental de múltiplos agentes e objetos no sistema de interesse. Em relação ao desenvolvimento urbano, a idéia de se representar as cidades como células e as transições urbanas como regras tornou-se um dos pontos principais de sua nova agenda científica. Modelos de autômatos celulares conquistam cada vez mais novos usuários, particularmente em vista do fato de se articularem bem com dados matriciais (*raster*), comumente usados em SIG. Além do mais, esses modelos diversificam seu escopo, oferecendo desde aplicativos para simulações teórico-abstratas até aqueles que respeitam os princípios da parcimônia científica ao permitirem o confronto de resultados de simulações empíricas com os respectivos dados reais.

Sistemas de Suporte ao Planejamento incluem todo esse repertório dentro de um contexto de desenvolvimento de soluções ótimas, embora a idéia de otimização *strictu sensu* não seja mais dominante no âmbito do planejamento, uma vez que este se encontra firmemente ancorado sobre o contexto político local. Alternativas relacionadas à construção de cenários ainda vigoram nos processos de planejamento, embora com um objetivo mais profundo de engajar um público-alvo maior na busca de um consenso em relação ao que se espera do futuro em nível urbano. Neste sentido, computadores e SIG além da nossa habilidade em comunicar planos e análises de dados através de diferentes redes e instâncias socioprofissionais tornaram-se cruciais. De fato, assim como a nossa capacidade para prever

o futuro está mais qualificada do que nunca, nossa habilidade para explorar tais futuros nunca esteve melhor em vista das recém-descobertas possibilidades de engajamento e disseminação através da participação pública *online*. A introdução de dispositivos *multimedia* em SSP e SIG aliada à nossa habilidade de testar e votar em propostas *online*, bem como nos engajar em planejamento comunitário *bottom-up* (isto é, que parte da comunidade em direção aos planejadores e técnicos) por meio de estúdios de projeto virtuais está abrindo uma dimensão inteiramente nova no uso de SIG, geoinformação e modelagem espacial em Planejamento Urbano e Regional. Participação Pública em SIG (PP-SIG) constitui um dos desenvolvimentos-chave em SSP, e tais desenvolvimentos estão sendo consideravelmente auxiliados por novos programas para mapeamento e visualização, como **Google Maps** e **Google Earth**, os quais estão reconhecidamente fornecendo uma funcionalidade e infraestrutura espacial que até o mais leigo usuário de SIG pode utilizar e personalizar para uso próprio.

Muitos desses novos desenvolvimentos no uso da Geoinformação em Planejamento Urbano são apresentados neste livro. Novas formas de sensoriamento remoto, modelagem celular e novas estruturas para o fornecimento de ferramentas inovadoras de análise em SIG serão expostas nos próximos capítulos. O que é de particular importância, no entanto, é como o contexto do Planejamento Urbano na América Latina em geral, e em especial no Brasil, determina o modo como essas novas ferramentas serão usadas. As nossas cidades e regiões apresentam um padrão espacial muito distinto daquele encontrado na América do Norte, Europa e Oriente, por exemplo. De alguma forma, os temas tratados neste livro abordarão questões peculiares à nossa realidade, como problemas de habitações informais e disparidades regionais não vivenciados em outras partes do mundo. Ademais, o desenvolvimento de sistemas de planejamento, o foco na sustentabilidade e a necessidade de ferramentas *in situ* úteis aos governos locais representam aplicações cruciais de SIG, SSP e Geoinformação neste contexto. Os trabalhos reunidos nesta obra são de considerável importância para uma melhor prática do planejamento no Brasil assim como para fornecer a leitores de outros países um conhecimento sobre como novas técnicas e ferramentas podem ser ajustadas ao nosso contexto local. Na realidade, essas contribuições atingem uma importância ainda maior, na medida em que representam novos métodos a serem adicionados ao arsenal global de novos ferramentais para SIG e SSP, os quais dependem em última instância da adaptação de princípios gerais de representação e simulação a contextos e aplicações específicas.

Michael Batty
University College London

Tradução
Cláudia Maria de Almeida

1 Territórios digitais urbanos

Frederico Roman Ramos, Gilberto Camara, Antonio Miguel Vieira Monteiro

1.1 Introdução

A percepção dos brasileiros sobre seu território é, desde sempre, marcada por um misto de deslumbramento e distanciamento. A visão edênica dos colonizadores portugueses persiste até hoje como um mito fundador da nacionalidade brasileira, como nos mostra Sérgio Buarque em “Visões do Paraíso” (Holanda, 1969). No infamoso e influente livro “Porque me Ufano de Meu País”, o conde Afonso Celso proclama numa visão mítica de um Brasil “*superior a todos os outros países*”, cuja natureza é um “*dom da providência*”. Nisto somos bem diferentes dos americanos, que entendem seu território como parte integral da nacionalidade e declamam o poema de Robert Frost: “*the land was ours before we were the land’s*”. Na medida em que o território de Brasil pertence a Deus e não aos brasileiros, ele é concebido como elemento externo à nossa sociedade, o que impede que seja apropriado como propriedade dos brasileiros (Chauí, 2000). Não é por acaso que Elis Regina cantava “*O Brasil não conhece o Brasil*”.

Como conhecer o Brasil sem conhecer os territórios brasileiros? Temos hoje uma percepção comum de que a redução de nossas desigualdades sociais e econômicas, em todas as suas formas de manifestação, devem ser prioridades de ação governamental. No entanto, a grande maioria dos problemas de gestão pública no Brasil depende da distribuição espacial do fenômeno subjacente. Para

combater a exclusão social, precisamos saber onde estão os excluídos e quem são eles. A redução da criminalidade depende de conhecermos quais seus padrões de ocorrência. O combate ao desmatamento de florestas urbanas, como a da Tijuca no Rio de Janeiro, requer que identifiquemos quais são os fatores que influenciam o processo e quais os tipos de ocupação. Conhecer nossos territórios é assim condição essencial para gerarmos políticas públicas consistentes em temas como exclusão social, atendimento da saúde, melhoria da segurança pública, e combate à devastação ambiental.

Esta situação é agravada pelo fato que nas décadas de 80 e 90 o Brasil enfrentou uma enorme crise em seu setor público, com redução de orçamentos e de pessoal, com reflexos imediatos em sua capacidade de gestão do território. A privatização dos serviços públicos deixou várias cidades brasileiras sem elementos fundamentais para gerir seus espaços urbanos, de vez que muitas bases de dados eram de propriedade das antigas estatais. Nos anos 90, quem investiu em levantamento de dados foram empresas privadas, com destaque para o setor de telecomunicações, e como resultado, em muitos locais o setor privado possui melhores dados que as correspondentes instituições públicas.

Chamamos de “*territórios digitais*” as diferentes representações da realidade geográfica num ambiente computacional. A noção de “territórios digitais” pretende ser mais abrangente que o simples conceito de criação de mapas por meio de sistemas de informação. A idéia chave é o conceito de *representação computacional*, que implica no uso de modelos lógicos, estruturas de dados, algoritmos e linguagens para buscar capturar as diferentes dimensões do espaço geográfico. Os “territórios digitais” podem mostrar mais que endereços e quadras. Eles podem revelar as diferentes expressões de fenômenos como exclusão social, criminalidade, risco ambiental e exposição a doenças contagiosas.

1.2 Os Novos Territórios Digitais Urbanos

O processo de concentração da população em grandes áreas urbanas brasileiras nas décadas de 80 e 90 gerou uma situação sem

precedentes. Hoje, 80% da população brasileira vivem em áreas urbanas, segundo a definição do IBGE; 40% estão em aglomerações urbanas com mais de 1 milhão de habitantes e 30% da população está nas 9 maiores regiões metropolitanas. Em termos de políticas públicas, o grande resultado deste processo de urbanização foi criar enormes diferenciais no interior das maiores cidades brasileiras. Para citar um exemplo, entre 1991 e 1996 a cidade de São Paulo teve um crescimento populacional limitado (de 9.646.185 habitantes para 9.839.066 habitantes ou 2%), enquanto as regiões mais pobres da cidade tiveram crescimento demográfico de até 130%. Estas explosões urbanas altamente desiguais em sua expressão espacial geraram grandes regiões de “terra incógnita” no interior das cidades brasileiras e produziram espaços intra-urbanos altamente diferenciados.

Diante dos novos processos sociais em nossas cidades, as ações e propostas de intervenção e planejamentos precisam orientar-se cada vez mais a partir das relações entre as partes e o todo urbano. A construção dos territórios digitais urbanos é imprescindível para formular políticas públicas cuja distribuição de serviços e benefícios seja consistente com a população-alvo. Para construí-los, precisamos de métodos capazes de *revelar* os territórios invisíveis do espaço das cidades e descobrir não apenas onde, mas o que define e estrutura cada lugar.

Considere-se o conceito de *exclusão social*. Na literatura sociológica, o conceito de exclusão social tem uma enorme quantidade de definições. Excluídos podem ser aqueles que não tem acesso aos direitos da cidadania, ou aqueles que vivem em regiões periféricas, fora do alcance da rede de proteção social. Em algumas definições, pode-se ter emprego e ainda assim ser excluído socialmente. A vastidão da literatura cria um problema sério: a falta de uma forma de avaliar objetivamente esse conceito. Para enfrentar este dilema, a equipe da PUC-SP liderada pela profa. Aldaíza Sposati resolveu construir uma representação da exclusão social em São Paulo a partir de uma análise quantitativa de dados socio-territoriais coletados pela Secretaria de Saúde, IBGE, Secretaria de Segurança Pública e outras instituições públicas. De forma consistente com a idéia de *conhecimento como construção*, em lugar de responder diretamente à

pergunta: “A exclusão social existe?”, a equipe colocou a questão nos termos: “É possível evidenciar a existência da exclusão social como fenômeno no espaço geográfico?” Este trabalho foi iniciado em 1996 e a partir de 2000 contou com o apoio do INPE. Os resultados estão materializados nos Mapas de Exclusão/Inclusão Social de São Paulo para os dados dos censos de 1991 e 2000 (Sposati, 1996) (Sposati, 2000) (Genovez, 2002). Assim, criou-se um espaço objetivo de crítica do conceito de exclusão social. Estes estudos têm tido ampla utilização, seja com suporte a políticas públicas, seja como base para análises focadas sobre aspectos das desigualdades sociais, como escolaridade, população de rua e assistência à saúde.

Como exemplo dos resultados, a Figura 1 mostra a distribuição espacial do índice de exclusão social para os 96 distritos da cidade de São Paulo, para os dados do censo de 1991 (Sposati, 1996). O índice de exclusão/inclusão social é uma medida agregada das disparidades socioeconômicas, que varia de -1 a $+1$, onde o valor 0 (zero) indica um nível básico de inclusão social. Verifica-se que 3/4 dos distritos de São Paulo estavam abaixo dos índices mínimos de inclusão social em 1991. Uma forte polarização centro-periferia é claramente perceptível no mapa, que apresenta duas grandes regiões de exclusão social, as zonas sul e leste da cidade.

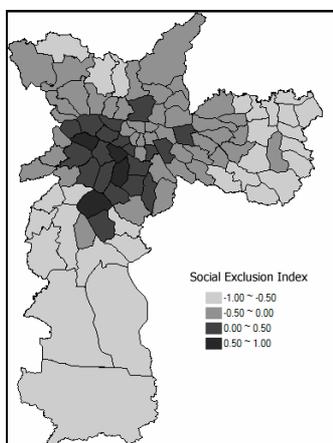


Figura 1 – Índice de Exclusão/Inclusão Social dos Bairros da Cidade de São Paulo para os dados de 1991, com 96 distritos agrupados em quatro partes.

1.3 Componentes dos Territórios Digitais Urbanos

Os tipos de dados utilizados para construir os territórios podem ser subdivididos em três grandes subcategorias: *dados do meio físico-biótico*, *dados cadastrais* e *dados socioeconômicos* (Figura 2). Os dados do meio físico-biótico descrevem os diversos componentes da natureza e da paisagem, e são oriundos de mensuração através de instrumentos. Exemplos incluem tipos de solo, geologia, vegetação e geomorfologia. Os dados cadastrais descrevem os elementos da apropriação do território pelo homem, com ênfase no espaço produzido e em limites estabelecidos em contratos legais. Exemplos incluem lotes, redes de serviço (água, luz, telefonia) e limites municipais. Os dados socioeconômicos são representativos do tipo de ocupação do território e capturam diferentes aspectos da condição de vida da população. Esses dados são obtidos através de censos, ou de coleta sistemática como no caso de criminalidade e saúde coletiva.

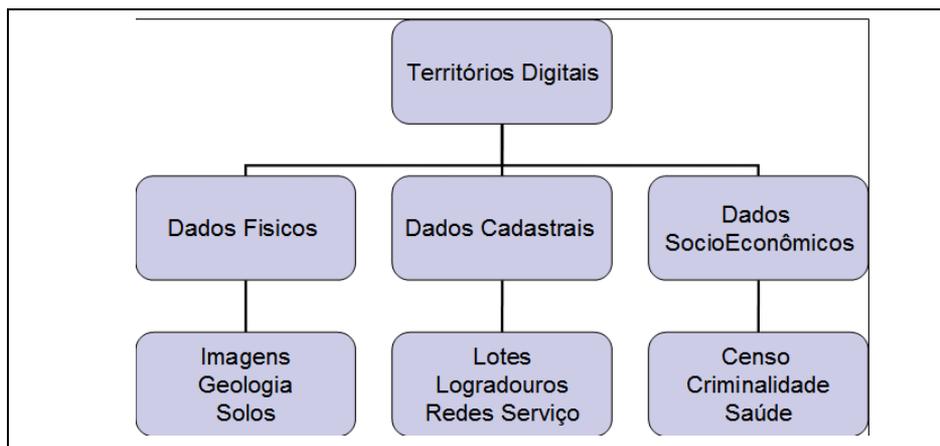


Figura 2 – Componentes dos territórios digitais urbanos e exemplificações. Para melhor entender os conceitos dos territórios digitais urbanos, iremos abordar o problema em quatro partes:

- Discutir os diferentes conceitos gerais usados para representar os territórios digitais (o que chamamos de ontologias urbanas).

- Apresentar o problema da teoria da medida aplicada a territórios digitais urbanos.
- Mostrar quais são as representações computacionais disponíveis para uso com dados urbanos.
- Indicar como pode ser feita a tradução dos conceitos das ontologias urbanas para as representações computacionais.

1.4 Ontologias Urbanas

Ontologia é o campo da filosofia cujo objetivo é descrever os tipos e estruturas de entidades, eventos, processos e relações que existem no mundo real (Smith, 2003). Sua gênese remonta a Aristóteles, mas o interesse recente por ontologias em sistemas de informação decorre principalmente da necessidade de compartilhar informação de forma eficiente para um público cada vez mais interdisciplinar.

Um sistema de informação pode ser concebido como um mecanismo de comunicação entre duas partes: o produtor e o usuário. Para que funcione, é necessário que haja uma concordância entre os conceitos das partes. Numa perspectiva mais geral, seu sucesso depende da existência de uma comunidade que compartilhe as definições utilizadas para construí-lo. Por exemplo, considere o caso de um estudo sobre *segregação* em áreas urbanas. Existem diferentes conceitos de segregação na literatura sociológica (Caldeira, 2000; Massey e Denton, 1993; Torres e Marques, 2004; White, 1983). Para construir um sistema de informação que permita o estudo da segregação urbana, é preciso que o produtor de informação defina qual dos diferentes conceitos estará sendo representado, como esta representação será construída, e como o usuário pode compreender as características e limitações desta representação.

Deste modo, o problema fundamental de um sistema de informação é definir o conjunto de conceitos a ser representado. Se quisermos que estes conceitos sejam compartilhados por uma comunidade interdisciplinar, é fundamental que os conceitos utilizados sejam devidamente explicitados. Assim, surge a pergunta: “*Qual o papel dos*

conceitos na representação do mundo?” A melhor forma de responder é baseando-se na perspectiva realista (Searle, 1997):

1. A realidade existe independentemente das representações humanas.
2. Nós temos acesso ao mundo através de nossos sentidos e de nossos instrumentos de medida.
3. As palavras em nossa linguagem podem ser usadas para referir-se a objetos do mundo real.
4. Nossas afirmações são verdadeiras ou falsas dependendo de sua correspondência aos fatos do mundo.
5. Algumas afirmações em nossa linguagem dizem respeito a uma realidade externa e independente (“*há neve no topo do Monte Everest*”). Outras afirmações dizem respeito a convenções socialmente construídas (“*este papel é uma certidão de nascimento*”).

Como nos ensina Searle (1997), esta perspectiva tem conseqüências importantes sobre nossa concepção do mundo:

“Apesar de termos representações mentais e lingüísticas do mundo sob a forma de crenças, experiências, afirmações, teorias, etc., há um mundo, ‘lá fora’, totalmente independente destas representações. A órbita elíptica dos planetas relativamente ao Sol e a estrutura do átomo de hidrogênio são inteiramente independentes das representações que os seres humanos têm de tais fenômenos. Já coisas como o dinheiro, a propriedade, o casamento e os governos são criados e sustentados pelo comportamento cooperativo humano.”

“Na sua maior parte, o mundo existe independentemente da linguagem (princípio 1) e uma das funções da linguagem é representar como são as coisas no mundo (princípio 3). Um aspecto crucial no qual a realidade e a linguagem entram em contato é marcado pela noção de verdade. Em geral, as afirmações são verdadeiras na medida em que representam com precisão uma característica da realidade que existe independentemente da afirmação (princípio 4).”

O projeto de um sistema de informação requer, como passo inicial, a escolha das entidades a ser representadas e, se possível, a descrição organizada destas entidades por meio de conceitos. Esta descrição forma uma *ontologia de aplicação*, definida como “*um conjunto de conceitos compartilhados por uma comunidade*” (Gruber, 1995). Para os dados geográficos, uma geo-ontologia tem dois tipos básicos de conceitos: (a) conceitos que correspondem a fenômenos físicos do mundo real; (b) conceitos que criamos para representar entidades sociais e institucionais (Smith e Mark, 1998) (Fonseca et al., 2003). Chamamos o primeiro tipo de *conceitos físicos* e o segundo de *conceitos sociais* (Tabela 1). Embora todos os conceitos resultem do uso compartilhado da linguagem, há uma diferença entre conceitos que se referem ao mundo físico (“*A Amazônia possui uma floresta tropical*”) e aqueles que resultam de convenções humanas (“*Esta é uma reserva indígena*”).

Nossa geo-ontologia diferencia entre conceitos associados a entidades que pode ser individualizadas e identificadas nominalmente (caso de *lagoas* e *lotes*) e aquelas que variam de forma contínua no espaço (caso de *poluição*).

Tabela 1 – Tipos de conceitos associados a entidades geográficas.

	Realidade física	Realidade social
<i>Entidades individualizáveis</i>	<i>indivíduos bona fide</i> (e.g., lagoa)	<i>indivíduos fiat</i> (e.g., lote)
<i>Entidades com variação contínua</i>	<i>topografias físicas</i> (e.g., poluição)	<i>topografias sociais</i> (e.g., segregação)

Os conceitos físicos podem ser subdivididos em:

- Conceitos associados a entidades individualizáveis, que possuem uma fronteira bem definida a partir de diferenciações qualitativas

ou discontinuidades na natureza. Designados como *indivíduos bona fide* (do latim “boa fé”), sua existência decorre de nossa necessidade de dar nomes aos elementos do mundo natural. Por exemplo, embora a superfície da Terra apresente uma variação contínua no espaço, nossa percepção do espaço depende da associação de nomes especiais a variações bem definidas no terreno. Daí nascem conceitos como *montanha, lagoa e praia*.

- Conceitos associados a entidades que tem variação contínua no espaço, associadas aos fenômenos do mundo natural, não estando a princípio limitadas por fronteiras. Chamamos estes conceitos de topografias físicas, onde o termo “topografia” está associado a qualquer grandeza que varia continuamente. Exemplos incluem *temperatura, altimetria, declividade e poluição*.

Os conceitos sociais podem ser subdivididos em:

- Conceitos que descrevem entidades individuais criadas por leis e por ações humanas. Estas entidades possuem uma fronteira que as distingue do seu entorno e tem uma identidade única. Sua existência depende usualmente de um registro legal. Designadas como *indivíduos fiat* (do latim “fazer”), incluem conceitos como *lotes, municípios e países*.
- Conceitos descrevendo entidades que têm variação contínua no espaço, associadas a convenções sociais. Tome-se o caso de *pobreza*, conceito socialmente definido que ocorre no espaço de forma ininterrupta (“*em cada lugar há algum tipo diferente de pobreza*”). Chamamos estes conceitos de topografias sociais. Exemplos incluem: *exclusão social, segregação urbana, desenvolvimento humano*.

Em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), as ontologias estabelecem correspondências entre diferentes domínios de entidades espaciais e relações. Segundo Fonseca et al. (2000), no caso de SIG para aplicações urbanas, as ontologias devem incluir: *objetos ou entidades* (p. ex. zonas político-administrativas, ruas, quadras, lotes, equipamentos); *relações* (p. ex. uma escola gerencia um distrito educacional; um lote pertence àquela quadra); *eventos* (p. ex. acidentes

de trânsito, manutenção de infra-estruturas); e *processos* (p. ex. poluição sonora, fluxo de tráfego).

1.5 Atributos de dados geográficos: teoria da medida

Para representar dados geográficos no computador, temos de descrever sua variação no espaço e no tempo. Em outras palavras, precisamos responder a perguntas como: “*qual é o valor deste dado aqui e agora?*”. Isto requer uma compreensão dos processos de mensuração da realidade, de forma consistente com os dois primeiros princípios de Searle (1997): “*a realidade existe independentemente das representações humanas*” e “*nós temos acesso ao mundo através de nossos sentidos e de nossos instrumentos de medida*”. O processo de medida consiste em associar números ou símbolos a diferentes ocorrências de um mesmo atributo, para que a relação dos números ou símbolos reflita as relações entre as ocorrências mensuradas. Por exemplo, podemos medir a poluição numa cidade através de sensores localizados em diferentes locais. Cada um destes sensores nos dará uma medida diferente. Esta atribuição é denominada *escala de medida*. A referência geral mais importante sobre escalas de medidas é o trabalho de Stevens (1946), que propõe quatro escalas de mensuração: *nominal, ordinal, intervalo e razão*.

Os níveis nominal e ordinal são *temáticos*, pois a cada medida é atribuído um número ou nome associando a observação a um tema ou classe (Figura 3). A *escala nominal* classifica objetos em classes distintas sem ordem inerente, como rótulos que podem ser quaisquer símbolos. As possíveis relações entre os valores são identidade ($a = b$) e dessemelhança ($a \neq b$). Um exemplo é a cobertura do solo, com rótulos como “*floresta*”, “*área urbana*” e “*área agrícola*”.

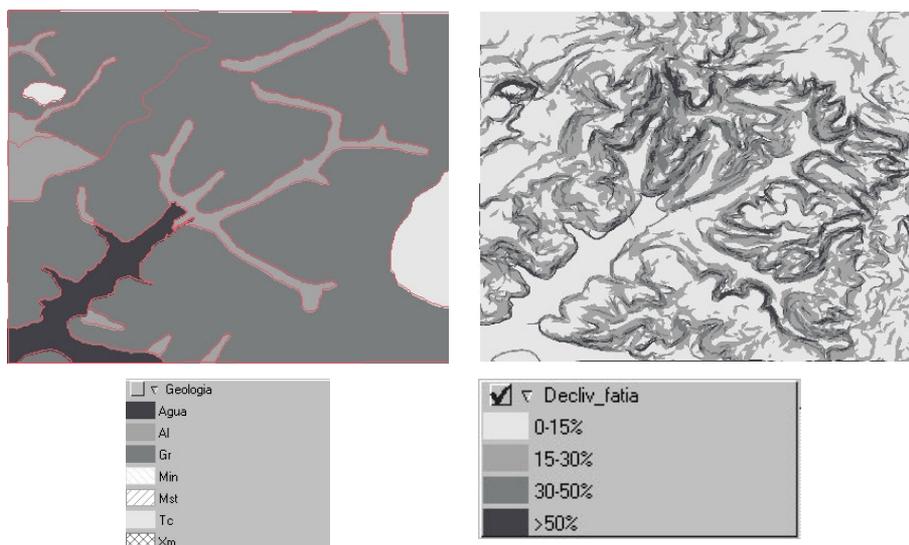


Figura 3 - Exemplos de medida nominal (mapa geológico) e medida ordinal (mapa de classes de declividade).

A *escala ordinal* introduz a idéia de ordenação, caracterizando os objetos em classes distintas que possuem uma ordem natural (por exemplo 1 – ruim, 2 – bom, 3 – ótimo ou “0-10%”, “11-20%”, “mais que 20%”). A distância definida entre os elementos não é significativa. Nesta escala são evidenciadas as relações “<” ou “>”, isto implica que para todo a e b , as relações $a < b$, $a > b$ ou $a = b$ são possíveis. Um exemplo é a aptidão agrícola de solos, com rótulos como “muito apto”, “apto”, “pouco apto”, e “inapto”.

As medidas temáticas não estão associadas à magnitude do fenômeno. Quando o estudo necessita de uma descrição mais detalhada, que permita comparar intervalo e ordem de grandeza entre eventos, recorre-se aos níveis de medidas denominados de *numéricos*, onde as regras de atribuição de valores baseiam-se em uma escala de números reais. Existem dois níveis de medidas baseados em escalas de números reais: *escala por intervalo* e *escala por razão*. A *escala por intervalo* possui um ponto zero arbitrário, uma distância proporcional entre os intervalos e uma faixa de medidas entre $[-\infty, \infty]$. A temperatura em graus Celsius é exemplo de medida por intervalo,

onde o ponto zero corresponde a uma convenção (a fusão do gelo em água). Por ter uma referência zero arbitrária, valores medidos no nível por intervalo não podem ser usados para estimar proporções. Operações aritméticas elementares (adição e subtração) são válidas, porém multiplicação e divisão não são apropriadas. Por exemplo, dados a e b , pode-se ter $a = b + c$, onde c é a diferença entre a e b em alguma unidade padrão. Assim, a temperatura em São Paulo pode ser c graus mais alta do que a temperatura em Campos de Jordão.

A *escala de razão* permite um tratamento mais analítico da informação, pois nela o ponto de referência zero não é arbitrário, mas determinado por alguma condição natural. Sua faixa de valores é limitada entre $[0, \infty]$. Nesta escala existe um ponto zero absoluto que não pode ser alterado e um intervalo arbitrário com distâncias proporcionais entre os intervalos. Números negativos não são permitidos, pois o número zero representa ausência total daquilo que está sendo medido. Por exemplo, na descrição de atributos como peso e volume de objetos não há valores negativos. No caso de temperatura em graus Kelvin, a condição natural é o ponto de repouso dos átomos da matéria, a partir do qual não se consegue temperaturas menores. Este ponto é o zero absoluto para temperatura, zero grau Kelvin. O fato de ponto de referência zero ser absoluto permite afirmações tais como a é duas vezes mais pesado que b . Desta forma, dado a e b pode-se ter $a = c \times b$, onde c indica o número de vezes que b vai até a , a relação de a para b . Operações matemáticas de adição, subtração, multiplicação e divisão são suportadas nesta escala.

A Tabela 2 apresenta um resumo das escalas de medidas, destaca a característica principal, apresenta algumas operações admitidas e exemplos para cada uma delas.

Tabela 2 – Tipos de medidas de dados geográficos.

Escala	Características	Exemplos	Operações possíveis
<i>Nominal</i>	Descrição	Tipo de solo, vegetação, uso do solo	Seleção, Comparação
<i>Ordinal</i>	Ordem	Classes de declividade, aptidão de uso	Mediana, Máximo, Mínimo
<i>Intervalo</i>	Distância	Altimetria	Diferença, Soma
<i>Razão</i>	Valores absolutos	Renda, população, taxa de natalidade	Operações aritméticas

1.6 Espaço absoluto e espaço relativo

Antes de considerar os diferentes modelos formais para dados geográficos, é necessário analisarmos brevemente os conceitos de *espaço absoluto* e *espaço relativo*. Esta distinção decorre da possibilidade de representarmos no computador a localização dos objetos no espaço ou apenas o posicionamento relativo entre eles, como ilustrado na Figura 4. Nesta figura, mostramos à esquerda os distritos da cidade de São Paulo, identificados por suas fronteiras. Neste caso, trata-se de uma representação no espaço absoluto, na qual as coordenadas das fronteiras devem corresponder às estabelecidas na legislação. Do lado direito, mostramos um grafo com as conexões dos distritos, que formam uma rede (repetimos a imagem dos distritos por razões de melhor legibilidade da figura). No modelo de redes, a localização exata de cada distrito não é armazenada, pois a rede só captura as relações de adjacência. Dizemos então que a rede de conexões dos distritos é um modelo de *espaço relativo*.

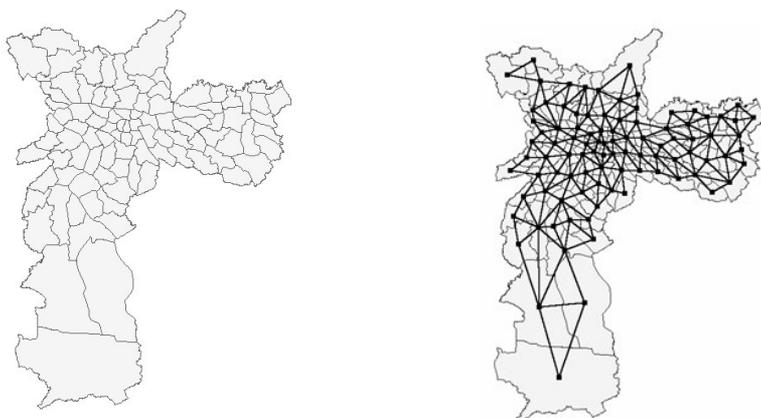


Figura 4 – Dualidade entre espaço absoluto e espaço relativo. À esquerda, distritos de São Paulo com suas fronteiras. À direita, grafo mostrando a rede de conectividade entre os distritos (espaço relativo). O mapa da esquerda foi repetido por razões de melhor legibilidade.

A distinção entre espaço absoluto e espaço relativo é de grande importância para a Geografia. Milton Santos (Santos, 1985) refere-se ao “espaço dos fixos” e ao “espaço dos fluxos”. Castells (1999) fala em “espaço de lugares” e “espaços de fluxos”. Vejam o que Helen Couclelis comenta a respeito do tema:

“Espaço absoluto, também chamado cartesiano, é um container de coisas e eventos, uma estrutura para localizar pontos, trajetórias e objetos. Espaço relativo, ou leibnitziano, é o espaço constituído pelas relações espaciais entre coisas” (Couclelis, 1997).

Uma das escolhas básicas que fazemos na modelagem dos fenômenos geográficos é definir se utilizaremos representações no espaço absoluto ou no espaço relativo. Esta escolha depende primordialmente do tipo de análise que queremos realizar. Usualmente, consultas espaciais que envolvem dois tipos de entidades (“*quais os rios que cruzam esta estação ecológica?*”) requerem a representação no espaço absoluto. O mesmo vale para questões de álgebra de mapas (“*áreas inaptas têm declividade maior que 15% ou solos arenosos?*”). Quando os procedimentos de análise envolvem

apenas as relações de conectividade (“*como chegar à estação de metrô Clínicas, partindo da estação Liberdade?*” ou “*qual é a média da mortalidade infantil de meus vizinhos?*”) podemos utilizar representações no espaço relativo. Quando falamos em entidades como estradas, linhas de transmissão, conexões de água e esgoto, cadeias de mercado e linhas de comunicação, o espaço relativo é na maioria das vezes plenamente adequado.

1.7 Estruturas de dados para representação de dados urbanos

As estruturas de dados utilizadas em bancos de dados geográficos podem ser divididas em duas grandes classes: *estruturas vetoriais* e *estruturas matriciais*.

1.7.1 Estruturas de dados vetoriais

As estruturas vetoriais são utilizadas para representar as coordenadas das fronteiras de cada entidade geográfica, através de três formas básicas: pontos, linhas, e áreas (ou polígonos), definidas por suas coordenadas cartesianas, como mostrado na Figura 5.

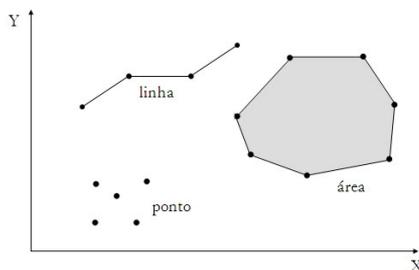


Figura 5 – Representações vetoriais em duas dimensões.

Um *ponto* é um par ordenado (x, y) de coordenadas espaciais. O ponto pode ser utilizado para identificar localizações ou ocorrências no espaço. São exemplos: localização de crimes, ocorrências de doenças, e localização de espécies vegetais. Uma *linha* é um conjunto de pontos conectados. A linha é utilizada para guardar feições unidimensionais. De uma forma geral, as linhas estão associadas a uma topologia arco-nó, descrita a seguir. Uma *área* (ou *polígono*) é a

região do plano limitada por uma ou mais linhas poligonais conectadas de tal forma que o último ponto de uma linha seja idêntico ao primeiro da próxima. Observe-se também que a fronteira do *polígono* divide o plano em duas regiões: o interior e o exterior. Os polígonos são usados para representar unidades espaciais individuais (setores censitários, distritos, zonas de endereçamento postal, municípios). Para cada unidade, são associados dados oriundos de levantamentos como censos e estatísticas de saúde.

1.7.2 Representação matricial

As estruturas matriciais usam uma grade regular sobre a qual é expresso, célula a célula, o elemento que está sendo representado. A cada célula, atribui-se um código referente ao atributo estudado, de tal forma que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence determinada célula. Nesta representação, o espaço é representado como uma matriz $P(m, n)$ composto de m colunas e n linhas, onde cada célula possui um número de linha, um número de coluna e um valor correspondente ao atributo estudado, sendo que cada célula é individualmente acessada pelas suas coordenadas.

A representação matricial supõe que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana, onde cada célula está associada a uma porção do terreno. A resolução do sistema é dada pela relação entre o tamanho da célula no mapa ou documento e a área por ela coberta no terreno, como mostrado na Figura 6.

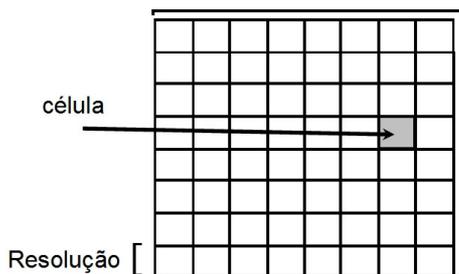


Figura 6 – Estrutura matricial.

A estrutura matricial pode ser utilizada para representar diferentes tipos de dados:

- *Grade regular*: representação matricial de dimensão “dois e meio” na qual cada elemento da matriz está associado a um valor numérico, como mostra a Figura 7 à esquerda.
- *Matriz temática*: representação matricial 2D na qual cada valor da matriz é um código correspondente à uma classe do fenômeno estudado, como mostra a Figura 7 à direita.

15	17	20	21	23
16	18	22	23	24
19	19	22	23	24
23	23	27	28	28
22	22	31	32	33

1	1	2	2	2
1	1	2	2	2
1	1	2	2	2
2	2	3	3	3
2	2	3	3	3

Figura 7 – À esquerda, grade regular com valores de temperatura em graus Celsius e, à direita, matriz temática com dados classificados (1 = “15-20 graus”, 2 = “20-25 graus”, 3 = “25-35 graus”).

1.8 Dos Conceitos às Representações Computacionais do Espaço Urbano

A aplicação das tecnologias da Geoinformação em estudos urbanos parte necessariamente da formulação de um *modelo de dados*. Nele são estabelecidas as abstrações formais que possibilitam o salto dimensional entre a realidade concreta e a sua expressão computacional. Em outras palavras, o processo de modelagem de dados é associado à construção de abstrações em diferentes níveis, partindo-se da identificação dos elementos da realidade urbana em direção a um nível puramente sintático de implementação em ambiente computacional.

Os níveis de abstração estabelecem as necessárias transições entre representações no nível *infológico* e *datalógico*. Segundo Schuurman (1999), o nível infológico está relacionado à representação semântica tradicional e o nível datalógico à representação digital. Ela diz:

“Os dados apóiam-se sobre estruturas computacionais de baixo nível (*lower-level*). Estas constroem a arquitetura básica dos computadores, os lugares onde os dados binários são arquivados. Embora muitas das idéias expressas em termos infológicos sejam complexas, a familiaridade com este método de expressão torna-o transparente. O pensamento infológico não é natural, porém, um método de articulação com o qual fomos acostumados durante nosso aprendizado. A tradução para o universo datalógico, aparentemente pesado e de difícil manuseio, tende a reforçar o senso de que o universo digital está muito mais distante dos princípios organizacionais humanos do que os analógicos.” Ela argumenta, entretanto, que “ambos são comunicações construídas com diferentes áreas de rigidez e flexibilidade. Simplesmente, os seres humanos têm muito mais experiência em manipulações de estruturas fenomenológicas do que com estruturas de dados”.

Em Camara e Monteiro (2001), a transição do nível infológico ao datalógico é relacionada a partir de quatro universos de abstração: *o ontológico, o formal, o estrutural e o de implementação* (Fig. 8). Os dois primeiros associados ao nível infológico, e os dois últimos, ao datalógico. A cada um desses níveis estão associados diferentes momentos dentro do mesmo processo de formulação de abstrações. De maneira simplificada, pode-se dizer que no nível ontológico encontram-se os aspectos relevantes da realidade em termos de entidade, relações, eventos e processos selecionados para análise, conforme exposto anteriormente no Item 1.4; o segundo nível refere-se às possibilidades de formalização conceitual desses aspectos; no terceiro nível estão associadas as possibilidades de representação geométrico-matemáticas; e por fim, no último, incluem-se as questões de implementação computacional, códigos e arquiteturas de sistemas de dados. Apesar dos diferentes níveis de abstração estarem estreitamente inter-relacionados, idealmente espera-se que o processo de análises geográficas em ambiente SIG se estabeleça sobretudo no

nível infológico, baseando-se em ontologias e formalizações, ou seja, trabalhando em níveis de abstração mais altos, tratando sobre conceitos e não sobre especificidades de sistemas computacionais e operacionais (Camara et al., 1996).

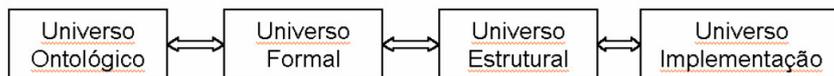


Fig. 8. Os quatro universos de abstração proposto em Camara e Monteiro (2001).

Para expressar a realidade urbana e regional em ambiente computacional é necessário, a princípio, responder à pergunta: *como os conceitos da ontologia de aplicação são representados no computador?* Colocando o problema de forma mais geral: *Que critérios deve satisfazer um conceito para que seja utilizável em estudos quantitativos associados à Geoinformação?* Tais critérios são:

- O conceito deve ser passível de ser associado a propriedades mensuráveis.
- Estas propriedades devem ser medidas no território e devem permitir diferenciar as diferentes localizações.
- Os resultados quantitativos e os modelos matemáticos utilizados devem ser validados em estudos de campo, que devem incluir dimensões objetivas e subjetivas do fenômeno em questão.

Na representação de um conceito genérico como “exclusão social”, por exemplo, precisamos definir precisamente quais atributos caracterizam a exclusão social e como podemos medi-los no território. Esta caracterização realiza a passagem do universo ontológico para o universo formal. Com base em conceitos bem estabelecidos e associados a medidas quantitativas no espaço, podemos construir *territórios digitais*.

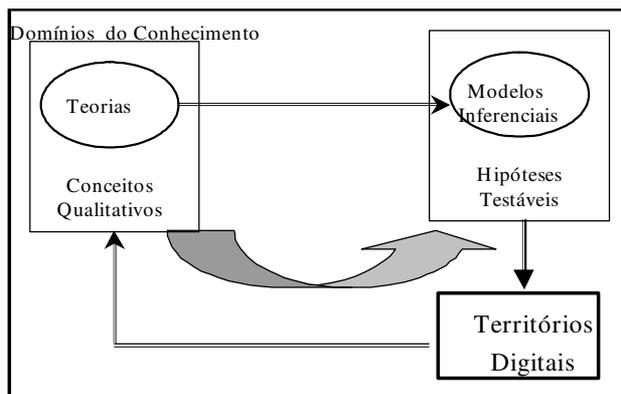


Figura 9 - Relação entre a construção dos territórios digitais e as teorias disciplinares (cortesia de Silvana Amaral Kampel).

Trata-se, assim, de uma abordagem *construtiva*, útil para o estudo de temáticas sociais. O processo pode ser resumido na Figura 9. Os especialistas de áreas de Políticas Públicas desenvolvem teorias gerais sobre os fenômenos, que incluem o estabelecimento de conceitos organizadores de sua pesquisa (como ‘exclusão’ ou ‘vulnerabilidade’). Para passar destas teorias para a construção computacional, é necessário que o especialista formule modelos inferenciais quantitativos. Estes modelos devem ser submetidos a testes de validação e de corroboração, através dos procedimentos de análise quantitativa. Os resultados numéricos podem então dar suporte ou ajudar a rejeitar conceitos sociológicos qualitativos.

Para caracterizar este processo de descoberta, usamos o termo “*conhecimento como construção*”. Trata-se de uma analogia com o processo científico das ciências experimentais, no qual as teorias devem ser submetidas a testes que permitam refutá-las (Popper, 1972). No campo das Ciências Sociais, nem sempre é fácil conduzir experimentos e submeter hipóteses a testes comprobatórios. Neste aspecto, a natureza representacional dos computadores é muito adequada aos pesquisadores de Ciências Humanas. Materializar e comparar diferentes conceitos usando sistemas computacionais nos permite avaliar o potencial de cada conceito para uso em políticas públicas. Deste modo, o processo de conceber representações

computacionais de conceitos sociológicos é um processo de aquisição de conhecimento, análogo à elaboração de experimentos nas Ciências Naturais.

Após definir como que atributos mensuráveis serão associados ao conceito, o projetista do sistema de informação deverá decidir se este conceito será modelado no *espaço absoluto* ou no *espaço relativo*. A decisão deve-se dar essencialmente em função das propriedades que queremos medir. Se a localização exata é fundamental, ou se precisamos saber o valor do fenômeno em todos os pontos da região de estudo, então é necessário usar os modelos de espaço absoluto. Se o fluxo e as conexões são essenciais, então podemos usar o modelo de rede.

Se precisamos dos dados expressos no espaço absoluto, então devemos escolher ainda qual as estruturas de dados apropriadas (matrizes ou vetores). Para isto, a decisão depende essencialmente do papel da fronteira. Se as fronteiras são parte essencial das entidades modeladas, estamos tratando com *indivíduos* e não com *topografias* (vide Tabela 3), e o modelo de geo-objetos é o mais adequado. Senão, usaremos os modelos de geo-campos.

Tabela 3 – Tipos de entidades geográficas e respectivas estruturas de dados para representação.

	Tipos	Estruturas de dados
<i>Entidades individualizáveis</i>	<i>indivíduos bona fide</i> (e.g., lagoa)	Vetores (polígonos)
	<i>indivíduos fiat</i> (e.g., lote)	Vetores (polígonos)
<i>Entidades com variação contínua</i>	<i>topografias físicas</i> (e.g., poluição)	Matrizes
	<i>topografias sociais</i> (e.g., segregação)	Matrizes

Os conceitos de campos e objetos como representações de entidades geográficas em ambiente SIG vinculam-se a distintas formalizações da

realidade geográfica. Os geo-campos estão associados a uma percepção *contínua* do fenômeno, com cada variável associada a uma camada numérica, estas sobrepostas umas às outras e subdivididas em células elementares. Já o modelo de geo-objetos está associado à construção de conjuntos de entidades *discretas*, identificáveis e individualizáveis com coleções de atributos associados. De modo formal, Camara et al. (2003) define: “um geo-campo como a representação da distribuição espacial de uma variável com valores em todos os pontos pertencentes a uma região geográfica R, em um determinado tempo t. Um geo-objeto é um elemento único que pode possuir atributos não-espaciais e está associado a uma localização geográfica exata dentro de uma região”.

Quando se estabelecem estas duas possibilidades de formalização aos geodados urbanos, surgem as limitações inerentes a cada um destes modelos, associadas a condicionamentos lógicos que atuam tanto no nível infológico como datalógico. Nos dados de natureza físico-territorial, as suas características tornam a conceituação em campos e objetos mais direta, e para estes a dicotomia conceitual se apresenta como um amplo arcabouço representacional. Nos dados socioeconômicos, o alcance deste arcabouço é mais limitado. Geralmente, a aplicação de SIG em modelagem socioeconômica sustenta-se em modelos nascidos de aplicações físico-territoriais.

As propriedades topológicas dos geo-objetos resumem-se em dois conceitos básicos: contigüidade e conectividade. A idéia de agregação ou de co-vizinhança, embutida no conceito de contigüidade, é capaz de trazer expressões de representação dos territórios urbanos que revelam padrões de associações espaciais inicialmente ocultos nas tabelas. O conceito de conectividade, por sua vez, está relacionado basicamente ao fluxo, à noção de rede, o que remete ao conceito de espaço relativo (vide Item 1.6). O fluxo geralmente é associado à interconexão, pontos conectados dois a dois, um gerador e outro atrator de movimento. Em ambientes urbanos, o estudo dos fluxos está relacionado ao estudo dos padrões de movimento que, em última instância, estabelecem os inter-relacionamentos presentes no ambiente intra-urbano (Villaça, 1998).

Os mapas coropléticos certamente são os mais difundidos para a representação dos geo-objetos com informações populacionais. Mesmo sendo tão difundida esta forma de representação, Tufte (1994) aponta três inconveniências básicas na representação por mapas coropléticos: “(a) os tamanhos das áreas não são uniformes; (b) as áreas preenchidas com cores normalmente são proporcionais à área territorial e não às características representadas, geralmente com áreas despovoadas recebendo grande ênfase visual; (c) as mudanças históricas nas fronteiras políticas impedem a construção de séries estatísticas”. Portanto, para que se possam estabelecer leituras adequadas da complexidade urbana a partir de uma escala de análise coerente a este tipo de representação, o parcelamento do espaço urbano deveria respeitar algumas condições básicas, como homogeneidade interna do grupo a ser representado. Muitas vezes, um projeto de zoneamento, por exemplo, está menos atento a estas questões e mais relacionado a questões administrativas ou operacionais de levantamentos.

Em face dessas restrições, os mapas coropléticos, ainda largamente utilizados na comunicação de dados socioeconômicos, passam cada vez mais a ceder lugar a formas alternativas de representação baseadas em modelos de geo-campos. O trabalho de Martin (1995) é referência nesta linha de pesquisa. Para ele: “a excessiva fragmentação do território no modelo de polígonos impõe limitações na percepção da totalidade do fenômeno. Assim, a compreensão do território não pode estar restrita a este tipo de representação, e se deve complementar esta visão com representações do espaço urbano através de *imagens e superfícies*”.

O modelo de superfície, quando aplicado aos dados socioeconômicos urbanos, representa a população de forma contínua. Isto implica uma leitura da realidade em que é mais difícil estabelecer as fronteiras entre os diferentes territórios, as transições são graduais e contêm graus relativos de incerteza (Fig. 10). De certo modo, é apropriado pensar que a população de uma cidade se distribua continuamente, mesmo sabendo-se que aspectos como vias de circulação, zoneamento urbano, ou acidentes geográficos muitas vezes definem fronteiras abruptas entre um território e outro. Ainda assim, a

representação por campos numéricos é capaz de transmitir mais adequadamente a forma como ocorre a ocupação do território, possibilitando uma leitura da tendência global do comportamento das variáveis.

Excetuando-se as imagens digitais, que constituem um tipo particular de dado representado como campo numérico, o grande desafio na utilização deste modelo de representação é construir tais superfícies, uma vez que a aquisição de dados em todos os pontos do território nem sempre é possível. Dessa forma, são necessários processamentos para se inferir valores nos pontos onde não se tenha valor conhecido associado. Estes processamentos geralmente estão relacionados a processos determinísticos ou estocásticos de interpolação a partir de pontos amostrais. Alguns exemplos desses processamentos serão apresentados e discutidos nos capítulos da Seção 2 deste livro.

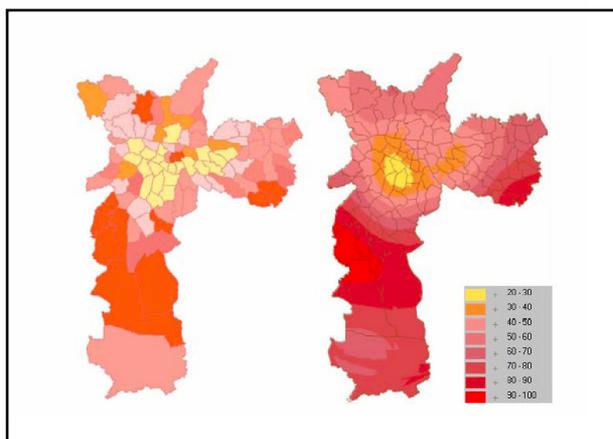


Fig. 10. (a) À esquerda: Mapa coroplético representando os distritos de Município de São Paulo classificados de acordo com o total de homicídios no ano de 1999. (b) À direita: Superfície interpolada por métodos geoestatísticos para o mesmo conjunto de dados.

Apesar dos recentes avanços nas pesquisas sobre modelos e representações computacionais, existe ainda uma distância conceitual considerável entre a construção de ontologias para entidades (ruas,

quadras, lotes etc.) do ambiente urbano e a construção de ontologias para análises da estrutura intra-urbana propriamente dita. No primeiro caso, pode-se abstrair com relativa naturalidade uma rua como uma linha, ou um lote como um polígono.

Em análises de estruturas intra-urbanas, os conceitos a serem representados possuem caráter subjetivo e dinâmico. Os territórios e seus inter-relacionamentos dificilmente poderão ser representados simplesmente como imagens estáticas, polígonos coloridos, linhas e pontos. Eles deverão ser revelados em um processo iterativo de manipulação e transformação dos dados. Neste sentido, a Geoinformação enquanto ferramenta analítica permite a necessária flexibilidade aos estudos urbanos a partir da sua capacidade de manusear e processar geodados, transformando-os entre diferentes categorias de representação (Figura 11) a partir de processamentos matemáticos e lógicos, gerando assim novos dados, ampliando (ou realçando) a capacidade de observação de um conjunto de dados alusivos a múltiplas dimensões e fenômenos da esfera urbana (Ramos, 2002).

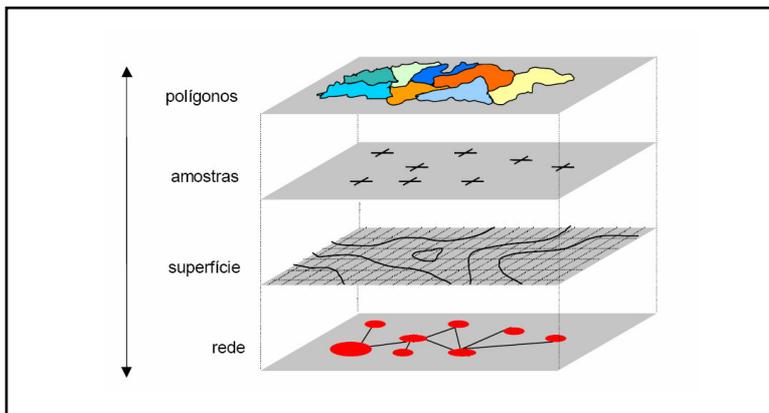


Fig. 11. Categorias de representação usuais em SIG.

9. Considerações Finais

Este capítulo expôs conceitos e teorias vinculados à representação computacional do espaço geográfico em sua multiplicidade de domínios e processos, e nesta tarefa reside precisamente a concepção e criação de territórios digitais.

“O território é o dado essencial da condição da vida cotidiana”. Assim falava o geógrafo e pensador Milton Santos (Santos, 2000). Aí está o grande desafio que enfrentamos: o processo de gestão pública urbana e regional do Brasil de hoje passa pela construção dos territórios digitais, que devem buscar capturar aspectos cada vez mais complexos da realidade brasileira. Os territórios digitais não são mapas coloridos, mas sim expressões quantitativas de conceitos sobre os diferentes processos físicos e socioeconômicos. Para colocar o território no centro dos processos de decisão política e empresarial, é preciso, como dizia Milton Santos *“reinterpretar a lição dos objetos que nos cercam e das ações que não podemos escapar”*.

Construir territórios digitais implica colocar as geotecnologias efetivamente a serviço da sociedade. Para isto, é necessária uma combinação de metodologias, dados e software que operem de forma adaptada às nossas necessidades. A partir da reafirmação da individualidade e da força própria do lugar, com base em um profundo esforço de auto-determinação e aprendizagem, podemos usar o potencial latente das novas tecnologias para construir uma *“modernidade à brasileira”*. Esta realização depende de nossa capacidade de rejeitar as soluções “chaves-na-mão” e de construir nossas próprias alternativas, usando criativamente as técnicas à nossa disposição. A inspiração do mestre aponta assim para uma necessidade histórica: usar os territórios digitais para retomar o controle dos territórios reais. Quando usamos a Geoinformação para planejar o desenvolvimento urbano sustentado em cidades costeiras, para mapear a exclusão social em São Paulo, para gerenciar riscos ambientais em cidades de Santa Catarina, ou para racionalizar o sistema de matrícula escolar em Belo Horizonte, estamos realizando a inspiração do mestre Milton Santos: *“A memória olha para o*

passado. A nova consciência olha para o futuro. O espaço é um dado fundamental nesta descoberta” (Santos, 2000).

Referências Bibliográficas

Caldeira, T. P. R. **Cidade de muros: crime, segregação e cidadania** em São Paulo. São Paulo: Edusp, 2000. 400 p.

Camara, G., Casanova, M.A., Hemerly, A.S., Magalhães, G.C., Medeiros, C.M.B. **Anatomia de sistemas de informação geográfica**. Campinas: Instituto de Computação-UNICAMP, 1996. 193p.

Camara, G.; Monteiro, A.M.V. **Introdução ao geoprocessamento: Aula 2- Modelos de dados geográficos** [on-line], 2001. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser300/aulas/aula2-modelos>>. Acesso em 23 jun. 2005.

Camara, G.; Monteiro, A. M. V.; Medeiros, J. S. Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da Ciência da Geoinformação. **Geografia**, v. 28, n.1, p. 83-96, 2003.

Castells, M. **A sociedade em rede**, São Paulo: Paz e Terra, 1999. 614 p.

Chauí, M. **Brasil: mito fundador e sociedade autoritária**. São Paulo: Editora Fundação Perseu Abramo, 2000. 103 p.

Couclelis, H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 165-174, 1997.

Fonseca, F.; Egenhofer, M.; Davis, C.; Borges, K. Ontologies and knowledge sharing in urban GIS. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 24, n. 3, p. 232-251, 2000.

Fonseca, F.; Davis, C.; Camara, G. Bridging ontologies and conceptual schemas in geographic information integration. **Geoinformatica**, v. 7, n. 4, p. 355-378, 2003.

Genovez, P. C. **Território e desigualdades: análise espacial intra-urbana no estudo da dinâmica de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos**. São José dos Campos. 220 p. (INPE-12177-TDI/973). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2002.

Gruber, T. R. Toward principles for the design of ontologies used for knowledge sharing, **International Journal of Human and Computer Studies**, v. 43, n. 5/6, p. 907-928, 1995.

Holanda, S. B. **Visão do paraíso: os motivos edênicos no descobrimento e colonização do Brasil**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1969. 2 ed. 356 p.

Martin, D. **Geographic information systems: socioeconomic applications**. London: Routledge, 1995. 240 p.

Massey, D. S; Denton, N. A. **American apartheid segregation and the making of the underclass**. Cambridge: Harvard University Press, 1993. 304 p.

Popper, K. R. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo: Cultrix, 1975. 567 p.

Ramos, F. **Análise Espacial de Estruturas Intra-Urbanas: O caso de São Paulo**. São José dos Campos. 141 p. (INPE-10286-TDI/905). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2002.

Santos, M. **Espaço e método**. São Paulo: Nobel, 1985. 3. ed. 88p.
Schuurman, N. Critical GIS: Theorizing an emerging science. **Cartographica**, v. 36, n. 4, 1999.

Santos, M. **Por uma outra globalização**: do pensamento único à consciência universal. Rio de Janeiro: Record, 2000. 3 ed. 174 p.

Searle, J. R. **The construction of social reality**. New York, USA: Free Press, 1997. 256 p.

Smith, B. ed. Ontology: philosophical and computational. In: Floridi, L. ed. **The Blackwell Guide to the Philosophy of Computing and Information** (Blackwell Philosophy Guides). Oxford: Blackwell, 2003. 392 p.

Smith, B.; Mark, D. M. Ontology and geographic kinds. In: Poiker, T. K.; Chrisman, N. ed. 8th International Symposium on Spatial Data Handling (SDH'98). **Proceedings**. Vancouver: International Geographical Union, 1998, p. 308–320.

Sposati, A. ed. **Mapa da exclusão/inclusão social da cidade de São Paulo**. São Paulo: EDUC, 1996. 126 p.

Sposati, A. **Mapa da exclusão/inclusão Social da Cidade de São Paulo/2000** - Dinâmica Social dos Anos 1990. São Paulo: PUC/SP, 2000. [CDROM].

Stevens, S. S. On the theory of scales of measurement. **Science**, v. 103, p. 677-680, 1946.

Torres, H. G., Marques, E. Pobreza e distribuição espacial de grupos sociais na metrópole de São Paulo, **Cadernos Adenauer**, v. 6, n. 1, p. 35-50, 2004.

Tufte, E. R. **Envisioning information**. Cheshire: Graphic Press, 1994. 126 p.

Villaça, F. **Espaço Intra-Urbano no Brasil**. São Paulo: Studio Nobel, 1998. 373 p.

White, M. J. The measurement of spatial segregation. **American Journal of Sociology**, v. 88, p. 1008-1018, 1983.

Ontologias de objetos geográficos: O lote urbano

Carolina Moutinho Duque de Pinho¹
Elizabeth Goltz¹

¹INPE—Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Caixa Postal 515, 12201 São José dos Campos, SP, Brasil
carolina@ltd.inpe.br; goltz@ltd.inpe.br

Abstract: Nowadays, the use of ontologies has been discussed in the Geoinformation Science area as a way to solve problems of semantical interoperability in Geographical Information Systems. Nevertheless, the recent scientific production has been focused on concepts definition and specifications. There are few studies dedicated to the construction of geographical objects ontologies. In this context, the present article is an important contribution as it proposes an urban parcel ontology framework in the domain of the Real State Official Register of Belo Horizonte local government (MG, Brazil).

1. Introdução

Muitos trabalhos na área da Ciência da Computação, principalmente na área de banco de dados, vêm explorando o uso de ontologias visando especificar e padronizar informações de um determinado domínio, possibilitando o seu compartilhamento e reuso por diferentes usuários.

Os atuais Sistemas de Informações Geográficas possuem uma interconexão ainda falha, devido à dificuldade de troca de informações entre diferentes sistemas. Esta dificuldade se dá em dois níveis: no sintático e no semântico. O primeiro nível refere-se ao esquema próprio de cada sistema para armazenar e documentar seus dados. O segundo diz respeito à representação conceitual da informação geográfica, ou o significado do dado geográfico para um dado sistema.

O uso de ontologias é proposto como uma possível solução para os problemas de interoperabilidade semântica nos sistemas de informações geográficas.

Este artigo tem como objetivo a construção de uma ontologia de lotes urbanos dentro do domínio do Cadastro Técnico Municipal (CTM) de Belo Horizonte (Minas Gerais – Brasil). A sua principal contribuição é fornecer uma ferramenta que facilite a manipulação do banco de dados do CTM, bem como a troca de informações entre as diferentes secretarias que utilizam dados dos lotes urbanos em suas tarefas diárias. O texto está estruturado em mais três seções. A primeira dedica-se a uma breve revisão da literatura sobre ontologias na Ciência da Computação e ontologias Espaciais. A seção seguinte documenta o processo de criação da ontologia de lote, e por fim, a quarta e última expõe as conclusões finais deste trabalho.

2. Revisão de literatura

2.1 Ontologias

A palavra ontologia foi herdada da filosofia, que significa uma explicação sistemática da existência. (Novello, 2002).

No caso do uso do termo “ontologia” na Ciência da Computação, sua definição foi dada inicialmente por Gruber (1993), sendo que “*ontologia é uma especificação explícita de uma conceitualização*”. Já para Guarino (1998), “*uma ontologia é uma teoria lógica para relacionar o significado pretendido de um vocabulário formal, isto é, seu comprometimento com uma conceitualização particular do mundo*”.

Gómez-Pérez (1999) destaca que para a construção de uma ontologia, cinco tipos de componentes têm que ser levados em conta: conceitos (termos ou classes, e seus domínios de valores), relacionamentos, funções (relações especiais onde o n-ésimo elemento da relação é único para os n-1 elementos precedentes), axiomas (modelam sentenças que são sempre verdadeiras) e instâncias.

Segundo Novello (2002), os relacionamentos mais utilizados na representação de ontologias são a taxonomia (“é um”, “tipo de”), a partonomia (“parte de”), a mereologia (teoria “parte-todo”), a cronológica (precedência entre os conceitos) e a topologia (teoria de limite e fronteira).

Dependendo de sua aplicabilidade as ontologias se classificam em (Guarino, 1998 *apud* Guizzardi, 2000): a) *Nível de Topo* que descrevem conceitos gerais, como: espaço, tempo, matéria, objeto, ação, etc; b) *Domínio* são as que expressam conceituações de domínios particulares, descrevendo o vocabulário relacionado a um domínio genérico, como: Medicina e Direito; c) *Tarefa*: expressam conceituações sobre a resolução de problemas, descrevem o vocabulário relacionado a uma atividade ou tarefa genérica, como: diagnose e vendas; d) *Aplicação* descrevem os conceitos dependendo de uma ontologia de domínio e de tarefas particulares. Correspondem a papéis desempenhados por entidades do domínio quando da realização de uma certa atividade, e) *Representação* são aquelas que explicam as conceituações que fundamentam os formalismos de representação de conhecimento.

2.2 Ontologias de Objetos Geográficos

Smith e Mark (1998) propõem a construção de ontologias espaciais com o objetivo de se obter um melhor entendimento do mundo geográfico. Os mesmos autores alegam que o uso deste tipo de ontologias pode auxiliar na troca de informações entre diferentes grupos de pessoas, na manipulação das entidades geográficas realizadas pelos SIG's e também pode evitar distorções provenientes da cognição humana em relação aos fenômenos geográficos.

Smith e Mark estabelecem a diferença entre objetos geográficos e objetos comuns. Os primeiros são caracterizados pela a importância de sua localização para a definição da classe a qual pertence, ou seja, "o quê?" e "o onde" estão intimamente ligados. Assim, seria impossível imaginar uma duna localizada no Pólo Norte. Outros elementos importantes na especificação dos objetos geográficos são o tamanho, a escala com os quais estes objetos são representados e o relacionamento dos mesmos com suas "boundaries".

De acordo com os mesmos autores os objetos geográficos são de dois tipos: *Bona Fide* e *Fiat*. O primeiro tipo reúne objetos que possuem uma delimitação física de seus limites aceita de forma razoavelmente consensual entre pessoas de culturas diferentes. São objetos concretos, como uma estrada, uma montanha, ou um lago. Já os *Fiats* referem-se a objetos que tem seus limites abstratos, projetados dentro do espaço geográfico independente das descontinuidades do mundo real. Os *Fiats* são categorizados em: a) *Fiats and vagueness* são objetos que não possuem uma "boundary" (fronteira) bem definida, os limites deles são "diluídos" no espaço; b) *Consensus Fiats* têm sua existência aceita de forma consensual pelos habitantes de uma determinada área; c) *Legal fiats* seus limites são definidos por algum artifício legal, como um lote ou a divisão de bairros de um município; d) *GIS fiats* são os objetos criados a partir da lógica matemática dos SIG's.

3. Construindo uma Ontologia de Lote

A construção da ontologia de lote deste trabalho foi inspirada num problema concreto vivido no final da década de 90 pela PRODABEL (Empresa de Informática e Informação do Município de Belo Horizonte): Como obter uma única representação para o objeto geográfico lote que contemple as várias dimensões deste conceito (legal, cadastral, tributária e jurídica)?

A questão colocada acima se insere na discussão sobre a compatibilização dos diversos bancos de dados da prefeitura de Belo Horizonte para a elaboração de um Cadastro Técnico Municipal (CTM) informatizado. Com o objetivo de estudar as soluções para a compatibilização das bases de dados da prefeitura, foi criado o CTCCL (Grupo Técnico de Compatibilização de Cadastros de Lote), formado por técnicos das secretarias e órgãos ligados às atividades urbanas.

(Gomes, 2000). O trabalho deste grupo concentrou-se na definição de um modelo de dados para o banco de dados geográfico do Cadastro Técnico municipal.

A construção da ontologia de lote não seguiu nenhuma metodologia pronta, isto porque há poucos trabalhos que se detém à construção de ontologias de objetos geográficos e estes se referem a problemas muito específicos como, por exemplo, a construção de uma ontologia para aeroportos¹. A produção científica relacionada à ontologia de objetos geográficos está mais focada na definição de conceitos do que na determinação de uma metodologia de construção de ontologias. Um bom exemplo deste direcionamento da literatura pode ser visto nos artigos de Smith (1995) e Smith e Mark (1998 e 2001).

Diante de tal quadro, optou-se pela a construção de uma metodologia própria, onde seria montado um esquema com os conceitos relativos ao objeto e as relações existentes entre os mesmos. Esta metodologia foi estabelecida de maneira empírica com base em consultas a dicionários da língua portuguesa e às leis de parcelamento e uso do solo de Belo Horizonte.

3.1 Definição de Conceitos, Sinônimos e Tipologias

O objetivo desta etapa era estabelecer o conceito de lote, os sinônimos para o mesmo e os tipos de lotes existentes. Primeiramente, partiu-se para uma pesquisa do termo lote em dicionários da língua portuguesa. O resultado desta pesquisa foi bastante interessante, pois trouxe as diferentes acepções de lote para a língua portuguesa, incluindo definições que se adequaram ao contexto da ontologia de lote urbano. Como é o caso da definição número seis do dicionário Michaelis: "lote s.m. 1 parte, parcela, quinhão. 2 de objetos conjunto, série, grupo; de pessoas grupo, agrupamento, ajuntamento. 3 Cada uma das porções de um todo que se distribui entre várias pessoas; quinhão, parcela. 4. Conjunto de objetos leiloados de uma vez. 5. Grupo de pessoas; magote, rancho. 6. Cada uma das partes de um terreno loteado. 7. Grupo de dez animais cargueiros". (dicionário eletrônico Michaelis-UOL).

Durante esta fase inicial surgiu uma questão importante: Que amplitude deveria ter uma ontologia de lote urbano, já que existem várias acepções para este termo na língua portuguesa?

¹ Há dois exemplos interessantes que documentam a construção de ontologias de objetos geográficos: *Ontologies in support of activities in geographical space* de W. Kuhn e *Ontology and Epistemology for agent-based wayfinding simulation* de M. Raubal. O primeiro trata da construção de uma ontologia para o sistema de tráfego alemão baseado no código de trânsito deste país. O outro se refere à construção de uma ontologia para aeroportos. Os dois trabalhos estão publicados num número especial do *International Journal of Geographical Information Science* (volume 15, número 7) dedicado a ontologias no domínio Geográfico.

Dada a natureza do objeto geográfico lote urbano, chegou-se à conclusão que se poderia trabalhar com dois níveis de ontologia: uma de nível de topo onde estariam presentes conceitos e relações mais gerais, como: objeto geográfico, tipo de objeto geográfico, relações de taxonomia e partonomia; e uma ontologia de aplicação onde se especificariam conceitos e relações da ontologia de lote no domínio do CTM.

Definidos os níveis de ontologia que seriam utilizados partiu-se então para a construção da ontologia de lote.

3.2 Construção

Foram montados dois diagramas: um para a ontologia de lote para nível de topo e outro para nível de aplicação. Na ontologia de nível de topo decidiu-se trabalhar com a classe de objetos inanimados que através de relações de taxonomia foi subdividida em subclasses até o nível dos objetos *Legal Fiats*. A partir deste nível foram estruturadas relações de partonomia que se iniciaram na classe país até chegarem ao nível do lote, que na ontologia em questão é a menor unidade de área de um município. A figura 1, mostra em detalhes o esquema da ontologia de nível de topo.

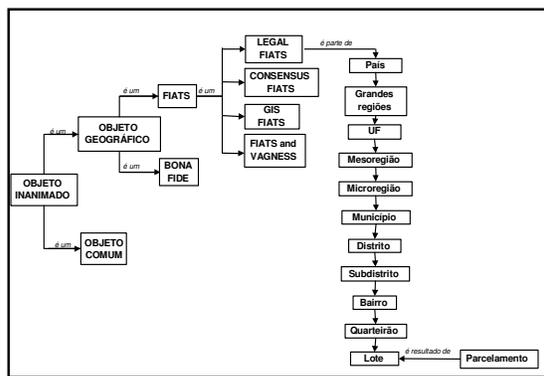


Figura 1 – Ontologia de nível de topo.

A definição da ontologia de aplicação necessitou de uma maior especificação dos conceitos, processos e relações existentes na ontologia de lote dentro do domínio do CTM. Desta forma, pesquisou-se à lei de parcelamento, uso e ocupação do solo de Belo Horizonte (lei nº 7.166 de 27 de agosto de 1996) como fonte de informação.

A lei de parcelamento, uso e ocupação do solo de Belo Horizonte abrange um número grande de conceitos, processos e restrições que se relacionam diretamente com o objeto geográfico lote. Entretanto optou-se em priorizar os processos que originam o lote, a classificação do mesmo quanto a sua legalidade e as diferentes conceituações de lote apresentadas pelas secretarias municipais que utilizam o CTM.

De acordo com a lei, um lote é a porção do terreno parcelado, com frente para via pública e destinado a

receber edificação. Este é produto de um processo de parcelamento de uma determinada gleba². O parcelamento realizado de quatro formas distintas: a) *Loteamento* é necessário criar ou prolongar vias públicas para se aprovar um ou mais lotes em uma gleba; b) *Desmembramento* neste processo não é necessário criar nem prolongar via pública existente para aprovar um ou mais lotes em uma gleba; c) *Parcelamento vinculado* é destinado a abrigar atividades em um ou mais lotes e que causam grande impacto sobre o meio urbano e/ou que exigem grandes áreas para se implantarem (distritos industriais, conjuntos habitacionais, etc.); d) *Parcelamento para Condomínios* constitui uma variante do parcelamento vinculado destinado a abrigar conjunto de edificações em um ou mais lotes, dispondo de espaços de uso comum caracterizados como bens de condomínio.

Um lote também pode ter sua origem definida a partir de dois processos de modificação do parcelamento: *reparcelamento* e *modificação do parcelamento*. O primeiro relaciona-se com a modificação de um ou mais lotes e vias públicas anteriormente aprovados (casos de instalação de indústrias, shopping centers, etc). O segundo constitui-se na alteração de um ou mais lotes aprovados anteriormente devido a desapropriações efetuadas ou a interesse de se modificar a subdivisão dos lotes.

O termo loteamento também é utilizado na lei de parcelamento para referir-se a um conjunto de lotes e logradouros provenientes de um dos processos de parcelamento. Neste caso o termo deixa de ser empregado como uma “ação” e passa a especificar um objeto geográfico concreto. Há ainda a distinção legal entre os loteamentos onde eles são classificados em *Clandestinos* e *Legais*. Os *Clandestinos* são formados pelas “*Vilas e Bairros existentes de fato que se tornam passíveis de aprovação sem, no entanto, significar que a Prefeitura, através desta aprovação, esteja reconhecendo direitos quanto à posse e domínio entre as partes interessadas no contrato de aquisição de terreno ou prédio*” (lei nº 7.166 de 27 de agosto de 1996). Já os loteamentos legais são todos os outros que não são clandestinos.

Um dos fatores mais importantes na construção da ontologia de lote foi à incorporação das diversas visões dos órgãos da administração municipal sobre o que seria um lote.

Segundo Gomes (2000) estas visões são complementares, mas nenhuma delas possui todos os atributos necessários para representar toda a complexidade da realidade prática. O mesmo autor apresenta as quatro visões da prefeitura: a) *Lote Legal ou Oficial* é o que tem seu registro em cartório e está no

² Segundo a lei de parcelamento, uso e ocupação do solo de Belo Horizonte uma gleba é a área de terra que não foi objeto de loteamento ou desmembramento.

arquivo da Secretaria Municipal de Atividades Urbanas em plantas aprovadas pela prefeitura; b) *Lote Tributário* é decorrente do Código Tributário Nacional e é o fato gerador do imposto territorial urbano componente do IPTU; c) *Lote Cadastral ou real* é o “lote físico”, ou seja, o lote enquanto porção de terreno implantado e delimitado no local. Esta dimensão não considera a situação oficial do terreno apenas cadastra as subdivisões existentes na cidade. O lote real é o que está geralmente representado na cartografia do CTM. d) Lote Jurídico refere-se aos lotes que possuem suas características e propriedades registradas em cartório.

Depois de definidos os principais conceitos, foi montado um esquema, em forma de diagrama, da ontologia de aplicação lote (figura 2).

4. Considerações Finais

A construção de uma ontologia para lote urbano foi uma experiência bastante interessante e desafiadora, já que não existe uma metodologia definida e consagrada para construção de ontologias de objetos geográficos.

Este fato não pode ser atribuído somente ao número reduzido de trabalhos que documentam este

tipo de experiência, mas também ao fato de que as relações de objetos espaciais na vida real são muito mais complexas do que simples relações de partonomia e taxonomia.

É importante destacar que antes de se criar uma ontologia é necessário estabelecer a amplitude da mesma, pois não é possível construir uma ontologia que se estendam a todos os conceitos e relacionamentos de um determinado objeto geográfico. Neste artigo este fato foi constatado quando se utilizou o dicionário de língua portuguesa para a determinação de conceitos, tipos e sinônimos de lote. O resultado da pesquisa mostrou-se muito extenso com um grande número de termos que não se relacionavam à ontologia de lotes urbanos.

Outra conclusão bastante significativa é que necessário à incorporação das diferentes acepções dos grupos de usuários que irão utilizar a ontologia em questão para que esta seja aplicável e funcional. A prefeitura de Belo Horizonte deu um passo importante na direção da construção de um Cadastro Técnico Municipal mais funcional e compreensível quando criou o CTCCL.

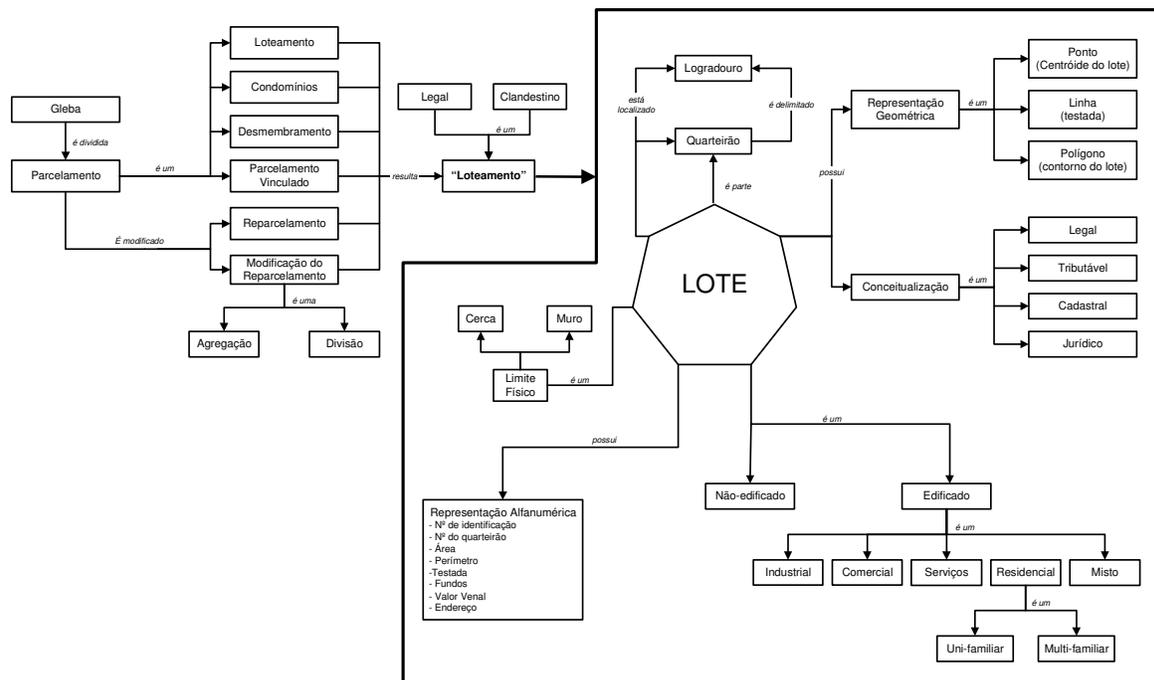


Figura 2 – Ontologia de aplicação para lote urbano do município de Belo Horizonte-MG.

5. Bibliografia

- [1] A ontologia de Aristóteles. In: Pages Madinfo.pt, (2003). (<http://pages.madinfo.pt/filosofia/textos/aristot.html>)
- [2] Dicionário eletrônico Michaelis-UOL.
- [3] Fonseca, F. e Egenhofer, M. Sistemas de Informação Geográficos Baseados em Ontologias, *Informática Pública* 1 (2) (1999), 47--65.
- [4] Gomes, A. C. dos R. *A representação do lote CTM no Geoprocessamento de Belo Horizonte*. Belo Horizonte, Minas Gerais, Universidade Federal de Minas Gerais, (2000), disponível em :www.csr.ufmg.br/geoprocessamento/reisgomes2000.pdf.
- [5] Gómez-Pérez, A. e Benjamins, V.R. *Overview of knowledge sharing and reuse components: Ontologies and problem-solving methods*. In: International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-99), Workshop on Ontologies and Problem-Solving Methods (KRR5). Stockholm, Sweden, (1999).
- [6] Gruber, T.R. *A Translation Approach To Portable ontology Specifications*. Knowledge Acquisition. 5: p. (1993), 199--220.
- [7] Guarino, N. *Formal Ontology and Information Systems*. Proceedings of FOIS'98, Trento, Italy, 6-8 June (1998). Amsterdam, IOS Press, pp. 3--15. (<http://www.ladseb.pd.cnr.it/infor/Ontology/Papers/FOIS98.pdf>)
- [8] Guizzardi, G. *Uma abordagem Metodológica de Desenvolvimento para e com reuso, Baseada em Ontologias Formais de Domínio*. **Dissertação de Mestrado em Informática** - Universidade Federal do Espírito Santo, (2000), 148 p. Vitória.
- [9] Kuhn, W. Ontologies in support of activities in geographical space. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 15, nº 7, (2001), 591--612.
- [10] Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. *Lei de parcelamento, uso e ocupação do solo - Lei nº 7.166 de 27 de agosto de 1996* (1996), disponível em <http://www.pbh.gov.br/ativurb/dpsau/legis/guia/capa.htm>.
- [11] Lima, P. *GeoBR: Intercâmbio Sintático e Semântico de Dados Espaciais*. MsC., Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) São José dos Campos, (2002). (<http://www.dpi.inpe.br/teses/lima>).
- [12] Novello, T.C. *Ontologias, Sistema Baseados em Conhecimento e Modelos de Banco de Dados*. Seminário apresentado na disciplina de Tópicos Avançados em Banco de Dados. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2002).
- [13] Raubal, M. *Ontology and epistemology for agent-based wayfinding simulation*. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 15, nº 7, (2001) 591--612.
- [14] Smith, B e Mark, M. Geographical categories: an ontological investigation. *International Journal of Geographical Information Science*. Vol. 15, nº 7, (2001), 591--612.
- [15] Smith, B e Mark, M. *Ontology and geographic Kinds* *International Symposium on Spatial data Handling*. Vancouver, BC, Canadá (1998).
- [16] Smith, B. *On drawing lines on a map*. In: Spatial Information Theory. A Theoretical Basis for GIS, International Conference COSIT'95, vol. 988, Lecture Notes in Computer Science. A. Frank e W. Kuhn, Eds. Berlin: Springer Verlag, (1995), 475—484

Indicadores Territoriais de Exclusão/Inclusão Social: Geoinformação como Suporte ao Planejamento de Políticas Sociais

PATRÍCIA CARNEIRO GENOVEZ¹

ANTÔNIO MIGUEL VIEIRA MONTEIRO¹

GILBERTO CÂMARA¹

CORINA DA COSTA FREITAS¹

1. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens (DPI)
Caixa Postal 515 – 12201 – 097 – São José dos Campos – SP, Brasil
(genovez@dpi.inpe.br, miguel@dpi.inpe.br, gilberto@dpi.inpe.br, corina@dpi.inpe.br)

Resumo

O crescente processo de urbanização brasileira coloca as cidades como organismos centralizadores e produtores de intensas desigualdades socioterritoriais. A elaboração de propostas políticas que considerem o território como informação estratégica para a redução das desigualdades evidencia a crescente necessidade de produção, organização e atualização de informações cada vez mais detalhadas e desagregadas geograficamente. Os estudos desenvolvidos buscam contribuir para instrumentalizar o planejamento de políticas públicas no espaço intra-urbano, tendo como metas: (a) a análise e produção de indicadores socioterritoriais de exclusão/inclusão social e; (b) o desenvolvimento de técnicas diferenciadas para a produção e tratamento de dados em unidades de análise territorial. Para tal, utilizou-se a integração de Sistemas de Informações Geográficas (GIS), Bancos de Dados Geográficos (GDB) e técnicas de Análise Espacial de Dados Geográficos (SA) a fim de analisar o comportamento espacial dos indicadores de exclusão/inclusão social no espaço urbano de São José dos Campos – São Paulo.

1 - Introdução

Nas últimas décadas a exclusão social tornou-se assunto de importância mundial nos debates sobre planejamento e direcionamento de políticas públicas (Teague & Wilson, 1995). A persistência das desigualdades sociais deixou de ser exclusividade dos países de “terceiro mundo” ou “em desenvolvimento” (FNUAP, 1999). Entretanto, é preciso reconhecer que a trajetória histórica destes países ainda revela padrões de segregação socioespacial significativamente diferentes dos países “desenvolvidos” (Santos & Silveira, 2001a).

A persistência das desigualdades sociais é um forte indicador da necessidade de novas propostas de políticas públicas que minimizem este processo (Teague & Wilson, 1995). Desconsiderar a influência do território¹ no fenômeno urbano, tem sido uma postura comum no planejamento das políticas públicas no Brasil (Santos, 1985). Entretanto, nenhuma proposta política pode tornar-se estratégica e efetiva ignorando a dinâmica territorial (Santos, 2001b), porque o processo de exclusão/inclusão social manifesta-se territorialmente (Koga, 2001).

Embora contenha subjetividades, o território é uma realidade objetiva, um produto social (Santos, 1979b), dotado de uma diversidade de variáveis, quantitativas e qualitativas que,

¹ Território, neste trabalho, é entendido como o recorte espacial adotado para a captura e representação dos dados quantitativos. A unidade de análise territorial a ser utilizada partirá da divisão da área urbana de São José dos Campos - São Paulo em setores censitários previamente definidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 1991.

vinculadas ao mesmo, oferecem subsídios para a compreensão dos diferentes territórios que o compõe. Desta forma, a significativa contribuição do território no planejamento de ações políticas remete à possibilidade de compreender os problemas urbanos na sua totalidade e nas suas frações. Entretanto, a tendência usual da produção e análise de dados urbanos volta-se para as cidades de maneira global (Koga, 2001). Esta abordagem, não consegue discriminar as intensas desigualdades sociais intra-urbanas (Vilaça, 1998) presentes nas cidades brasileiras. Neste contexto, a produção de indicadores socioeconômicos que considerem o território e suas diferentes realidades é determinante para auxiliar o planejamento e o direcionamento de políticas públicas.

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os resultados das pesquisas em desenvolvimento no Centro de Estudos das Desigualdades Socioterritoriais (CEDEST) composto em parceria pelo INPE, pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo (PUC-SP) e pelo Instituto de Estudos, Formação e Assessoria em Políticas Sociais (Polis), na área de construção de indicadores socioterritoriais. Estas pesquisas buscam fornecer subsídios ao planejamento de políticas públicas no espaço intra-urbano através de diferentes técnicas de tratamento de dados socioespaciais em SIG. Este capítulo está estruturado como segue: Item 2 apresenta as concepções teóricas envolvidas no trabalho; Item 3 contém as análises, a funcionalidade e as técnicas utilizadas para detectar variáveis significativas para o processo de exclusão/inclusão social produzindo, como resultado, o “índice síntese” e o “*Mapa Síntese*”² de exclusão/inclusão social para a cidade; Item 3.1 indica como os índices de autocorrelação espacial podem ser utilizados para validar o método de produção de “*Mapas Síntese*” e para identificar *clusters* (agrupamentos) significativos de exclusão/inclusão social; Item 4 analisa espacialmente a funcionalidade da síntese de variáveis quando aplicada aos fragmentos urbanos internos à cidade; Item 5 desenvolve uma análise comparativa entre a síntese de variáveis produzida para a cidade e para os fragmentos urbanos; Item 6 conclui o trabalho diferenciando a importância e a funcionalidade da produção e análise espacial dos “*Mapas Síntese*” para o planejamento e direcionamento de políticas públicas na cidade e nos fragmentos urbanos.

2 – Concepções Teóricas

Os estudos desenvolvidos têm com ponto de partida a utilização e adaptação do índice de exclusão/inclusão social desenvolvido para São Paulo à área urbana de São José dos Campos. A metodologia do Mapa da Exclusão/Inclusão Social de São Paulo, produzido pelo Núcleo de Segurança e Assistência Social da PUC/SP (Sposati, 1996), constitui a primeira experiência brasileira na construção de indicadores intra-urbanos (Koga, 2001). Esta metodologia apresenta uma série de inovações relacionadas à concepção teórica de exclusão social que influenciam de maneira determinante a estrutura e o cômputo dos indicadores concebidos para analisar este fenômeno.

A utilização do conceito de exclusão/inclusão social insere uma dimensão relacional que se opõe ao conceito unidimensional de exclusão social. Esta abordagem teórica considera a existência de uma relação intrínseca entre a exclusão e a inclusão social resultante de uma

² O termo “*Mapa Síntese*” é entendido, neste contexto, como a espacialização de índices compostos recalculados considerando apenas as variáveis estatisticamente significativas para o modelo.

interação entre múltiplas dimensões que, inevitavelmente, supera visões reducionistas calcadas, meramente, em medidas de pobreza (Sposati, 1996; Sposati, 2000; Koga, 2001).

A modelagem das múltiplas dimensões é concretizada através do conceito de Heterotopia que considera, na composição do índice de exclusão/inclusão social, a fusão de 4 diferentes Utopias de inclusão social denominadas Autonomia, Desenvolvimento Humano, Qualidade de Vida e Equidade. Estas dimensões utópicas são igualmente compostas por índices simples e/ou compostos.

A natureza relacional do fenômeno é representada através da associação de uma escala que qualifica as medidas obtidas para cada índice em relação a um referencial de inclusão. Este referencial de inclusão social é representado pelo número “0”³ que estabelece o limiar entre a exclusão (índices variando de -1 à 0) e a inclusão (índices variando de 0 à +1), definindo as condições mínimas necessárias à inclusão social. A utilização desta escala de representação é inovadora porque o padrão de referência de inclusão “0” (PRI) não corresponde à média dos dados, ele é fixado em relação às características específicas do espaço estudado expressando, com maior precisão, a polarização das desigualdades sociais intra-urbanas, superando a utilização de padrões externos, sejam eles nacionais ou internacionais. A **Figura 1** ilustra a escala utilizada para a representação espacial da exclusão/inclusão social, juntamente com o padrão de cores utilizado.

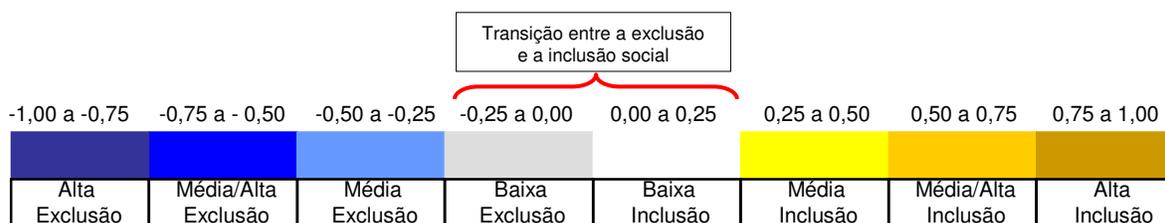


Figura 1 – Escala utilizada para a representação espacial da exclusão/inclusão social, juntamente com o padrão de cores utilizado.

Neste contexto, o arcabouço teórico considerado para interpretar o processo de exclusão/inclusão social, juntamente com o universo de variáveis disponível para a composição dos índices define quais serão as múltiplas dimensões consideradas nas Utopias; os limiares de inclusão; a diversidade territorial das desigualdades sociais expressa nos mapas e conseqüentemente o direcionamento e o planejamento de políticas públicas no espaço urbano (Maxwell, 1999; Senior, 2001). O Quadro 1 apresenta a composição do índice de exclusão/inclusão social (Sposati, 1996) adaptado para São José dos Campos - SP. A adaptação da metodologia utilizada em São Paulo para São José dos Campos teve como principal motivação aumentar a resolução espacial das análises, antes realizadas a nível distrital, considerando como unidade de análise territorial os setores censitários. A adequação do método quantitativo pode ser consultada em Genovez (et al.2001 e 2002).

³O padrão de referência de inclusão (PRI) é definido coletivamente entre pesquisadores e sociedade civil. Este padrão varia de acordo com o índice considerado e busca representar as condições mínimas necessárias para a inclusão social.

QUADRO 1 – ÍNDICES SIMPLES E COMPOSTOS PRESENTES NA COMPOSIÇÃO DO ÍNDICE DE EXCLUSÃO SOCIAL⁴

Indicadores (lexi)	Índices (lex)	Utopias	
lexi Chefes de família abaixo da linha de Pobreza (sem Rendimento) lexi Chefe de Família na Linha de Pobreza (com ganho até 2 Salários Mínimos)	lex Precária Condição de Sobrevivência	Autonomia de Renda dos Chefes de Família	
lexi sem Rendimento lexi até 0,5 Salário Mínimo lexi de 0,5 até 1 Salário Mínimo lexi de 1 a 2 Salários Mínimos lexi de 2 a 3 Salários Mínimos lexi de 3 a 5 Salários Mínimos lexi de 5 a 10 Salários Mínimos lexi de 10 a 15 Salários Mínimos lexi de 15 a 20 Salários Mínimos lexi mais de 20 Salários Mínimos	lex de Distribuição de Renda dos Chefes de Família		
lexi Chefes de Família não Alfabetizados lexi Escolaridade Precária (de 1 a 3 anos de estudo) lexi de 4 a 7 anos de estudo lexi de 8 a 10 anos de estudo lexi de 11 a 14 anos de estudo lexi mais de 15 anos de estudo	lex de Desenvolvimento Educacional	Desenvolvimento Humano	
lexi Alfabetização Precoce (com 5 a 9 anos) lexi Alfabetização Tardia (de 10 a 14 anos)	lex Estímulo Educacional		
lexi não Alfabetizados lexi Alfabetização Precária	lex Escolaridade Precária		
lexi População acima de 70 anos	lex Longevidade		
lexi Precário Abastecimento de Água lexi Precário Instalação Sanitária (Esgoto) lexi Precário Tratamento do Lixo	lex Qualidade Ambiental	Qualidade de Vida	
lexi Propriedade Domiciliar	Conforto Domiciliar		lex Qualidade Domiciliar
lexi Densidade Habitacional			
lexi Condições de Privacidade			
lexi Conforto Sanitário			
lexi Habitação Precária			
lexi Mulheres não Alfabetizadas lexi Concentração de Mulheres Chefes de Família		Equidade	

Fonte: CENSO DEMOGRÁFICO IBGE (1991)

Exclusão/Inclusão Social (lex)

No Brasil, onde as desigualdades sociais são extremas, a espacialização de índices simples revela padrões diferenciados de acordo com a variável analisada. A fusão destes índices em um índice composto é interessante porque permite capturar múltiplas dimensões em uma única realidade, revelando uma situação predominante (Senior, 2001). Desta forma, o índice composto de exclusão/inclusão social permite identificar as áreas onde há: (a) predomínio de índices negativos, ou seja, de exclusão social; (b) predomínio de índices positivos, ou seja, de inclusão social, e; (c) áreas de transição no limiar entre a exclusão e a inclusão social. Entretanto, a espacialização do índice composto de exclusão/inclusão social não permite identificar quais, dentre as múltiplas dimensões que o compõe, são determinantes para o processo de exclusão/inclusão social.

Identificar as variáveis estatisticamente determinantes para a exclusão/inclusão social na cidade e em seus fragmentos fornece informações diferenciadas, úteis para subsidiar a elaboração de políticas públicas que considerem heterogeneidades internas às tendências “globais” da cidade.

A busca de políticas públicas planejadas em função das diferenças internas ao território das cidades é uma tendência contemporânea, que tem como ênfase estratégica a descentralização⁵ (outros; Koga, 2001). Descentralizar o governo das cidades significa criar

⁴ O significado dos índices e das abreviaturas utilizadas encontra-se no Apêndice I.

⁵ Descentralização, no contexto deste trabalho, é o processo de transferência de poderes administrativos e fiscais para unidades sub-regionais.

mecanismos inovadores de gestão que considerem as particularidades de cada região, impulsionando potencialidades de desenvolvimento local de maneira participativa (Bava, 2001). Entretanto, a descentralização pode tornar-se apenas uma nova forma de centralização caso políticas pré-formuladas a partir de diretrizes globais sejam, simplesmente, redirecionadas a locais específicos da cidade desconsiderando suas diferenças. Os resultados e a efetividade das diferentes formas de gestão descentralizada têm sido amplamente avaliados e debatidos (Rolnik & Nakano, 2001), pois a descentralização feita sem planejamento e sem a utilização de uma análise adequada do território, pode dificultar ainda mais a implementação de políticas públicas orientadas à inclusão.

Neste contexto, as Geotecnologias representam um instrumento relevante para subsidiar a definição de políticas públicas na medida em que permitem analisar, produzir e integrar dados diversos em uma mesma base territorial.

Desta forma, as pesquisas desenvolvidas buscam ir além da simples espacialização de índices para o diagnóstico das áreas de exclusão/inclusão social. Ir além significa, neste contexto, descobrir não apenas **onde**, mas **qual(is)** variável(eis) são determinantes para a exclusão/inclusão social mediante as diferentes realidades que compõe uma cidade. A produção do “*Mapa Síntese*” a partir da espacialização do “*Índice Síntese*”, considerando apenas as variáveis estatisticamente significativas para a exclusão/inclusão social, foi a solução desenvolvida para diagnosticar prioridades “globais”, referentes à cidade, e prioridades “locais”, referentes a fragmentos internos à cidade.

3 – Produção e Validação do “*Mapa Síntese*”

A síntese de variáveis do modelo é feita a partir da interpretação de resultados derivados da matriz de correlação, dos coeficientes de determinação múltipla (r) e dos testes de hipótese “ t ” e “ F ”, detalhados em Neter et al. (1996) e Chatterjee & Price (1997). O modelo de regressão proposto busca entender como a variável dependente Y (índice de exclusão/inclusão social) varia em relação às variáveis independentes X (índices componentes da exclusão/inclusão social). Como resultado, tem-se uma equação de regressão estimada⁶ pela *síntese* dos índices internos às utopias em relação ao índice de exclusão/inclusão social, resultando em um novo “*índice de exclusão/inclusão social síntese*”. O fluxograma da Figura 2 apresenta as variáveis independentes (X) em relação à variável dependente (Y) e o resultado esperado.

A espacialização deste novo “*índice síntese*”, computado a partir das variáveis mais significativas para o modelo, é denominada “*Mapa Síntese*” e constitui o produto final destinado ao diagnóstico das variáveis determinantes, segundo o modelo, do processo de produção de desigualdades socioterritoriais.

⁶ $\hat{Y} = b_0 + b_1 \cdot X_1 + \dots b_{(p-1)} \cdot X_{(p-1)}$

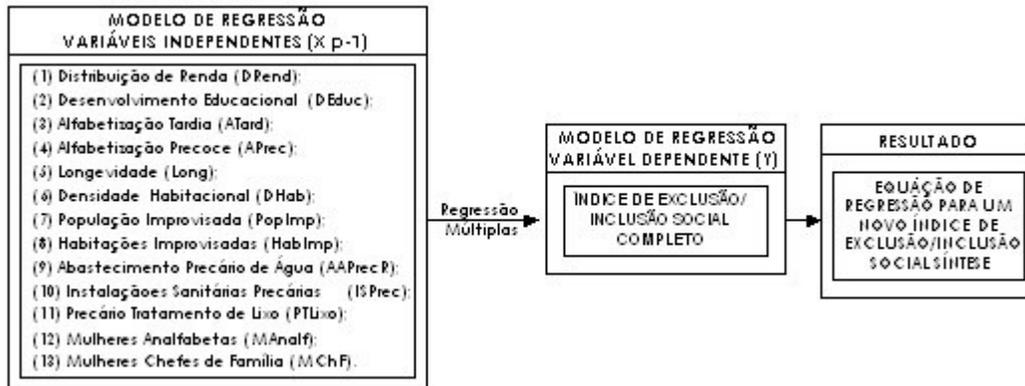


Figura 2 - Modelo de regressão utilizado, detalhando variáveis e resultados esperados.

Embora haja controvérsias quanto à funcionalidade do “*Mapa Síntese*” pode-se listar contribuições importantes ao tratamento quantitativo dos dados:

- I. A produção do “*Mapa Síntese*” pode ser abordada como um instrumento de simplificação de cálculo, constituindo uma alternativa para a baixa frequência de sistematização e coleta de dados, tornando a produção de índices mais econômica, possibilitando frequentes e simultâneas atualizações em diferentes áreas;
- II. Auxilia em contextos com abundância de dados provenientes de diferentes fontes, através do estudo de interação e equivalência entre variáveis, simplificando o modelo e o planejamento do mapa em diferentes cidades;
- III. Indica a possibilidade de substituição de dados ausentes em contextos específicos por outros de correlação equivalente em relação ao índice;
- IV. O “*Mapa Síntese*” pode ser utilizado como instrumento para gestão urbana, aplicado na cidade como um todo, e em áreas específicas da cidade, auxiliando no planejamento de políticas públicas utilizando, como fonte de dados, as variáveis determinantes para o fenômeno, segundo o modelo estatístico utilizado.
- V. Em última instância, a síntese de variáveis pode ser encarada como uma análise estatística dos indicadores, possibilitando a detecção de correlações e multicorrelações entre indicadores e índices compostos ao longo da estrutura de composição do índice de exclusão/inclusão social.

O “*Mapa Síntese*” pode ser um instrumento potencial para um melhor acompanhamento da movimentação dos índices expressos no território. Ele pode auxiliar não apenas o planejamento, mas também o monitoramento dos resultados de políticas e intervenções no espaço urbano. Pode-se verificar, após um intervalo de tempo, se uma determinada variável deixa de ser um fator significativo para a produção da exclusão/inclusão social, tornando-se estatisticamente não significativa.

A matriz de correlação (**Tabela 1**) fornece os coeficientes de correlação dos índices em relação a Exclusão/Inclusão Social.

TABELA 1 – MATRIZ DE CORRELAÇÃO DOS ÍNDICES COMPONENTES DA EXCLUSÃO/INCLUSÃO SOCIAL EM RELAÇÃO AO ÍNDICE DE EXCLUSÃO/INCLUSÃO SOCIAL

Matriz de Correlação dos Índices componentes da Exclusão/Inclusão Social em relação ao Índice de Exclusão/Inclusão Social														
As correlações em destaque preto são as mais significativas e em vermelho as menos significativas com $p < ,05000$ / Para N = 342														
	DREnd %	DEduc %	ATard %	APrec%	Long%	DHab%	PopImp%	HabImp%	AAPrec%	ISPrec%	PTLixo%	Manalf%	MChf%	lex (i)
DREnd%	1,000	0,946	-0,449	0,672	0,202	0,375	0,052	0,054	-0,138	-0,402	-0,236	-0,722	-0,112	0,903
DEduc%	0,946	1,000	-0,519	0,677	0,271	0,472	0,047	0,045	-0,172	-0,456	-0,283	-0,782	-0,021	0,935
ATard %	-0,449	-0,519	1,000	-0,455	-0,152	-0,339	-0,034	-0,024	0,145	0,531	0,462	0,524	0,080	-0,565
APrec%	0,672	0,677	-0,455	1,000	0,340	0,251	0,084	0,101	-0,164	-0,432	-0,332	-0,459	0,110	0,729
Long%	0,202	0,271	-0,152	0,340	1,000	0,509	0,153	0,108	-0,151	-0,269	-0,158	-0,209	0,581	0,383
DHab%	0,375	0,472	-0,339	0,251	0,509	1,000	0,138	0,101	-0,207	-0,415	-0,198	-0,415	0,317	0,607
PopImp%	0,052	0,047	-0,034	0,084	0,153	0,138	1,000	0,916	-0,050	-0,049	-0,066	-0,034	0,074	0,079
HabImp%	0,054	0,045	-0,024	0,101	0,108	0,101	0,916	1,000	-0,038	-0,042	-0,071	-0,042	0,046	0,070
AAPrec%	-0,138	-0,172	0,145	-0,164	-0,151	-0,207	-0,050	-0,038	1,000	0,358	0,271	0,093	-0,138	-0,373
ISPrec%	-0,402	-0,456	0,531	-0,432	-0,269	-0,415	-0,049	-0,042	0,358	1,000	0,471	0,358	-0,048	-0,646
PTLixo%	-0,236	-0,283	0,462	-0,332	-0,158	-0,198	-0,066	-0,071	0,271	0,471	1,000	0,301	-0,143	-0,411
Manalf%	-0,722	-0,782	0,524	-0,459	-0,209	-0,415	-0,034	-0,042	0,093	0,358	0,301	1,000	0,044	-0,725
MChf%	-0,112	-0,021	0,080	0,110	0,581	0,317	0,074	0,046	-0,138	-0,048	-0,143	0,044	1,000	0,083
lex (i)	0,903	0,935	-0,565	0,729	0,383	0,607	0,079	0,070	-0,373	-0,646	-0,411	-0,725	0,083	1,000
Classific:	2	1	7	3	9	6	12	13	10	5	8	4	11	

Os índices de DEduc e DREnd são os que possuem as maiores correlações com o índice de exclusão/inclusão social, seguidos dos índices APrec, MAnalf, ISPrec, DHab, ATard, PTLixo, Long, AAPrec, MChF, PopImp e HabImp.

Os índices APrec, MAnalf e ATard, embora tenham alta correlação com o índice de exclusão/inclusão social, são correlacionados com o DEduc, indicando que, provavelmente, a manutenção de apenas um destes índices no modelo seja suficiente para representar o fenômeno estudado, bem como garantir a integridade do modelo.

Os índices de ISPrec, DHab, AAPrec e PTLixo possuem correlação significativa em relação ao índice de exclusão/inclusão social, sendo o índice referente a Esgoto o de maior correlação. Importante notar que, embora os quatro índices citados tenham correlação significativa, esta é menor em relação a correlação dos índices analisados no item II.

PopImp e HabImp permanecem com baixa correlação em relação ao índice de exclusão/inclusão social e altamente correlacionadas entre si. Long permanece com baixa correlação em relação ao índice de exclusão/inclusão social e aos demais índices.

O índice de MChF apresenta correlação não significativa em relação ao índice final, o que pode ser um indicador de que esta variável não consiste em um bom parâmetro para o modelo de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos.

O modelo de regressão múltipla utilizado (**Tabela 2**) contém, como variáveis independentes, todos os índices internos às utopias em relação ao índice de exclusão/inclusão social, variável dependente:

TABELA 2 – SUMÁRIO DE REGRESSÃO PARA O MODELO CONSIDERADO

Sumário de Regressão: Variável Dependente = lex (i)				
R = 0,997797 R ² = 0,995598 R ² (Ajustado) = 0,995424				
F(13,328) = 5706,5 / p<0,0000 / Erro Padrão Estimado = 0,02518				
	Betas (b)	Desvio Padrão de b	t = b / σ(b) t(337)	p-valor
Intercepto (b0)	-0,027156	0,010716	-2,534111	0,011738
DRend%	0,003363	0,000108	31,042515	0,000000
DEduc%	0,003180	0,000152	20,874090	0,000000
ATard %	-0,000127	0,000771	-0,164777	0,869221
APrec%	0,003299	0,000172	19,226725	0,000000
Long%	0,002954	0,001151	2,566341	0,010721
DHab%	0,003001	0,000088	34,037526	0,000000
PopImp%	0,002836	0,006041	0,469398	0,639097
HabImp%	-0,008244	0,004983	-1,654631	0,098956
AAPrec%	-0,002872	0,000082	-35,103246	0,000000
ISPrec%	-0,002233	0,000072	-31,048858	0,000000
PTLixo%	-0,002513	0,000249	-10,083168	0,000000
Manalf%	-0,000305	0,000202	-1,511738	0,131563
MChf%	0,001379	0,000276	4,991874	0,000001

A análise de regressão indicou como variáveis não significativas ($t < 1,96$) para o modelo, ATard, PopImp, HabImp e MAnalf. A síntese simultânea destas variáveis é testada no modelo de regressão, denominado síntese, a seguir (Tabela 3):

TABELA 3 – SUMÁRIO DE REGRESSÃO PARA O MODELO SÍNTESE

Sumario de Regressão: Variável Dependente = lex_Revisto (i)				
/ R = 0,99771693 / R ² = 0,99543906 / R ² (Ajustado) = 0,99531542				
F(9,332) = 8051,1 / p<0,0000 / Erro Padrão Estimado = 0,02548				
	Betas (b)	Desvio Padrão de b	t = b / σ(b) t(337)	p-valor
Intercepto (b0)	-0,033186	0,010176	-3,261335	0,001224
DRend%	0,003335	0,000108	30,922329	0,000000
DEduc%	0,003312	0,000139	23,798276	0,000000
APrec%	0,003221	0,000168	19,189822	0,000000
Long%	0,002886	0,001156	2,496446	0,013029
DHab%	0,002992	0,000088	33,983223	0,000000
AAPrec%	-0,002856	0,000082	-34,759628	0,000000
ISPrec%	-0,002240	0,000070	-31,798947	0,000000
PTLixo%	-0,002557	0,000239	-10,703300	0,000000
MChf%	0,001359	0,000273	4,973869	0,000001

O teste β_0 para exclusão simultânea das variáveis diagnosticadas como não significativas teve por hipóteses:

$$H_0: \beta_{(D10_{14R} \cup POP_{IMPR} \cup HAB_{IMPR} \cup MANALFR)} = 0$$

$$H_1: \beta_{(D10_{14R} \cup POP_{IMPR} \cup HAB_{IMPR} \cup MANALFR)} \neq 0$$

$$SSE(F) = 0,216832$$

$$SSE(R-4) = 0,220992$$

$$F^* = 1,5780$$

$$F_{(4; 342; 0,95)} = 2,37$$

Como $F^* < F_{(4; 342; 0,95)}$, aceita-se H_0 e os quatro índices podem ser retirados simultaneamente sem prejudicar o modelo. A alta correlação entre os índices ATard e MAnalf com o DEduc, bem como a baixa correlação entre os índices PopImp e HabImp com o índice de exclusão/inclusão, são as possíveis justificativas para este resultado.

Devido à baixa correlação do índice de Longevidade com o índice de exclusão/inclusão social (0,383), sua síntese do modelo é testada mesmo sendo diagnosticada como significativa pela regressão ($t > 1,96$). Tendo como hipóteses $H_0: \beta_{Long} = 0$ e $H_1: \beta_{Long} \neq 0$ e como parâmetro $t_{Long} = 2,496$ tem-se, pela tabela normal (Neter et al., 1996), o limiar de aceitação de 1,96 à 97,5% de confiança, rejeitando-se H_0 . Entretanto, a 99,3% de confiança o limiar aumenta para 2,50 aceitando-se H_0 .

Apesar do coeficiente de regressão múltipla (r) para o índice de Longevidade ser estatisticamente significativo, a aproximadamente 99% de confiança ele deixa de ser. Desta forma, a retirada da variável Longevidade não provoca alterações significativas no modelo, o que é constatado através da variação irrelevante do (r) de 0,9977 para 0,9976, confirmando esta possibilidade.

Portanto, a equação de regressão estimada para o índice de Exclusão/Inclusão Social após a síntese de variáveis foi:

$$I_{ex_{síntese}} = -0,037364 + 0,0033375*(DRend) + 0,0033058*(DEduc) + 0,0033075*(APrec) + 0,0030601*(DHab) - 0,002851*(AAPrec) - 0,002253*(ISPrec) - 0,00251*(PTLixo) + 0,001699*(MChF)$$

A substituição dos valores de cada índice, para cada um dos 342 setores censitários, na equação acima, resultará em um novo valor para o índice de Exclusão/Inclusão Social para cada setor censitário, este índice é denominado síntese e sua espacialização produz o denominado “*Mapa Síntese*”.

A Figura 3 mostra a coerência das análises e das variáveis sintetizadas, visto que não há diferenças extremas no diagnóstico da exclusão/inclusão social, mantendo concentração de inclusão social nas áreas centrais e de exclusão social nas áreas periféricas da cidade. Portanto, a semelhança presente entre o “*Mapa Síntese*”, calculado pela substituição de parâmetros na equação de regressão, e o mapa derivado do índice completo, valida as equações de regressão como instrumento para estimar a exclusão/inclusão social síntese, comprovando a influência determinante de variáveis específicas.

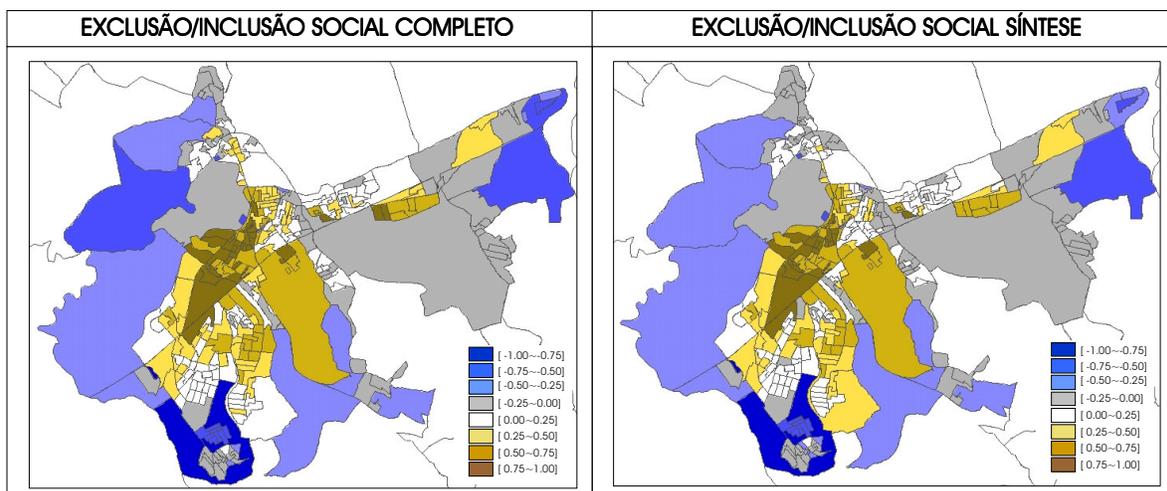


Figura 3 – Espacialização dos índices de exclusão/inclusão social completo e síntese.

A semelhança do “*Mapa Síntese*” com o Completo é um forte indicativo de coerência do índice gerado, entretanto as modificações numéricas realizadas sobre o índice completo podem causar mudanças no relacionamento espacial dos dados quando analisados no território. A dependência espacial é uma característica intrínseca aos dados espaciais (Câmara et. al., 2001). Sendo assim para a validação completa do “*Mapa Síntese*” é necessária uma análise comparativa dos índices de autocorrelação espacial global e local para os mapas completo e “*síntese*”. A manutenção dos *clusters* de exclusão/inclusão social constitui um indicador da coerência do “*Mapa Síntese*”, evidenciando que variáveis significativas exercem influência predominante no processo de exclusão/inclusão social em São José dos Campos.

3.1 – Análise comparativa dos padrões espaciais de exclusão/inclusão social obtidos para os índices completo e “*síntese*”

A aplicação de técnicas de análise espacial aos índices completo e “*síntese*” tem como objetivo verificar se a presença de regimes espaciais de exclusão/inclusão social mantém-se espacialmente coerente após a redução de variáveis para a cidade estudada. A Figura 4 apresenta os resultados da aplicação dos índices de autocorrelação espacial Global de Moran (IGM), Diagrama de Espalhamento de Moran (DEM), Média Móvel (MMo) e *Moran Map* (MM) aos índices estudados (Anselin, 1995; Bailey & Gatrell, 1995; Câmara et al., 2000; Fisher et al., 1996).

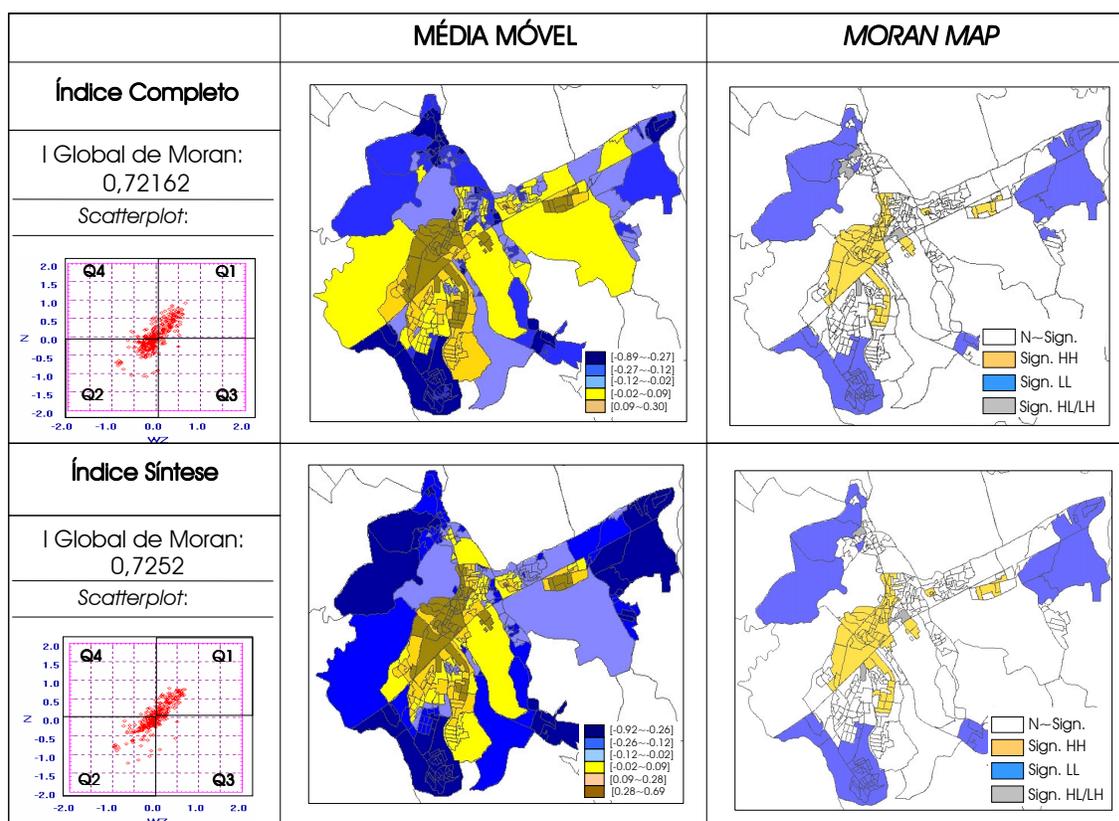


Figura 4 - Mapas derivados dos índices de autocorrelação espacial.

Verifica-se que os IGM⁷ para os índices de exclusão/inclusão social completo e “*síntese*” indicam a presença de regimes espaciais definidos na cidade variando entre 0,7216 e 0,7252, dado que evidencia o espaço como variável condicionante na produção das desigualdades sociais.

Embora o IGM promova a detecção de similaridades, tendo como princípio a hipótese nula de aleatoriedade espacial, seu cômputo possui como referência a cidade, fato que pode tornar regimes espaciais locais inexpressivos (Câmara et al., 2000; Fisher et al., 1996). Tais premissas apontam para a necessidade de refinamento da análise a partir dos resultados provenientes dos índices de associação espacial local (LISA), apresentados a seguir, tendo por hipótese investigar se a estacionariedade verifica-se, ou não, localmente.

A MMo apresenta uma suavização dos dados indicando tendências de localização da exclusão/inclusão social semelhantes para os índices completo e “*síntese*”, promovendo uma clara definição da desigualdade existente entre centro/periferia através da redução da descontinuidade espacial existente nos dados.

O DEM interpreta o Índice Local de Moran (ILM) como um coeficiente de regressão (β_0) resultante de uma relação estatística que considera o desvio do setor observado em relação à média global (Z_i)⁸ e a média dos setores vizinhos (WZ_i)⁹, classificando a variabilidade espacial em quatro quadrantes: Q1 dotado de valores e médias positivos denominado *High-High (HH)*; Q2 dotado de valores e médias negativos denominado *Low-Low (LL)*; Q3 dotado de valores positivos e médias negativas denominado *High-Low (HL)* e Q4 dotado de valores negativos e médias positivas denominado *Low-High (LH)*. Os resultados obtidos para a função de regressão de Z_i em WZ_i , para os índices completo e “*síntese*”, possuem a mesma tendência de variação, ou seja retas de regressão semelhantes, refletindo uma alta correlação entre estes dois parâmetros (Z_i e WZ_i) visível no DEM o qual apresenta maior concentração de setores nos quadrantes 1 (*HH*) e 2 (*LL*) caracterizando regimes espaciais bem definidos de exclusão/inclusão social.

O MM, espacializa somente os dados considerados estatisticamente significativos classificados segundo os quatro quadrantes do DEM. Os resultados confirmam a presença de *clusters* significativos de exclusão/inclusão social (*HH*, *LL*, *HL/LH*) em locais específicos da cidade, repetindo-se como um padrão para o índice completo e para o “*índice síntese*”. Estes resultados validam a geração de “*índices síntese*” e conseqüentemente de “*Mapas Síntese*”, disponibilizando mais um instrumento para a análise e para o planejamento de políticas públicas.

4 – Indicadores socioespaciais e fragmentação urbana: detecção de prioridades locais

A possibilidade de detecção de diferenças, internas às tendências “globais” da cidade, através da síntese de variáveis em fragmentos urbanos é a hipótese testada ao longo dos experimentos desenvolvidos neste item. A proximidade do território, ou seja, dos diferentes

⁷ Quanto mais próximo de 1 estiver o IGM maior a presença de dependência espacial.

⁸ Z_i refere-se ao desvio do valor observado para o índice de exclusão/inclusão social no setor em relação à média global do índice na cidade.

⁹ WZ_i refere-se à média dos vizinhos em relação à Z_i .

“locais” da cidade, é realizada a partir da definição dos denominados fragmentos urbanos (Genovez, 2002; Genovez, et al. 2003). Estes fragmentos, extraídos do total de setores censitários componentes da cidade, correspondem a conjuntos de setores agrupados segundo sua característica predominante, exclusão, inclusão social ou transição entre a exclusão/inclusão social.

A fragmentação da cidade nestas áreas aparentemente homogêneas, tem como objetivo investigar prioridades “locais”, ou seja demandas internas diferenciadas, a serem alvo de futuras intervenções. A detecção destas prioridades tem como principal hipótese a suposição de que as variáveis estatisticamente significativas, ou seja, determinantes para a exclusão/inclusão social variam em função de características “locais” presentes nos diferentes fragmentos urbanos. Neste sentido, a fragmentação do território urbano para análise de indicadores socioespaciais constitui uma especialização dos experimentos realizados anteriormente aplicados em regiões específicas da cidade.

Para investigar tal hipótese desenvolveu-se um método para a detecção dos fragmentos urbanos relevantes para a análise. Neste método, os fragmentos são espacialmente diferenciados e detectados: (a) em função das “diferenças” entre os valores dos índices na cidade, indicando fragmentos de exclusão, de inclusão social e de transição, e; (b) da “similaridade” existente entre índices com valores semelhantes e espacialmente próximos, que determinam a forma e a extensão dos fragmentos, ou *clusters* exclusão/inclusão social, internos à cidade (Haesbaert, 2000).

A utilização de técnicas de análise espacial apresenta o potencial para identificar estas “diferenças” e “similaridades”, através da aplicação e análise de medidas de autocorrelação espacial global e local, fornecendo a delimitação de *clusters* de exclusão/inclusão social significativos para a cidade.

Neste contexto um fragmento urbano é definido como um conjunto de setores censitários dotados de 2 características essenciais possíveis:

1. Presença de alta correlação espacial positiva entre os setores censitários, caracterizando regimes espaciais definidos correspondentes a *clusters* de exclusão ou de inclusão social.
2. Presença de correlação espacial negativa entre os setores censitários, caracterizando reduzida dependência espacial correspondente a áreas de transição entre regimes espaciais de exclusão/inclusão social definidos.

Matematicamente um fragmento urbano pode ser equacionado como:

$$F_{(\text{região } j)} = \sum_{i=1}^{n_j} S_i$$

Onde:

$F_{(\text{região } j)}$ = Fragmento Urbano referente à Região j

S_i = Índice de exclusão/inclusão social do setor censitário i; onde $i = [1, \dots, n_j]$

n_j = número de setores censitários contidos no Fragmento ($F_{(\text{região } j)}$)

As análises abrangem fragmentos com regimes espaciais definidos (item 1) juntamente com áreas de transição entre regimes espaciais (item 2) possibilitando investigar, comparativamente, o comportamento estatístico das variáveis em diferentes contextos. A Figura 5 apresenta a análise do *Moran Map*, principal parâmetro considerado no método para a definição de fragmentos urbanos.

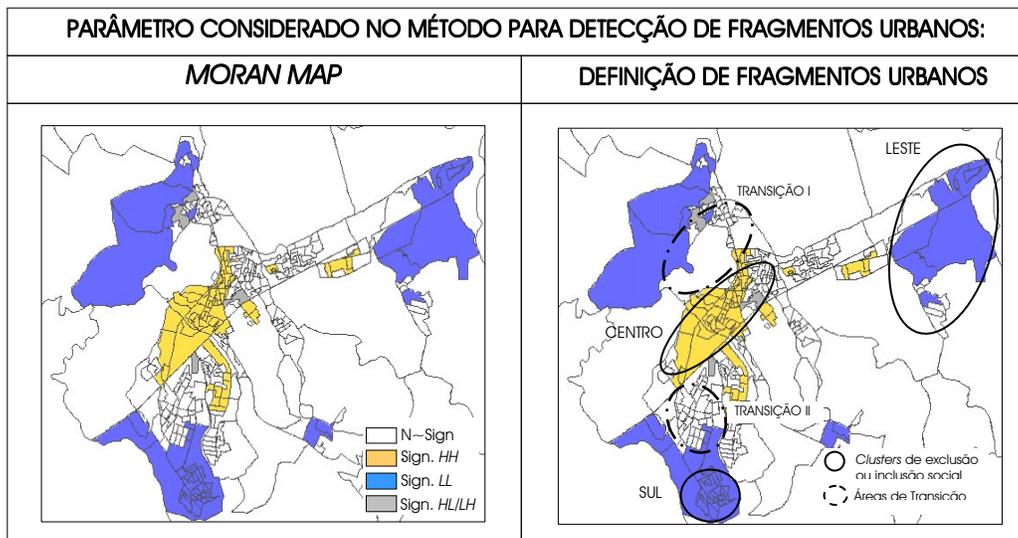


Figura 5– Interpretação do *Moran Map*, principal parâmetro considerado no método para definição de fragmentos urbanos.

A observação do *Moran Map* para o índice de exclusão/inclusão social completo evidencia *clusters* de exclusão/inclusão social significativos e áreas de transição. A partir destes resultados foram escolhidos 5 fragmentos teste de interesse para a investigação estatística, dotados de “diferenças” entre si e de “similaridades” internas, descritas a seguir: 1) O fragmento Sul, caracteristicamente dotado de alta correlação espacial positiva, delimitando regime espacial de exclusão social definido. 2) O fragmento Central, dotado de autocorrelação espacial positiva, delimitando regime espacial de inclusão social definido. 3) O fragmento Leste, dotado de autocorrelação espacial positiva, delimitando regime espacial onde predomina exclusão social. 4) Dois fragmentos de transição (I e II) localizados entre regimes espaciais definidos, dotados de autocorrelação espacial negativa.

A partir da definição dos fragmentos urbanos, foram calculados os “índices síntese” correspondentes à cada fragmento urbano, a fim de investigar se as variáveis estatisticamente significativas para a exclusão/inclusão social variam ou não em função de características de cada fragmento urbano. O modelo de regressão utilizado para a síntese de variáveis nos fragmentos é idêntico ao utilizado para a cidade, variando apenas a quantidade e a localização dos setores censitários. A Figura 6 contém o fluxograma síntese dos procedimentos utilizados para a definição e análise dos 5 fragmentos urbanos selecionados.

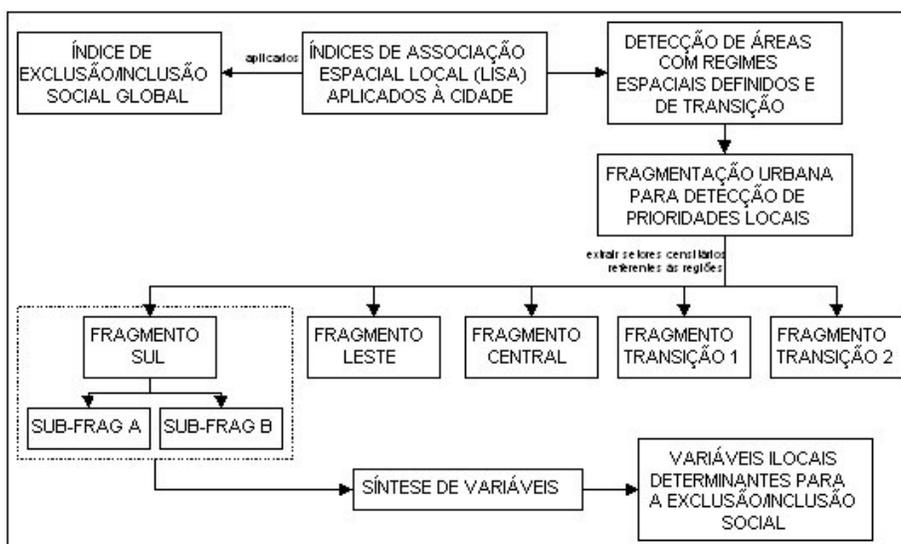


Figura 6 - Definição de fragmentos urbanos: procedimentos e resultados esperados.

Como exemplo, a semelhança obtida entre os mapas completo e “*síntese*” referentes ao fragmento sul, apresentados na Figura 7, valida a produção de “*índices síntese*” para os fragmentos urbanos. A Média Móvel, calculada para o “*índice síntese*”, consegue captar diferenças internas ao fragmento sul, evidenciando uma tendência espacial de maior exclusão social (médias mais negativas), na porção norte do fragmento e de menor exclusão (médias menos negativas), na porção sul do fragmento. Este resultado traz, como dado adicional, que embora os mapas completo e “*síntese*” sejam semelhantes, os índices que cada um contém são diferentes, este resultado permite ir além da localização de áreas dotadas de maior ou menor exclusão/inclusão social, permite identificar os índices que estão mais relacionados ao fenômeno em cada fragmento analisado.

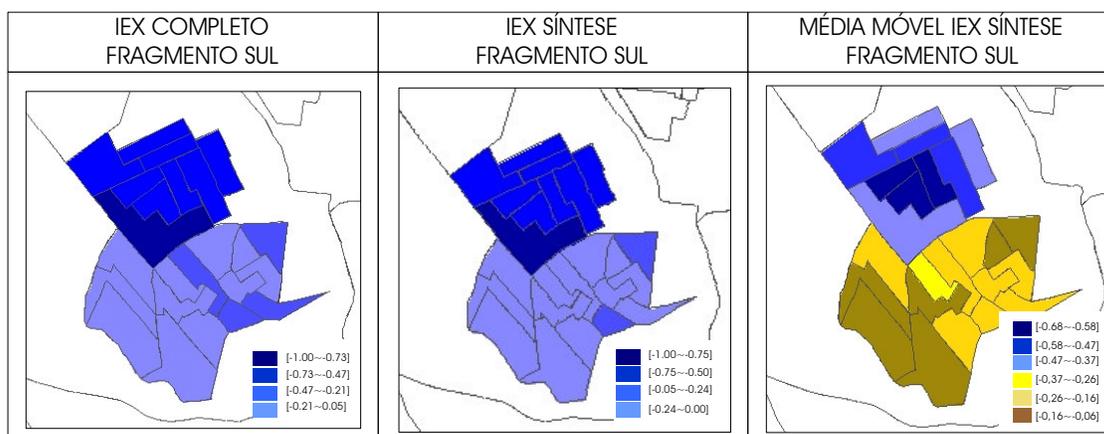


Figura 7 – Espacialização do índice de exclusão/inclusão social completo, “*síntese*” e média móvel referente ao índice de exclusão/inclusão social “*síntese*”.

Estes resultados são evidências de que abordagens realizadas a partir da fragmentação do território urbano, podem identificar, com sensibilidade diferenciada, as heterogeneidades internas à cidade. A utilização destes resultados pode permitir aos gestores direcionar

recursos e serviços estrategicamente, localizando os fragmentos dotados de maior carência, discriminando as prioridades locais de investimentos e contribuindo para formulação de políticas públicas continuadas que sejam constantemente monitoradas e modificadas em função do desenvolvimento das características locais.

5 - Análise comparativa dos resultados obtidos após a síntese de variáveis para a cidade e para os fragmentos urbanos

A recorrência das variáveis significativas para o processo de exclusão/inclusão social na cidade e nos fragmentos evidencia uma relação entre o diagnóstico “global” e o “local”. Entretanto, o estudo particular dos fragmentos mostra que embora estas variáveis sejam semelhantes seu comportamento não é o mesmo e a análise espacial dos fragmentos fornece constatações destas diferenças. O Quadro 2 apresenta a relação das variáveis selecionadas como significativas pelos modelos de regressão nas diferentes áreas de abordagens.

QUADRO 2 – VARIÁVEIS DIAGNOSTICADAS COMO SIGNIFICATIVAS PARA A CIDADE E PARA OS FRAGMENTOS URBANOS ANALISADOS

Abordagens		Variáveis Estatisticamente Significativas	Regime Espacial
“Global”	Cidade	DRend, DEduc, Aprec, DHab, Água, Esgoto, Lixo e MChF	exclusão/inclusão social
“Local”	Fragmento Sul	DRend, DEduc, Aprec, DHab, Água, Esgoto, Lixo	exclusão social
	Fragmento Leste	DRend, DEduc, Aprec, DHab, Água, Esgoto	exclusão/inclusão social
	Fragmento Central	DRend, DEduc, Aprec, DHab	inclusão social
	Fragmento Transição I	DRend, DEduc, Aprec, DHab, Esgoto	Transição
	Fragmento Transição II	DRend, DEduc, Aprec, DHab	Transição

A diferença entre as variáveis selecionadas como significativas, ao longo dos fragmentos, evidenciou que a distribuição espacial das desigualdades sociais não se polariza uniformemente no sentido centro-periferia, mas heterogeneamente, sendo dotada de demandas internas diferenciadas para cada fragmento. Este resultado enfatiza a necessidade de ações políticas que considerem estas diferenças. Comparando-se os resultados obtidos para os fragmentos às análises obtidas para a cidade, constatou-se uma maior síntese de variáveis consideradas como não significativas nos fragmentos, tornando-se um indicativo de que a fragmentação urbana revela, também, maior especificidade das variáveis determinantes da exclusão/inclusão social.

Importante notar que, embora as variáveis determinantes ao fenômeno tenham variado ao longo dos diferentes fragmentos, algumas prevaleceram em todas as análises, como distribuição de renda, desenvolvimento educacional, alfabetização precoce e densidade habitacional. Para os fragmentos urbanos, da mesma forma que para a cidade, constatou-se que as variáveis mais correlacionadas a exclusão/inclusão social são Distribuição de Renda (DRend) e Desenvolvimento Educacional (DEduc), que estavam também altamente correlacionadas entre si.

A **Tabela 4** apresenta uma análise das correlações simples, dos IGM e dos coeficientes de determinação múltipla (r) para a cidade e para os fragmentos considerando, alternadamente, DEduc e DRend em relação ao índices de exclusão/inclusão social.

TABELA 4 – ANÁLISE COMPARATIVA DA RELEVÂNCIA DAS VARIÁVEIS DREND E DEDUC PARA OS MODELOS ANALISADOS¹⁰

Áreas de Abordagem:	Correl. Des_ Educ c/ lex	Correl. Renda c/ lex	IGM (com Des_ Educ)	IGM (com Des_ Educ)	(r) com Des_ Educ	(r) com Renda	Regime Espacial
Cidade Sint.	0,935	0,903	0,7304	0,7178	0,991	0,995	Excl./inclusão social
Fragmento Sul Sint.	0,891	0,702	0,7747	0,7478	0,99	0,997	exclusão social
Fragmento Leste Sint.	0,662	0,574	0,5592	0,5507	0,99	0,99	Excl./inclusão social
Fragmento Central Sint.	0,863	0,841	0,7828	0,7757	0,982	0,98	inclusão social
Frag. Transição I Sint.	0,966	0,901	0,2012	0,1689	0,994	0,994	Transição
Frag. Transição II Sint.	0,918	0,907	0,7203	0,6634	0,945	0,96	Transição

Constatou-se que os valores obtidos para as correlações simples e para os IGM são maiores para a variável DEduc. Os coeficientes de determinação múltipla (r) mantiveram-se praticamente iguais confirmando que DRend e DEduc são equivalentes e inserem informações semelhantes no modelo, conseqüentemente a retirada de uma delas não provoca alterações significativas nos coeficientes. Portanto, as tendências “globais” e “locais” da cidade indicam que renda e educação são determinantes da exclusão/inclusão social, embora educação possua maior ou igual relação com a exclusão/inclusão.

Importante destacar que embora o DEduc em 1991 tenha sido a variável mais significativa em todas as análises ela não apresenta comportamento “homogêneo”. A Figura 8 apresenta a variação dos coeficientes de correlação simples entre o índice de exclusão/inclusão social Síntese e o DEduc para todos os fragmentos analisados.

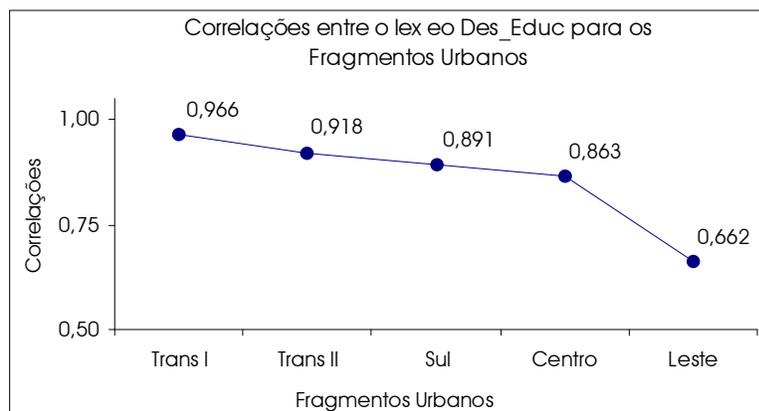


Figura 8 – Análise comparativa entre as correlações para o Desenvolvimento Educacional em relação ao lex para os fragmentos urbanos.

Os fragmentos de Transição I e II, caracteristicamente localizados entre regimes espaciais de exclusão e de inclusão social, apresentaram as maiores correlações com índice de DEduc (0,966 e 0,918). Este resultado mostra a importância da variável educação para estes fragmentos que ainda não se estabeleceram acima ou abaixo da Linha de Referência de Inclusão (LRI) evidenciando, a fragilidade destas áreas em relação a futuras políticas públicas a serem adotadas na região.

Seqüencialmente, a terceira maior correlação obtida localiza-se no fragmento Sul (0,891), caracteristicamente de exclusão social, e a quarta maior no fragmento Central (0,863),

¹⁰ Síntese (Sint.); Fragmento (Frag.) e Exclusão (Excl.)

caracteristicamente de inclusão social. Estes dados representam mais uma constatação de que a educação é altamente determinante tanto para a manutenção da exclusão quanto da inclusão social.

O fragmento Leste apresentou a menor correlação do DEduc (0,662) em relação aos demais fragmentos, provavelmente por localizar-se ao redor da LRI, sendo composto por valores medianos de exclusão/inclusão social, dados que sugerem a possibilidade da fragilidade desta região estar ligada, também, à outras variáveis.

Portanto, a síntese dos indicadores intra-urbanos de exclusão/inclusão social na cidade e nos fragmentos urbanos revelou que as variáveis determinantes ao fenômeno são recorrentes em regimes espaciais de exclusão, de inclusão social e de transição salvo algumas diferenças, ou seja, o que exclui é o que inclui no espaço urbano em São José dos Campos enfatizando a abordagem teórica da exclusão/inclusão social como uma relação (Sposati, 1996). Esta relação apresentou como variável mais significativa em seu comportamento socioespacial em 1991 o Desenvolvimento Educacional, constatação que sugere repensar a prioridade dada à pobreza, entendida como sinônimo de renda, como fator principal na produção das desigualdades socioterritoriais (Maxwell, 1999; Koga, 2001).

Portanto, a utilização de técnicas de estatística multivariada e estatística espacial para a detecção de variáveis determinantes ao fenômeno, enquanto método desenvolvido em São José dos Campos, traz elementos para a compreensão da exclusão/inclusão social e de suas múltiplas dimensões. A influência predominante da variável relacionada à educação em relação às demais coloca a necessidade de políticas públicas que se voltem para o território expandindo e não reduzindo a complexidade do fenômeno à pobreza como ponto de partida para o planejamento de ações políticas efetivas. Portanto, pode-se aumentar a sensibilidade do índice através de sua fragmentação, trazendo à tona as necessidades prioritárias globais e locais da cidade. Desta forma, o contraponto à idéia de *síntese* é a expansão da capacidade analítica para a escala da cidade a partir da *síntese* de variáveis presentes em seu universo.

6 - Conclusões

A proposta do uso combinado de diversos métodos para a análise de indicadores, aliada ao tratamento geográfico dos dados, evidenciou potencialidades até então escondidas nas medidas tabuladas. Os resultados apresentados podem tornar-se um instrumento voltado para apoiar o planejamento de políticas públicas, que considerem, na medida do possível, as diferenças internas presentes no espaço urbano. A integração dos diferentes resultados produzidos permite diferentes formas de leitura, articulando a detecção de prioridades “globais” e “locais” referentes à exclusão social nos diferentes territórios que compõe a cidade. A Figura 9 apresenta uma compilação destas possibilidades de uso e integração dos diferentes resultados produzidos neste artigo, como auxílio ao planejamento e direcionamento de políticas públicas no espaço intra-urbano.

Portanto, a utilização integrada de GIS, GDB e SA mostrou significativa contribuição no armazenamento, análise e produção de dados diversos, úteis ao planejamento de políticas públicas mais adequadas e próximas à realidade das diferentes áreas de intervenção. Afinal,

governar a favor da inclusão social é governar através das diferenças (Bava, 2001), ou seja, das particularidades de cada região, conhecer estas diferenças é fundamental para a redução dos desequilíbrios e conseqüente redução das desigualdades socioterritoriais. Afinal, como ensina Milton Santos (2001), o fenômeno urbano não pode ser estudado alheio ao território, as cidades possuem dinâmicas espaciais que se concretizam no território e através dele, desconsiderar esta diversidade é negar a existência dos diferentes territórios que compõe uma cidade. O território é social (Santos, 1979) sendo, na sua essência, dado essencial sobre a condição da vida cotidiana (Santos, 2000).

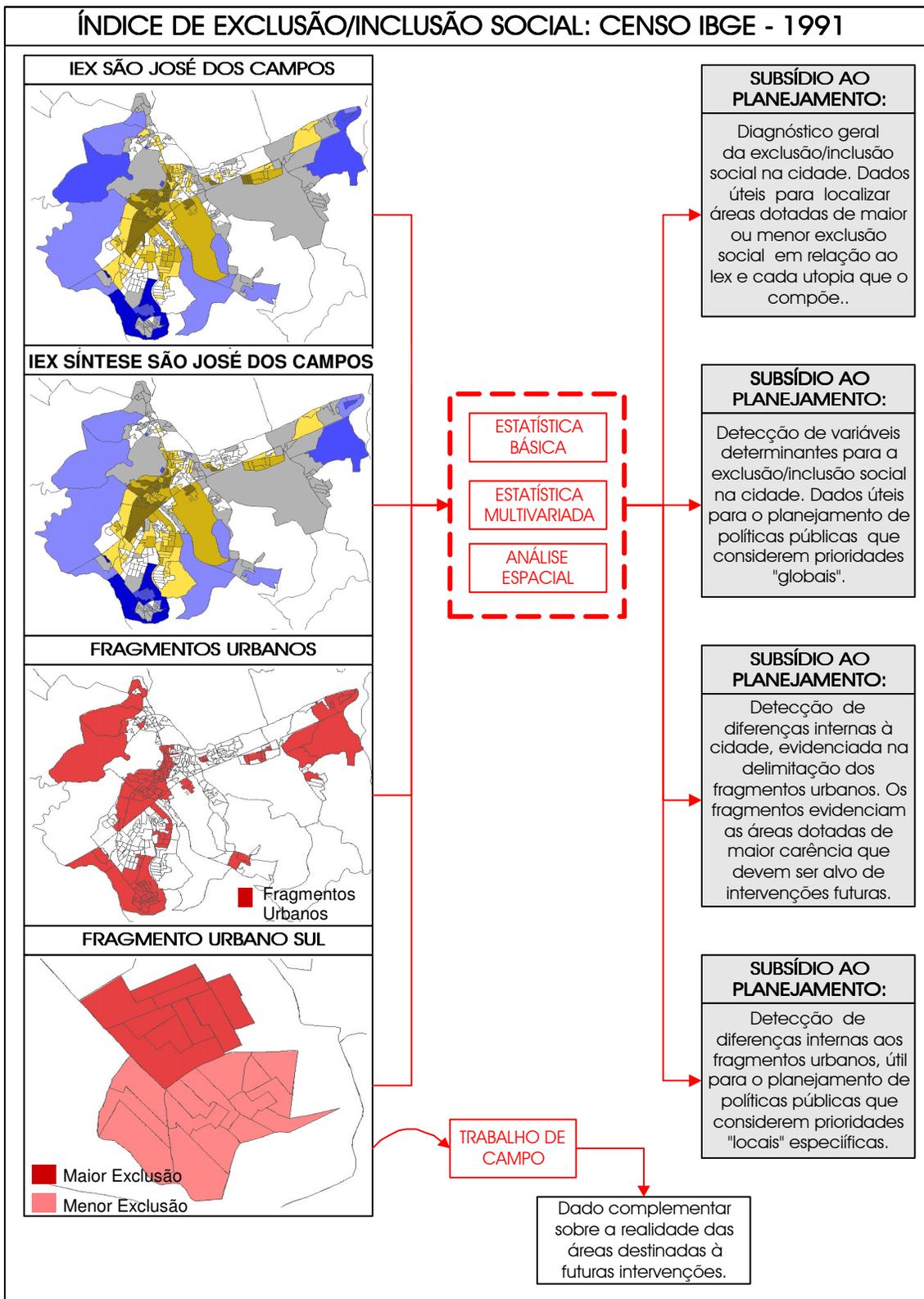


Figura 9 - Possibilidades de uso e integração dos diferentes resultados produzidos, como auxílio ao planejamento e direcionamento de políticas públicas.

Referências Bibliográficas:

- Anselin, L. "Local indicators of spatial association - LISA." *Geographical Analysis*, 27: 91-115, 1995.
- Bailey, T.; Gatrell, A.C., *Interactive Spatial Data Analysis.*, Longman Group Limited, England, 1995.
- Bava, S. C. A reapropriação das cidades: A democratização e a descentralização das cidade são uma resposta à crise de governabilidade que o predomino da lógica de mercado impôs aos governos e à sociedade. *Cadernos Le Monde Diplomatique*, janeiro de 2001.
- Câmara, G.; Monteiro, M.; Ramos, F.; Sposati, A.; Koga, D. "*Mapping Social Exclusion/Inclusion in Developing Countries: Social Dynamics of São Paulo in the 1990s*". São José dos Campos, DPI/INPE, 2001.
- Câmara, G.; Monteiro, A. M.; Carvalho, M. "*Análise Espacial e Geoprocessamento*" Curso on-line, INPE, 2000.
- Chatterjee, S.; Price, B. *Regression Analysis by Example*. John Wiley e Sons, New York, 1977.
- Fisher, M.; Scholten, H.; Unkin, D. *Spatial Analytica Perspectives on GIS*, Taylor & Francis, Londres, Cap. 8, 1996.
- Fundo das Nações Unidas para a População (FNUPA). "*A situação da população mundial*", New York, 1999.
- Genovez, P; Monteiro M.; Câmara G.; Freitas C. Medidas Territoriais de desigualdade social: análise espacial da dinâmica de exclusão/inclusão social em São José dos Campos - SP (1991-2000). *Anais*, Gis Brasil, São Paulo, 2003.
- Genovez, P. Território e desigualdades: análise espacial intra-urbana no estudo da dinâmica de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos. *Dissertação* INPE (código-12177-TDI/973) - 220 pg., São José dos Campos- SP, 2002.
- Genovez, P; Monteiro M.; Câmara G.; Freitas C.. Diagnóstico das Áreas de Exclusão/Inclusão Social através de Sistema de Informação Geográfica na Área Urbana de São José dos Campos - SP. *Anais*, X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2001.
- Haesbaert, R. *Região, diversidade territorial e globalização*. Universidade Federal Fluminense
- IBGE. "*Censo Demográfico São José dos Campos*", São Paulo, 1991.

- Koga, D. Cidades Territorializadas entre enclaves e potências. *Tese de Doutorado* PUC São Paulo, 2001.
- Maxwell, S. The Meaning and Measurement of Poverty, *Poverty Briefing*, Vol 3, Fev. 1999.
- Neter, J. e Wasserman W. *Applied Linear Statistical Models*. Irwin-Dorsey Limited, Georgetown, 1974
- Rolnik, R.; Nakano, K. ‘Velhas questões, novos desafios’. *Cadernos Le Monde Diplomatique*, janeiro de 2001.
- Santos, M & Silveira, M. L. “*O Brasil: território e sociedade no início do século XXI*”. Rio de Janeiro, São Paulo, Record, 2001.
- _____ Quem está na frente é o povo. Entrevista concedida aos *Cadernos Le Monde Diplomatique*, janeiro, 2001.
- _____ “*Por uma Nova Globalização*”. Ed. Record, 2000.
- _____ “*Espaço e método*”. Editora Nobel, São Paulo, 1985.
- _____ “*Espaço e Sociedade*”. Editora Vozes, 1979.
- Senior, M. Deprivation indicators in *The census data system* organizado por Rees, P.; Martin, D. e Williamson, P.; 2001.
- Sposati, A. *Mapa de Exclusão/Inclusão da Cidade de São Paulo*, Editora PUC-SP, São Paulo, 1996128p.
- _____ “Cidade, Território, Exclusão/Inclusão Social”, *Congresso Internacional de Geoinformação – Geo Brasil*, 2000 a.
- Teague, P., Wilson, R. “Towards an inclusive society” in *Social Exclusion, Social Inclusion*, Democratic Dialog, volume nº 2, novembro, 1995.
- Villaça, F. Espaço Intra-Urbano no Brasil. São Paulo. Studio Nobel, 1998.

De Conceitos a Medidas Territoriais: A Construção de Índices Espaciais de Segregação Urbana

*Flávia F. Feitosa, Gilberto Câmara, Antônio Miguel V. Monteiro,
Thomas Koschitzki, Marcelino P. S. Silva*

1 Introdução

Com o progressivo processo de descentralização político-administrativo brasileiro, iniciado com a Constituição de 1988 e reforçado com o Estatuto da Cidade de 2001, o planejamento das cidades vem adquirindo um crescente reconhecimento de sua importância como instrumento indispensável na regulamentação das ações dos diversos agentes urbanos. Em concordância com esta tendência, observa-se uma preocupação em relação à compreensão da cidade e seus fenômenos, assim como ao embasamento teórico e técnico dos planejadores envolvidos no processo de intervenção sobre o espaço urbano.

Este esforço em busca de avanços na compreensão do espaço urbano requer a interação entre dois elementos básicos (Ramos, 2002): (a) um conjunto de conceitos e teorias que caracterizem os fenômenos que atuam sobre o espaço urbano, seus padrões, causas e implicações e (b) métodos e técnicas quantitativas de representação e análise do objeto de estudo em questão. A evolução no processo de apreensão de um fenômeno urbano em particular ocorre com a interação cíclica entre estes dois elementos: enquanto os conceitos e teorias fundamentam o processo de representação do objeto investigado, este permite a comprovação ou refutação dos conceitos e teorias existentes e a revelação de novas propriedades do fenômeno. Estas propriedades devem ser traduzidas em novos conceitos e teorias - ou no refinamento dos já existentes - que, por sua vez, realimentam o ciclo e viabilizam uma contínua mutação dos elementos básicos.

Este capítulo dedica-se a um dos elementos mencionados, mais especificamente, à construção de índices que visam representar um fenômeno de destaque nos atuais debates sobre políticas públicas: a *segregação urbana*.

O conceito de segregação urbana exprime a separação entre diferentes grupos sociais em um ambiente urbano. A segregação - seja ela de cunho racial, socioeconômico, religioso ou étnico - é comumente relacionada à imposição de inúmeros prejuízos a grupos populacionais menos privilegiados. Entre estes prejuízos, podem ser apontados: dificuldades de acesso a

equipamentos, serviços e infra-estruturas, redução de oportunidades de emprego, acentuada discriminação e uma maior exposição à violência, desastres naturais e problemas de saúde (Luco e Rodríguez, 2003; Rodríguez, 2001; Sabatini et al., 2001; Torres, 2004).

Associados à segregação urbana, estão ainda impactos que afetam não apenas as famílias excluídas, mas todos os moradores da cidade, como o aumento da violência, do medo e a proliferação de soluções como condomínios exclusivos e *shopping centers*, que intensificam ainda mais a segregação e suas conseqüências (Caldeira, 2000). Além disto, estes empreendimentos contribuem para a deterioração da cidade ao fragmentá-la, renegar os espaços públicos e o convívio entre os diferentes.

Apesar do reconhecimento da importância da segregação urbana, ainda são poucos os trabalhos latino-americanos que utilizam índices de segregação como uma ferramenta de análise do fenômeno. Entre os raros trabalhos existentes, podemos citar os de Telles (1992; 1995), Sabatini (2001) e Torres (2004), que adotam o tradicional índice de dissimilaridade D (Duncan e Duncan, 1955), e os trabalhos de Rodríguez (2001) e Luco e Rodríguez (2003), que aplicam índices baseados em variância. No entanto, estes trabalhos baseiam-se em índices muito simples, incapazes de representar a complexidade dos atuais conceitos e teorias a respeito da segregação. Surge, portanto, a necessidade de utilização de medidas mais sofisticadas, que apresentem propriedades importantes para as análises de segregação. Entre estas propriedades, destaca-se a capacidade de incorporar informações espaciais, de revelar as variações do fenômeno ao longo da cidade e de elaborar análises em múltiplas escalas.

Este capítulo apresenta índices de segregação alternativos que superam algumas das principais limitações dos índices comumente utilizados. O capítulo trata ainda do problema de validação dos índices de segregação e propõe a aplicação de um teste estatístico para a verificação da significância dos resultados destes índices. Posteriormente, características dos índices apresentados e aspectos importantes sobre como aplicá-los e interpretá-los serão exemplificados por intermédio de experimentos realizados sobre dados artificiais e reais.

2 Índices de Segregação Urbana: Uma Breve Revisão

Os primeiros estudos focados na mensuração da segregação tiveram início no final da década de 40 e início da década de 50, quando vários índices passaram a ser propostos e discutidos nos Estados Unidos. O índice mais popular desta primeira geração de medidas foi o índice de dissimilaridade D (Duncan e Duncan, 1955). O índice D , ainda utilizado por muitos pesquisadores, mede a relação existente entre a composição populacional das unidades de área

(por exemplo, setores ou distritos) e a composição populacional de toda a área de estudo. O índice varia entre 0 e 1 e é definido como:

$$D = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^J \frac{N_{jm}}{N_m} - \frac{N_{jn}}{N_n}, \quad (1)$$

onde N_{jm} e N_{jn} são, respectivamente, a população dos grupos m e n na unidade de área j , enquanto N_m e N_n representam a população total dos grupos m e n na área de estudo.

Além do índice de dissimilaridade, outros índices foram propostos neste período, como o índice de exposição/isolamento (Bell, 1954), o índice Gini (Cowell, 1977) e o índice Atkinson (Atkinson, 1970). Contudo, todos os índices propostos nesta fase limitaram-se a medir segregação entre dois grupos populacionais. Esta restrição reflete as preocupações sociais que motivaram o desenvolvimento de tais índices: a dicotômica realidade americana nos anos 50 aos 70 – era dos direitos civis – na qual a segregação entre negros e brancos era o foco de muitos estudos.

A partir da década de 70, os estudos raciais de segregação entre negros e brancos começaram a ceder espaço para estudos sobre a segregação entre múltiplos grupos, como a segregação entre distintas classes sociais e entre brancos, negros e hispânicos (Reardon e Firebaugh, 2002). Para atender a esta nova demanda, índices para medir a segregação entre vários grupos passaram a ser propostos. Entre estes, destacam-se o índice de entropia (Theil e Finizza, 1971), índice de dissimilaridade generalizado $D(m)$ (Sakoda, 1981), índice Gini generalizado (Boisso et al., 1994) e o índice de segregação residencial ISR (Jargowsky, 1996; Rodríguez, 2001).

No entanto, todos os índices existentes até este momento apresentavam uma importante limitação: a incapacidade de considerar o arranjo espacial da população entre as unidades de área. Este fato leva ao que White (1983) descreveu como o “problema do tabuleiro de damas” (*checkerboard problem*): dados dois tabuleiros de damas – o primeiro dotado de quadrados pretos em uma de suas metades e quadrados brancos na outra metade, e o segundo com alternância entre quadrados brancos e pretos -, uma medida não espacial como o índice de dissimilaridade D mostraria o mesmo nível de segregação em ambas as situações (Figura 1).

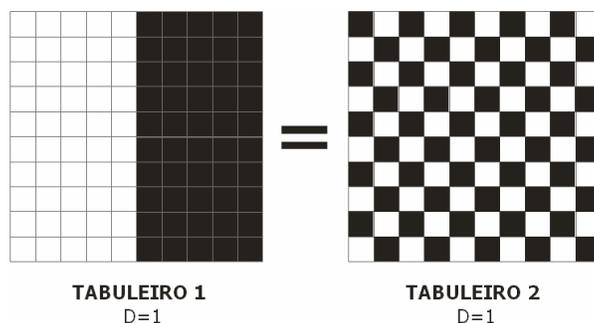


Figura 1 - Problema do tabuleiro de damas (*checkerboard problem*).

Para suprir esta inadequação, alguns pesquisadores passaram a dedicar-se ao desenvolvimento de medidas capazes de incorporar informações espaciais em suas formulações (Jakubs, 1981; Morgan, 1983; Morrill, 1991; Reardon e O'Sullivan, 2004; White, 1983; Wong, 1993, 1998).

Baseados nesta concepção espacial de mensuração da segregação, Reardon e O'Sullivan (2004) estabeleceram duas dimensões espaciais da segregação: *dispersão/agrupamento* e *exposição/isolamento* (Figura 2). A dimensão dispersão/agrupamento refere-se ao equilíbrio da distribuição dos distintos grupos populacionais no espaço residencial da cidade. A dimensão exposição/isolamento, por sua vez, diz respeito à capacidade de encontro entre membros de grupos distintos (ou do mesmo grupo, no caso do isolamento) (Reardon e O'Sullivan, 2004).

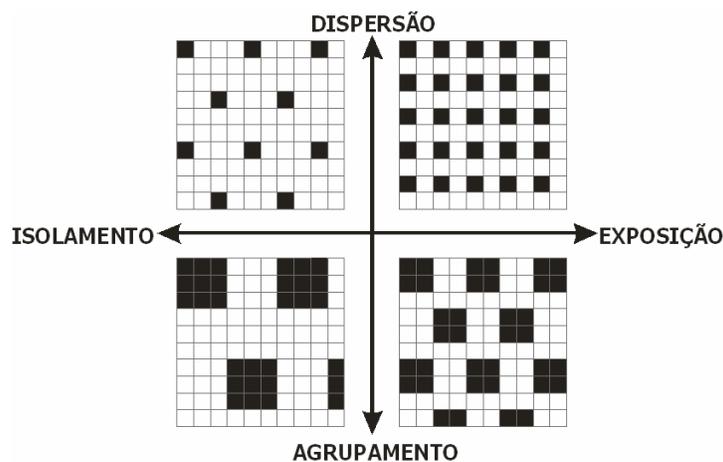


Figura 2 - Dimensões espaciais da segregação urbana.
 Adaptada de Reardon e O'Sullivan (2004).

Apesar da existência de índices espaciais, a grande maioria dos estudos empíricos baseia-se em índices não-espaciais, que são facilmente computáveis em planilhas eletrônicas.

Já os índices espaciais requerem a extração de informações geográficas, um procedimento que necessita de implementações computacionais nem sempre acessíveis aos pesquisadores da área.

3 Construção de Índices Espaciais de Segregação Urbana

A abordagem proposta para a construção dos índices de segregação parte da hipótese de que um ambiente urbano é composto por diferentes *localidades*, ou seja, locais onde as pessoas vivem e interagem com seus vizinhos. A intensidade destas interações, um aspecto chave para a mensuração da segregação, varia de acordo com o grau de proximidade entre as pessoas.

A abordagem apresentada foi desenvolvida para dados agregados em unidades de área, como setores censitários ou distritos. Cada unidade de área considerada na análise é associada a uma localidade, cujas características populacionais são expressas por sua *intensidade populacional local*. O cômputo da intensidade populacional local é realizado através do uso de um estimador kernel (Silverman, 1986). Estimadores kernel são funções que determinam a intensidade de um determinado evento nos diferentes pontos da área de estudo. Para calcular a intensidade populacional local de uma localidade j , o estimador kernel é posicionado no centróide da unidade j e computa a média ponderada dos dados populacionais da área de estudo (Figura 3). Os pesos utilizados neste cômputo dependem dos parâmetros do estimador kernel escolhido pelo pesquisador. Existem inúmeros tipos de estimadores kernel, entre eles o kernel linear, gaussiano, polinomial e sigmóide (Schölkopf e Smola, 2002).



Figura 3 - Estimador kernel gaussiano.

3.1 Índices Globais Espaciais de Segregação

Índices globais de segregação são aqueles que expressam o grau de segregação da cidade como um todo. Esta seção apresenta índices espaciais globais de segregação construídos a partir do conceito de *intensidade populacional local*. São estes:

- a) Índice espacial de dissimilaridade generalizado $\check{D}(m)$, que é uma medida da diferença média entre a composição populacional das localidades e a composição populacional total da cidade;
- b) Índice espacial de exposição $\check{P}_{(m,n)}^*$, que mede o contato potencial entre os grupos m e n ;
- c) Índice espacial de isolamento \check{Q}_m , que mede o contato potencial do grupo m com ele próprio;
- d) Índice espacial de segregação residencial \check{ISR} , que é uma medida das disparidades populacionais entre as distintas localidades da cidade.

O índice de dissimilaridade generalizado espacial $\check{D}(m)$, o índice espacial de exposição $\check{P}_{(m,n)}^*$ e o índice espacial de isolamento \check{Q}_m são mais adequados para estudos que utilizam variáveis categóricas, como os de segregação racial ou étnica. O índice espacial de segregação residencial \check{ISR} é apropriado para estudos que utilizam em variáveis contínuas, como os de segregação socioeconômica baseados em renda.

Todos os índices espaciais de segregação propostos requerem a estimativa da *intensidade populacional local de todas as localidades* da área de estudo. Em termos formais, a intensidade populacional local de uma localidade j (\check{L}_j) é definida como:

$$\check{L}_j = \sum_{j=1}^J k(N_j), \quad (2)$$

onde N_j é a população total na unidade de área j , J é o número total de unidades de área na cidade ou área metropolitana. O símbolo k representa a função do estimador kernel, que estima a influência das características populacionais de cada unidade de área sobre a localidade j . A intensidade populacional local do grupo populacional m na localidade j (\check{L}_{jm}) é calculada através da substituição da população total na unidade de área j (N_j) pela população do grupo m na unidade de área j (N_{jm}) na Equação (2).

$$\check{L}_{jm} = \sum_{j=1}^J k(N_{jm}). \quad (3)$$

3.1.1 Índice Espacial de Dissimilaridade Generalizado

O índice espacial de dissimilaridade generalizado $\check{D}(m)$ é uma versão espacial do índice de dissimilaridade generalizado $D(m)$ desenvolvido por Sakoda (1981). O índice espacial $\check{D}(m)$ mede a diferença média entre a composição populacional das várias *localidades* da cidade e a composição populacional da cidade como um todo. Este índice capta a dimensão espacial dispersão/agrupamento.

Dado um conjunto de grupos populacionais, o índice espacial de dissimilaridade generalizado $\check{D}(m)$ é definido como:

$$\check{D}(m) = \sum_{j=1}^J \sum_{m=1}^M \frac{N_j |\check{\tau}_{jm} - \tau_m|}{2NI} \quad (4)$$

, onde $I = \sum_{m=1}^M \tau_m (1 - \tau_m)$ e $\check{\tau}_{jm} = \frac{\check{L}_{jm}}{\check{L}_j}$ (5) (6)

Nas Equações (4) e (5), N é a população total da cidade, N_j é a população total na unidade de área j , τ_m é a proporção do grupo m na cidade, $\check{\tau}_{jm}$ é a proporção do grupo m na localidade j e M é o número total de grupos populacionais. Na Equação (6), \check{L}_{jm} é a intensidade populacional local do grupo m na localidade j e \check{L}_j é a intensidade populacional local na localidade j . O índice $\check{D}(m)$ varia entre 0 e 1, onde 0 equivale ao mínimo grau de segregação e 1 representa o máximo grau.

3.1.2 Índices Espaciais de Exposição e Isolamento

O índice espacial de exposição $\check{P}_{(m,n)}^*$ e o índice espacial de isolamento \check{Q}_m são versões espaciais dos índices de exposição e isolamento propostos por Bell (1954). Estes índices capturam a dimensão espacial exposição/isolamento. Dado dois grupos populacionais, o índice espacial de exposição do grupo m ao grupo n $\check{P}_{(m,n)}^*$ mede a proporção média do grupo n na *localidade* de cada membro do grupo m :

$$\check{P}_{(m,n)}^* = \sum_{j=1}^J \frac{N_{jm}}{N_m} \left(\frac{\check{L}_{jn}}{\check{L}_j} \right), \quad (7)$$

onde N_{jm} é a população do grupo m na unidade de área j , N_m é a população do grupo m na cidade, \check{L}_{jn} é intensidade populacional local do grupo n na localidade j e \check{L}_j é a intensidade

populacional local da localidade j . O índice $\check{P}_{(m,n)}^*$ expressa o contato potencial entre dois grupos populacionais e varia entre 0 (mínima exposição) e 1 (máxima exposição).

Dado um grupo populacional, o índice espacial de isolamento do grupo m - \check{Q}_m - é um caso particular do índice espacial de exposição $\check{P}_{(m,n)}^*$. O índice \check{Q}_m mede a exposição do grupo m a ele próprio e é definido como:

$$\check{Q}_m = \sum_{j=1}^J \frac{N_{jm}}{N_m} \left(\frac{\check{L}_{jm}}{\check{L}_j} \right) \quad (8)$$

onde \check{L}_{jm} é intensidade populacional local do grupo m na localidade j e os demais parâmetros são definidos como na Equação (7). O índice de isolamento varia entre 0 (mínimo isolamento) e 1 (máximo isolamento).

Os índices de exposição e isolamento dependem da composição populacional da cidade como um todo, ou seja, as proporções de cada grupo são relevantes. Por exemplo, o índice de exposição do grupo m ao n tende a apresentar valores mais altos se a proporção do grupo n em toda a cidade for elevada, dado que a interação entre os indivíduos do grupo n e os demais grupos se torna mais provável. Em virtude desta característica, o índice de exposição é considerada assimétrico, ou seja, $\check{P}_{(m,n)}^*$ não é igual a $\check{P}_{(n,m)}^*$, exceto se os grupos m e n apresentarem a mesma proporção populacional.

3.1.3 Índice Espacial de Segregação Residencial

O índice espacial de segregação residencial \check{ISR} é uma versão espacial do índice de segregação residencial ISR (Jargowsky, 1996; Rodríguez, 2001) e captura a dimensão dispersão/agrupamento. Diferentemente dos índices apresentados até o momento, o índice espacial de segregação residencial \check{ISR} é uma medida baseada em variâncias e permite a utilização da distribuição original de variáveis contínuas em seu cômputo. Desta forma, o \check{ISR} dispensa o estabelecimento de grupos populacionais, o que é particularmente problemático em estudos socioeconômicos (quais são os grupos socioeconômicos? quantos são?), e é considerado mais apropriado em investigações baseadas em variáveis contínuas, como renda dos chefes de família.

Considerando uma variável contínua X , o \check{ISR} baseia-se no fato de que a variância total de X ($\check{\sigma}_{total}^2$) na cidade equivale à soma da variância *interna* de cada *localidade* ($\check{\sigma}_{intra}^2$) e da variância *entre* as *localidades* ($\check{\sigma}_{entre}^2$), ou seja:

$$\check{\sigma}_{total}^2 = \check{\sigma}_{intra}^2 + \check{\sigma}_{entre}^2 \quad (9)$$

Quanto maior a participação da variância *entre* as distintas localidades da cidade na composição da variância total, menor será a probabilidade de interação entre os diferentes grupos populacionais. Seguindo esta lógica, a índice \check{ISR} equivale à proporção da variância *entre* as localidades ($\check{\sigma}_{entre}^2$) que contribui na composição da variância total de X nas localidades da cidade ($\check{\sigma}_{total}^2$):

$$\check{ISR} = \frac{\check{\sigma}_{entre}^2}{\check{\sigma}_{total}^2}. \quad (10)$$

A variância de X entre as diferentes localidades da cidade é definida como:

$$\check{\sigma}_{entre}^2 = \frac{\sum_{j=1}^J \check{L}_j (\check{X}_j^2 - \check{X}^2)}{\sum_{j=1}^J \check{L}_j}, \quad (11)$$

onde

$$\check{X}_j = \sum_{m=1}^M \check{\tau}_{jm} X_m \quad \text{e} \quad \check{X} = \frac{\sum_{j=1}^J (\check{L}_j \check{X}_j)}{\sum_{j=1}^J \check{L}_j}. \quad (12)(13)$$

Nas Equações (11) e (13), J é o número total de unidades de área na cidade, \check{L}_j é a intensidade populacional local da localidade j , \check{X}_j é a média ponderada de X considerando a proporção de todos os grupos na localidade j e \check{X} é a média de \check{X}_j na cidade, ponderada pela intensidade populacional local das localidades. Na Equação (12), $\check{\tau}_{jm}$ é proporção do grupo m na localidade j , X_m é o valor de X para o grupo m e M é o número de grupos populacionais na cidade.

A variância total da cidade, considerando as diferentes localidades, é definida como:

$$\check{\sigma}_{total}^2 = \sum_{m=1}^M \check{\tau}_m (X_m - \check{X})^2, \quad (14)$$

onde $\check{\tau}_m$ é a proporção do grupo m na cidade, considerando a intensidade populacional local de todas as localidades. Assim como os demais índices, o \check{ISR} varia entre 0 e 1: o valor 0 indica o grau mínimo de segregação e o valor 1 indica o máximo grau.

3.2 Índices Locais de Segregação

O cômputo dos índices espaciais apresentados na Seção anterior resulta em valores que sintetizam o grau de segregação da área de estudo como um todo. No entanto, a segregação urbana é um fenômeno cuja intensidade varia ao longo da cidade e as informações a respeito destas variações são de grande valia no processo de compreensão da segregação e de estabelecimento de políticas públicas que a minimizem.

Por conseguinte, os índices globais devem ser complementados por índices locais de segregação, que possibilitam a observação do grau de segregação nos distintos pontos da cidade por intermédio de “mapas de segregação”.

Em resposta a esta questão, esta Seção apresenta índices locais de segregação gerados a partir da decomposição dos índices espaciais globais $\check{D}(m)$, $\check{P}_{(n,m)}^*$ e \check{Q}_m . Estes índices locais indicam o quanto cada localidade contribui para a medida global da segregação da cidade. A versão local do índice espacial de dissimilaridade generalizado $\check{D}(m)$, denominada $\check{d}_j(m)$, é definida como:

$$\check{d}_j(m) = \sum_{m=1}^M \frac{N_j |\check{\tau}_{jm} - \tau_m|}{2N\tau_m(1 - \tau_m)}, \quad (15)$$

onde os parâmetros são definidos como os da Equação (4).

Seguindo o mesmo raciocínio, o índice local de exposição - $\check{p}_{j(m,n)}^*$ - é obtido da seguinte maneira:

$$\check{p}_{j(m,n)}^* = \frac{N_{im}}{N_m} \left(\frac{\check{L}_{jn}}{\check{L}_j} \right), \quad (16)$$

onde os parâmetros são definidos como os da Equação (7).

Para a obtenção do índice local de isolamento \check{q}_{jm} , basta substituir \check{L}_{jn} pela intensidade populacional local do próprio grupo m na área j (\check{L}_{jm}). O \check{ISR} , ao contrário dos demais índices espaciais, não permite a geração de índices locais a partir da abordagem de decomposição apresentada.

4 Validação dos Índices Espaciais de Segregação Urbana

Após o cômputo dos índices, é importante determinar o significado dos resultados obtidos. Uma alternativa muito utilizada neste processo é a adoção de limiares fixos para a interpretação dos resultados, assim como os estabelecidos por Massey e Denton (1987) para o índice de dissimilaridade D . De acordo com estes autores, um índice D com valores entre 0 e 0,3 indica uma segregação suave, de 0,3 a 0,6 indica uma segregação moderada e acima de 0,6 revela uma segregação severa.

No entanto, todos os índices são susceptíveis a uma interferência conhecida como “problema da unidade de área modificável” ou MAUP (Openshaw, 1984). Ou seja, os resultados dos índices variam com a alteração das fronteiras das unidades de análises consideradas em seu cômputo. Por exemplo, estes índices tendem a exibir valores mais elevados com o aumento do número de unidades de área computadas. Em virtude dos efeitos do MAUP, a comparação entre índices computados para unidades de área com geometrias distintas não é aconselhável. Da mesma forma, o estabelecimento de limiares fixos não representa uma solução adequada para a interpretação dos índices.

Como contribuição a esta problemática, propomos a aplicação de um teste de hipótese, conhecido como *teste de pseudo-significância* (Anselin, 1995), para o estabelecimento da validade estatística dos índices espaciais de segregação. Para que se saiba o que esperar quando uma determinada hipótese é verdadeira, os testes de hipótese são geralmente conduzidos para uma hipótese contrária ao que de fato se quer provar, denominada *hipótese nula* (Freund e Perles, 1999). No caso dos índices de segregação, os testes deverão ser conduzidos para a hipótese nula de que a distribuição dos grupos populacionais na cidade *não* representa um arranjo segregado. Se a hipótese nula for rejeitada, aceita-se a hipótese alternativa de que o arranjo populacional *é* segregado.

Para a execução do teste de pseudo-significância, os dados correspondentes a cada unidade de área devem ser permutados aleatoriamente inúmeras vezes entre as áreas, produzindo distintos arranjos espaciais dos grupos populacionais. As permutações geradas são utilizadas na construção de uma distribuição de referência que é confrontada ao valor do índice obtido a partir dos dados originais. Se o valor observado for superior aos valores dos índices computados para os arranjos populacionais aleatórios, a hipótese nula será rejeitada.

A Figura 4 apresenta um exemplo de aplicação do teste de pseudo-significância sobre o índice de dissimilaridade $\check{D}(m)$. Neste caso, a distribuição de referência, em laranja, foi construída a partir de 99 permutações aleatórias e o valor observado está representado pela cor azul. Observa-se na Figura 4 que o valor observado é superior aos calculados para os arranjos populacionais gerados aleatoriamente. Portanto, rejeita-se a hipótese nula de que o arranjo populacional *não é segregado*.

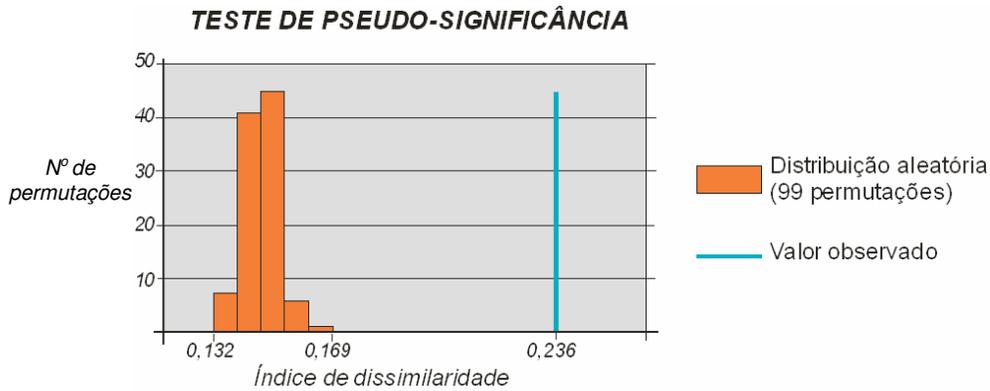


Figura 4 - Exemplo de distribuição simulada do indicador $\check{D}(m)$.

Na prática, a verificação da significância dos índices é efetuada através do cálculo do nível de pseudo-significância (*p-valor*) para cada índice computado. O *p-valor* representa a probabilidade de rejeitarmos a hipótese nula quando ela é verdadeira (Freund e Perles, 1999). Como o *p-valor* representa um erro, a condição para que um índice seja considerado significativo é a de que seu *p-valor* seja baixo. O valor 0,05 é comumente adotado como limiar neste processo (Freund e Perles, 1999), ou seja, um índice com *p-valor* inferior a 0,05 é considerado significativo. Este limiar, porém, pode ser alterado a critério do pesquisador.

Formalmente, o *p-valor* é calculado da seguinte maneira (Anselin, 2003):

$$p - valor = \frac{d + 1}{D + 1} , \quad (17)$$

onde d representa o número de permutações aleatórias cujo índice de segregação é superior ou igual ao índice calculado para a o conjunto de dados observado, e D representa o número total de permutações geradas. Por representar uma probabilidade, o *p-valor* varia entre 0 e 1.

A aplicabilidade dos testes de pseudo-significância será apresentada na próxima Seção, na qual as propriedades dos índices apresentados serão ilustradas sobre dados artificiais e reais.

5 Aplicação e Interpretação dos Índices Espaciais de Segregação

Para que a utilização de índices subsidie análises qualificadas a respeito do fenômeno da segregação urbana, é necessário que se tenha consciência sobre as propriedades dos índices selecionados, como devem ser aplicados e o que são capazes de revelar ou não. Por esta razão, destacamos nesta seção alguns aspectos básicos dos índices de segregação apresentados e os ilustramos com alguns exemplos.

5.1 Incorporação de Informações Espaciais

O primeiro aspecto, que representa a diferença essencial entre os índices apresentados e os comumente utilizados em estudos empíricos, diz respeito à capacidade dos índices de *incorporar informações espaciais* em suas formulações. A Figura 5 demonstra a diferença entre os índices espaciais globais apresentados e suas versões não-espaciais através da aplicação destes índices sobre dois conjuntos de dados artificiais: (a) o conjunto A, que configura um caso de extrema segregação, no qual cada área apresenta apenas indivíduos do mesmo grupo e as áreas caracterizadas pelo mesmo grupo estão agrupadas e (b) o conjunto B, onde cada área também apresenta apenas indivíduos do mesmo grupo, porém estas áreas estão dispersas de maneira equilibrada.

Para capturar a dimensão dispersão/agrupamento, foram calculados índices não-espaciais e espaciais de dissimilaridade ($D(m)$ e $\check{D}(m)$) e índices de segregação residencial (ISR e \check{ISR}). Estes índices variam entre 0 (mínimo agrupamento) e 1 (máximo agrupamento). Em relação à dimensão exposição/isolamento, foram calculados índices não-espaciais e espaciais de exposição do grupo Azul ao grupo Verde ($P_{(Azul,Verde)}^*$ e $\check{P}_{(Azul,Verde)}^*$) e de isolamento do grupo Azul (Q_{Azul} e \check{Q}_{Azul}). Os índices da dimensão exposição/isolamento dependem da composição populacional da cidade como um todo, ou seja, é importante que se tenha em mente a proporção de cada grupo durante o processo de interpretação destes índices. No caso dos conjuntos de dados apresentados, onde a proporção dos quatro grupos é de 0,25, um arranjo populacional integrado deverá apresentar índices de exposição e isolamento sempre próximos a 0,25. Isto significa dizer que a composição populacional das localidades da cidade permite um contato equitativo entre os membros de um grupo e os membros de todos os demais grupos. Já um arranjo segregado deverá apresentar índices de

exposição próximos a 0 (não há exposição entre grupos distintos) e índices de isolamento próximos a 1 (máximo isolamento).

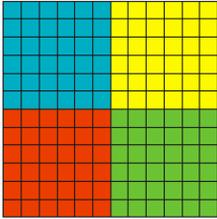
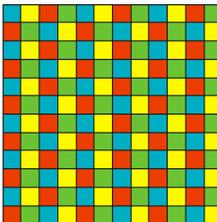
	Índices não-espaciais	Índices espaciais
<p>Conjunto A</p> 	$D(m) = 1$ $ISR = 1$ $P_{(Azul,Verde)}^* = 0$ $Q_{Azul} = 1$	$\check{D}(m) = 0,86$ (p-valor = 0,01) $\check{ISR} = 0,82$ (p-valor = 0,01) $\check{P}_{(Azul,Verde)}^* = 0,003$ (p-valor = 1) $\check{Q}_{Azul} = 0,88$ (p-valor = 0,01)
<p>Conjunto B</p> 	$D(m) = 1$ $ISR = 1$ $P_{(Azul,Verde)}^* = 0$ $Q_{Azul} = 1$	$\check{D}(m) = 0,05$ (p-valor = 1) $\check{ISR} = 0,07$ (p-valor = 1) $\check{P}_{(Azul,Verde)}^* = 0,24$ (p-valor = 0,01) $\check{Q}_{Azul} = 0,24$ (p-valor = 1)

Figura 5 - Comparação entre índices globais espaciais e não-espaciais.

Observa-se na Figura 5 que, embora o conjunto A apresente uma configuração muito mais segregada do que o conjunto B, os índices não espaciais foram incapazes de diferenciá-los. Todos os índices indicaram uma situação de máxima segregação para ambos os conjuntos. Estes resultados exemplificam o problema do tabuleiro de damas, ou seja, em qualquer caso onde as unidades de área estejam ocupadas apenas por indivíduos do mesmo grupo, os índices de segregação não-espaciais indicarão o grau máximo de segregação, independente do arranjo espacial destas unidades.

Os índices espaciais, por sua capacidade de considerar as unidades vizinhas, superam esta limitação e permitem a diferenciação entre os conjuntos A e B. Considerando a dimensão dispersão/agrupamento, os índices espaciais de dissimilaridade $\check{D}(m)$ e de segregação residencial \check{ISR} calculados sobre o conjunto A apresentaram valores elevados e significativos (p-valor=0,01). Neste caso, rejeita-se a hipótese nula de que a distribuição populacional não representa um arranjo segregado. Para o conjunto de dados B, os índices $\check{D}(m)$ e \check{ISR} apresentaram valores quase nulos e não significativos (p-valor=1), ou seja, aceita-se a hipótese nula de que o arranjo espacial não seja segregado.

Os índices da dimensão exposição/isolamento também apontaram o conjunto A como segregado e o conjunto B como integrado. O índice espacial de exposição do grupo Azul ao

Verde ($\tilde{P}_{(Azul,Verde)}^*$), que neste caso representou mais um índice de “integração” do que de “segregação”, apresenta um valor não-significativo para o conjunto A (p-valor=1) e um valor significativo para o conjunto B (p-valor=0,01). Este resultado significa afirmar que a hipótese nula de que o grupo Azul *não está exposto* ao grupo Verde foi aceita para o conjunto A e rejeitada para o conjunto B. O índice espacial de isolamento do grupo Azul \tilde{Q}_{Azul} revelou-se significativo para o conjunto A (p-valor=0,01) e não-significativo para o conjunto B (p-valor=1). Ou seja, a hipótese nula de que *não há isolamento* do grupo Azul foi rejeitada para o conjunto A e aceita para o conjunto B.

Os resultados dos índices espaciais globais apresentados são complementados e melhor compreendidos por intermédio de um outro aspecto que deve ser considerado no momento de aplicação de índices de segregação: a *realização de análises locais*.

5.2 Análises Locais

Embora a grande maioria dos trabalhos que utilizam índices de segregação baseie-se apenas em índices globais, é fundamental que índices capazes de capturar as variações do fenômeno ao longo da cidade também sejam adotados. Estes índices locais permitem a elaboração de mapas nos quais as áreas mais segregadas da cidade podem ser identificadas.

A Figura 6 apresenta a espacialização das versões espaciais e não-espaciais do índice local de dissimilaridade generalizado ($d_j(m)$ e $\tilde{d}_j(m)$) para os conjuntos de dados apresentados na Seção anterior. A espacialização destes índices locais mostra o quanto cada unidade de área contribui na composição de seus respectivos índices globais. O índice local não-espacial $d_j(m)$ não aponta qualquer variação do grau de segregação ao longo da área analisada, o que reafirma o observado por intermédio do índice global $D(m)$. Já o índice local espacial $\tilde{d}_j(m)$ explicita espacialmente as distinções apontadas pelo índice global $\tilde{D}(m)$:

- (a) no conjunto A, as unidades de áreas mais segregadas encontram-se nas bordas, enquanto as unidades mais integradas localizam-se no centro, onde os diferentes grupos estão próximos uns dos outros;
- (b) no conjunto B, todas as unidades de áreas apresentam um índice $\tilde{d}_j(m)$ muito baixo, visto que apresentam uma vizinhança diversificada.

<i>Índice de Dissimilaridade Local</i>	
$d_j(m)$	$\tilde{d}_j(m)$

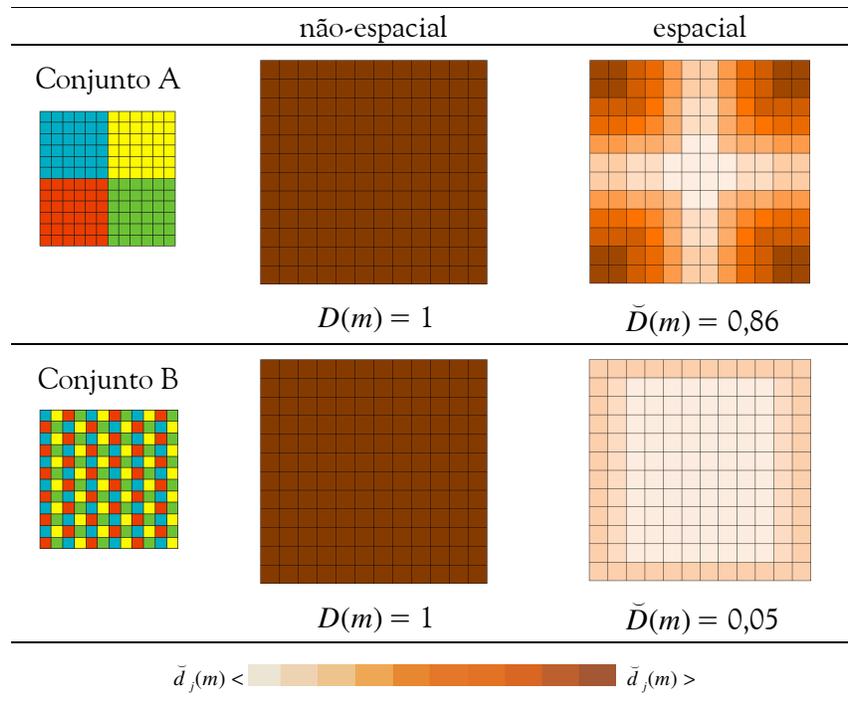
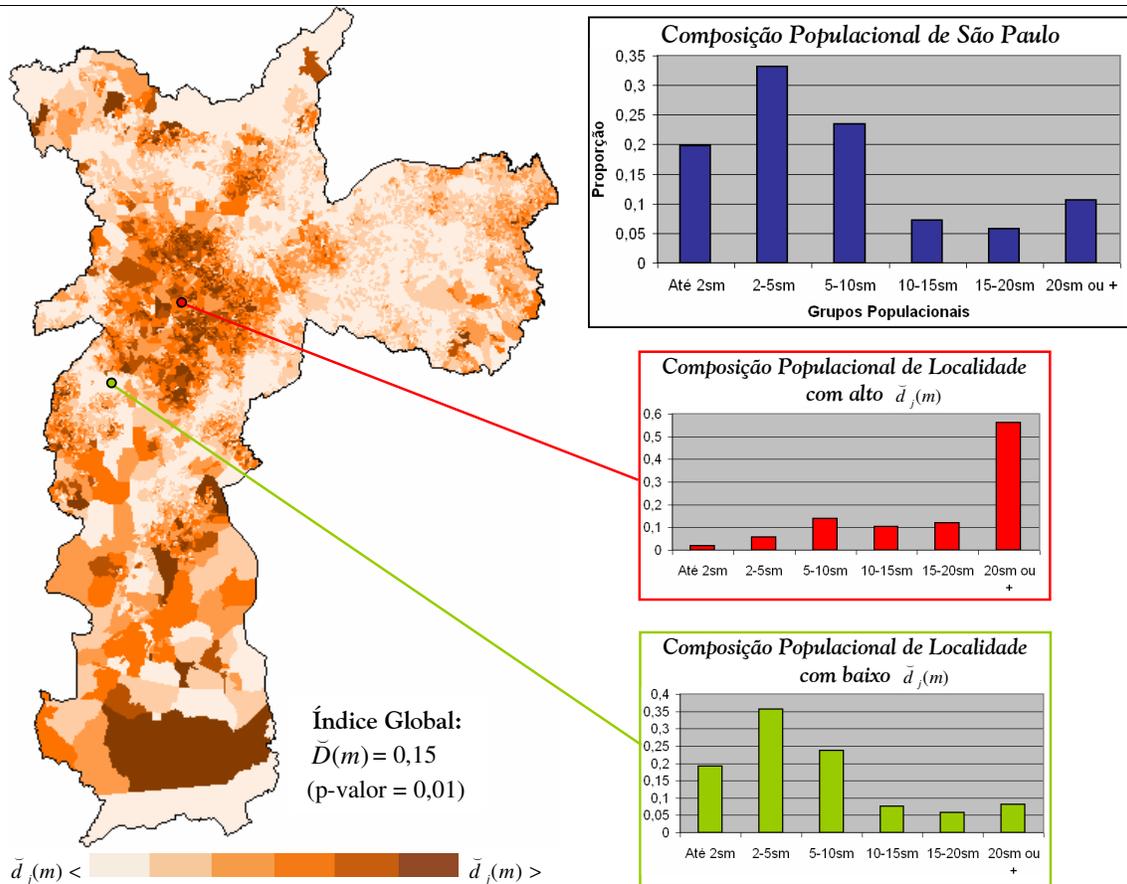


Figura 6 - Cálculo dos índices locais $d_j(m)$ (não-espacial) e $\check{d}_j(m)$ (espacial) sobre os conjuntos A e B.

Índice espacial de dissimilaridade local $\check{d}_j(m)$ - São Paulo (2000)
Kernel gaussiano, largura de banda de 500 m



sm : salário(s) mínimo(s)

Figura 7 - Espacialização dos índices locais de dissimilaridade computados para grupos populacionais classificados quanto à renda dos chefes de família em São Paulo (2000).

A Figura 7 apresenta a espacialização do índice $\check{d}_j(m)$ para os dados censitários de renda dos chefes de família da cidade de São Paulo no ano de 2000. O índice de dissimilaridade $\check{D}(m)$ captura a dimensão dispersão/agrupamento, ou seja, o quão equilibrada é a distribuição populacional da área analisada. Por intermédio da espacialização de $\check{d}_j(m)$, é possível visualizar as localidades cuja composição populacional mais se distingue da composição populacional da cidade de São Paulo como um todo. Para ilustrar o que os mapas de dissimilaridade local ressaltam, a Figura 7 apresenta também um gráfico da composição populacional de São Paulo e gráficos da composição populacional de duas localidades - uma realçada como muito segregada (alto $\check{d}_j(m)$) e outra como muito integrada (baixo $\check{d}_j(m)$). A comparação entre estes gráficos permite observar que a localidade de baixo $\check{d}_j(m)$ apresenta

uma composição populacional muito semelhante à da cidade, enquanto a localidade de alto $\tilde{d}_j(m)$ dispõe de uma composição populacional muito distinta, com uma grande concentração de chefes de família pertencentes ao grupo populacional de maior renda (20 salários mínimos ou mais).

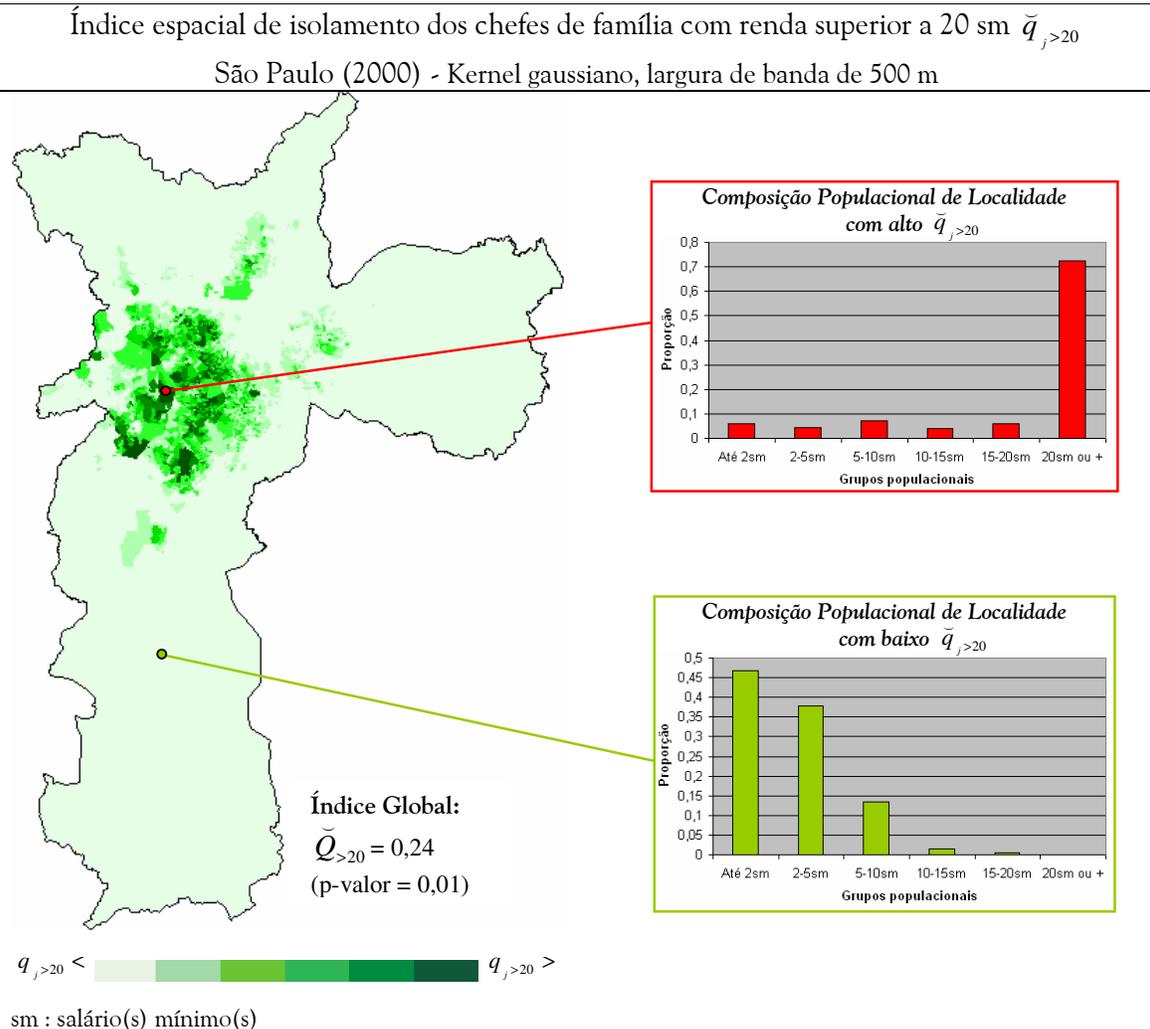


Figura 8 - Espacialização dos índices locais de isolamento dos chefes de família com renda superior a 20 sm em São Paulo (2000).

A Figura 8 apresenta a espacialização do índice local de isolamento $\tilde{q}_{j>20}$ dos chefes de família com renda superior a 20 salários mínimos (sm) no município de São Paulo. O índice global de isolamento $\tilde{Q}_{>20}$ mede a dispersão exposição/isolamento, mais especificamente, a proporção média do grupo dos chefes com renda superior a 20 sm na localidade de cada chefe

de família na mesma faixa de renda. A espacialização do índice local $\tilde{q}_{j>20}$ indica o quanto cada localidade contribuiu para a composição do índice $\tilde{Q}_{>20}$. A Figura 8 apresenta o gráfico de localidades com alto e baixo índice local $\tilde{q}_{j>20}$. Na localidade com alto $\tilde{q}_{j>20}$, os chefes de família com renda superior a 20 sm representam a grande maioria, enquanto a localidade com baixo $\tilde{q}_{j>20}$ não apresenta nenhum indivíduo pertencente a este grupo.

5.3 Análises em Múltiplas Escalas

Ao considerarmos o fato de que a representação da segregação urbana através de índices consiste na análise da composição populacional dos locais que compõe a área de estudo, a questão da escala torna-se fundamental para qualquer estudo sobre o fenômeno. Sob esta perspectiva, os tradicionais índices de segregação tornam-se limitados, visto que sua capacidade de capturar distintas escalas restringe-se à adoção de unidades de áreas diferentes, como setores censitários e distritos. No entanto, estas unidades pré-estabelecidas não correspondem necessariamente às escalas mais apropriadas para a captura dos padrões de segregação das cidades.

Os índices apresentados neste capítulo respondem a esta limitação por permitirem a escolha dos parâmetros dos estimadores kernel que definem as localidades a serem consideradas no cômputo. Em virtude desta flexibilidade, os índices são capazes de partir da informação mais detalhada possível (geralmente fornecida por setores censitários) e generalizá-la para a análise da segregação em escalas mais abrangentes.

Para ilustrar esta questão, kernels gaussianos com larguras de banda de 500m e 1500m foram adotadas no cálculo dos índices locais $\tilde{d}_j(m)$ para os dados de renda dos chefes de família da cidade de São Paulo (Figura 9).

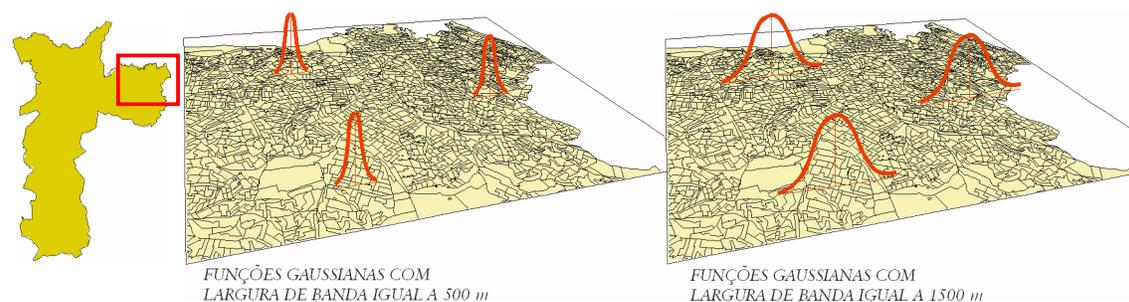


Figura 9 - Abrangência aproximada das funções gaussianas utilizadas no cômputo dos índices locais de dissimilaridade para os dados de São Paulo.

Índice espacial de dissimilaridade local $\tilde{d}_j(m)$
Renda dos chefes de família em São Paulo (2000)

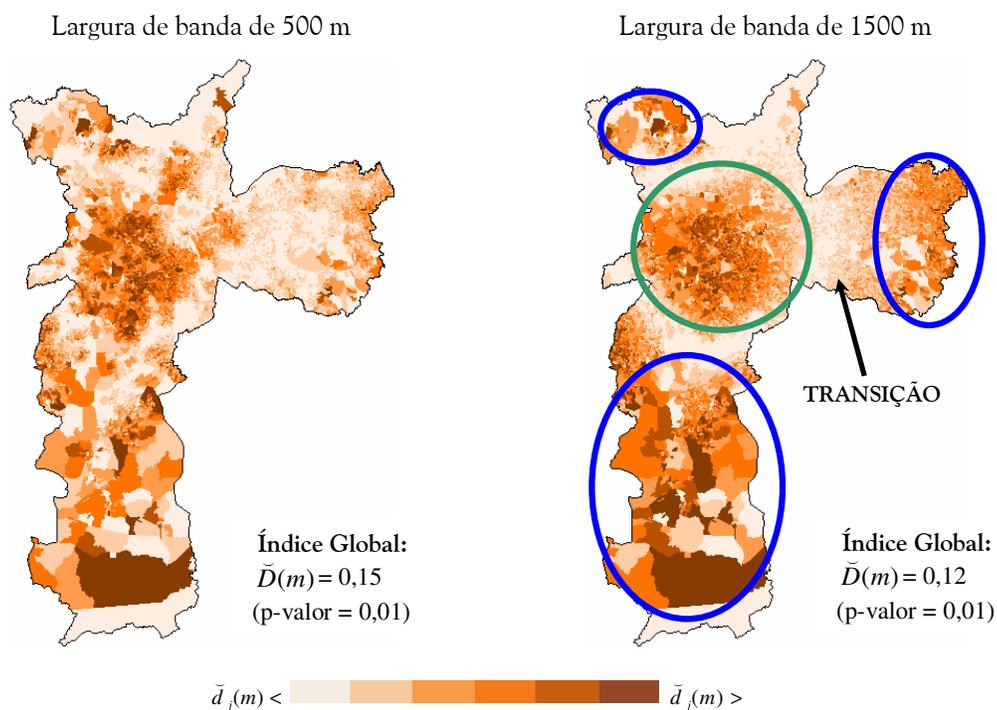


Figura 10 - Espacialização dos índices locais de dissimilaridade computados com estimadores gaussianos com larguras de banda de 500m e 1500m.

A adoção de uma largura de banda mais estreita implica no estabelecimento de localidades que serão significativamente influenciadas pelas unidades de área mais próximas, enquanto a adoção de larguras de banda maiores implica no estabelecimento de localidades mais abrangentes, que também são influenciadas pela composição populacional de unidades de área mais distantes. Por esta razão, é possível verificar na Figura 10 que o mapa dos índices $\tilde{d}_j(m)$ baseado em larguras de banda de 500 m permite a detecção de maiores detalhes sobre o grau de segregação nas distintas localidades da cidade, ao passo que o mapa baseado em larguras de banda de 1500m indica grandes regiões segregadas da cidade. Neste último mapa é possível verificar, por exemplo, que São Paulo apresenta um grande núcleo segregado na região Central (circulado em verde), cercado por uma área de baixa segregação que representa uma transição para outros núcleos de segregação que se localizam nas áreas periféricas da cidade (em azul).

Com o aumento da largura de banda, os índices de segregação tendem a apresentar valores menores. No exemplo de São Paulo, o índice espacial global de dissimilaridade $\bar{D}(m)$ calculado para uma largura de banda de 500m é igual a 0,15, enquanto o calculado para uma largura de 1500m é de 0,12. Este resultado é esperado, visto que com o aumento da largura de banda, as localidades incorporam as características populacionais de um número maior de unidades de área, o que geralmente implica em uma composição populacional mais diversificada.

5.4 Análises de Distintas Dimensões da Segregação

É consenso entre os pesquisadores o fato de que a segregação urbana não possui uma única dimensão e sua representação requer a aplicação de diferentes índices para cada dimensão considerada (Massey e Denton, 1988; Reardon e O'Sullivan, 2004). Conforme já mencionado, este trabalho apresenta índices de segregação para as dimensões espaciais dispersão/agrupamento e exposição/isolamento, estipuladas por Reardon e O'Sullivan (2004). Estas dimensões apontam aspectos distintos da segregação e os índices referentes a elas devem ser aplicados complementarmente. Enquanto os índices que capturam a dimensão dispersão/agrupamento medem o equilíbrio da composição populacional da cidade, os índices da dimensão exposição/isolamento nos fornecem indícios a respeito dos grupos populacionais que promovem possíveis desequilíbrios constatados na primeira dimensão.

A Figura 11 ilustra a complementaridade dos índices calculados para as duas dimensões. Os índices locais de dissimilaridade (dimensão dispersão/agrupamento) mostram as áreas onde a composição populacional mais se diferencia da composição média da cidade, enquanto os índices de isolamento (dimensão exposição/isolamento) ressaltam quais os grupos predominam nas áreas indicadas como segregadas pelos índices de dissimilaridade. É possível observar que no núcleo segregado localizado na área central predomina o isolamento dos chefes de família com rendimentos mais elevados, enquanto os núcleos segregados periféricos são caracterizados pelo isolamento dos chefes com rendimentos inferiores.

Espacialização de índices espaciais locais de segregação da cidade de São Paulo (2000)

Função gaussiana, largura de banda 500 m

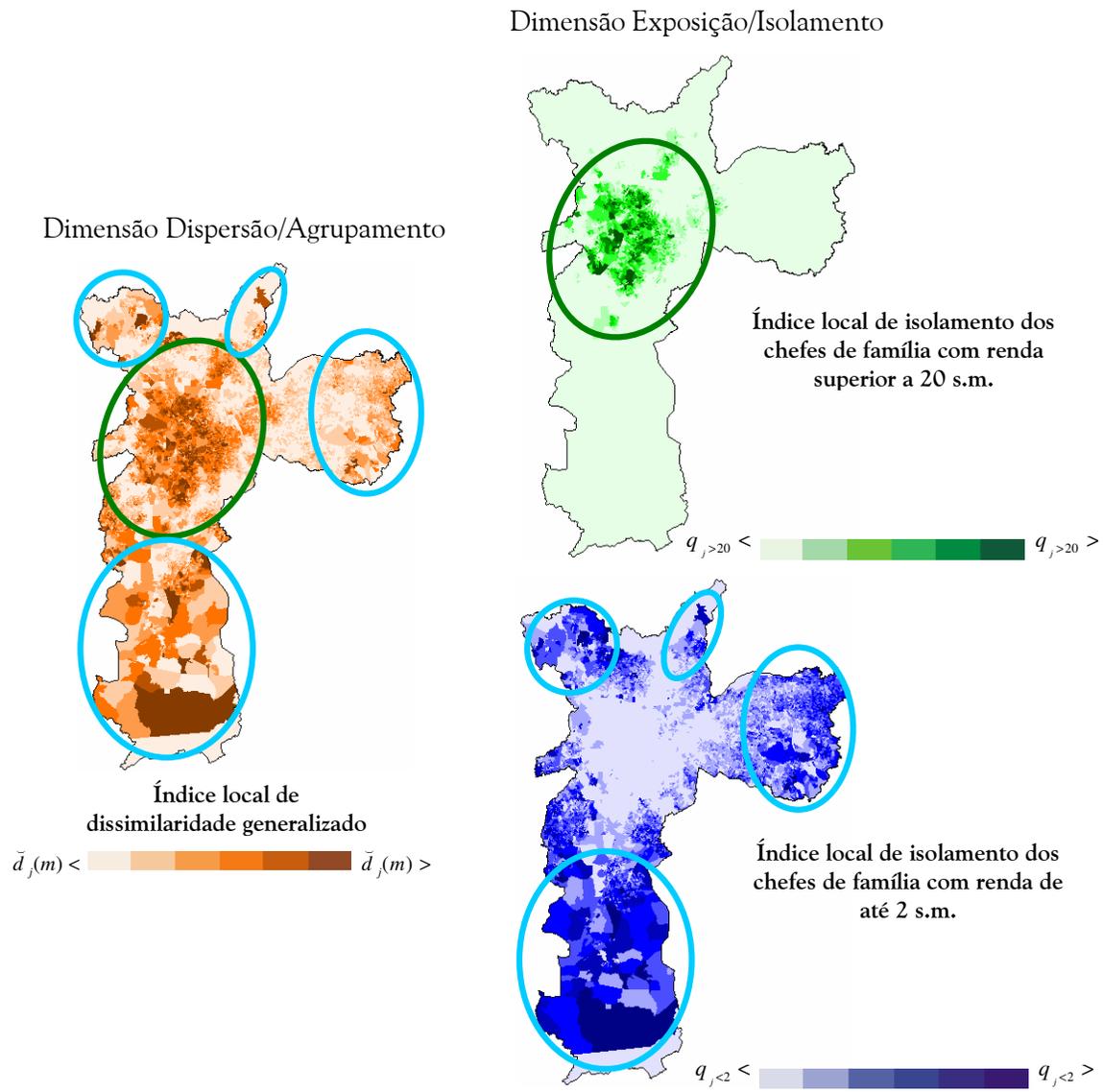


Figura 11 – Complementaridade dos índices das dimensões dispersão/agrupamento e exposição/isolamento.

6 Conclusões

Índices de segregação urbana são ferramentas importantes para a compreensão de padrões e tendências da segregação. No entanto, a maioria dos trabalhos sobre segregação permanece alheia a este recurso ou baseia-se na aplicação de índices muito simples, que são incapazes de capturar o fenômeno de maneira apropriada. Este capítulo apresenta índices de segregação alternativos que buscam minimizar as limitações dos índices mais populares. Para tanto, índices globais de segregação que incorporam informações geográficas em suas formulações foram construídos a partir da extensão de índices existentes.

A abordagem proposta para a construção destas medidas espaciais baseia-se nos conceitos de *localidade* e *intensidade populacional local*, o que possibilita a utilização de qualquer estimador kernel no computo dos índices. Esta flexibilidade permite a adoção de diferentes conceitos de *interação* entre grupos populacionais, assim como análises em distintas escalas. Considerando o fato de que as duas dimensões de segregação postuladas por Reardon e O'Sullivan (2004) contribuem de maneira diferenciada para a compreensão deste fenômeno, foram construídos índices espaciais para cada uma delas. Cabe salientar ainda que a abordagem utilizada é genérica e pode ser adotada na extensão de outros índices não-espaciais.

O Capítulo também apresenta índices locais de segregação, obtidos a partir da decomposição dos índices espaciais globais. Estes índices podem ser espacializados na forma de mapas e permitem a visualização da intensidade da segregação em distintos locais da cidade. Este Capítulo recomenda ainda o uso de testes de pseudo-significância para a validação dos índices espaciais de segregação. Embora este teste não suporte afirmações sobre a intensidade da segregação em determinada área de estudo, possibilita uma maneira confiável de testar se um arranjo populacional é segregado ou não. Os testes de pseudo-significância também podem ser aplicados sobre índices locais, o que permitiria identificar as áreas da cidade que apresentam níveis significativos de segregação.

Referências Bibliográficas

- ANSELIN, L. Local Indicators of Spatial Association - LISA. **Geographical Analysts**, v. 27, n.2, p. 93-115, 1995.
- ANSELIN, L. **GeoDa 0.9 User's Guide**. Urbana-Champaign: University of Illinois, 2003. 82 p.
- ATKINSON, A. B. On the measures of inequality. **Journal of Economic Theory**, v. 2, n.3, p. 244-263, 1970.
- BELL, W. A Probability Model for the Measurement of Ecological Segregation. **Social Forces**, v. 32, p. 337-364, 1954.
- BOISSO, D.; HAYES, K.; HIRSCHBERG, J.; SILBER, J. Occupational segregation in the multidimensional case. **Journal of Econometrics**, v. 61, n.1, p. 161-171, 1994.
- CALDEIRA, T. **Cidade de Muros. Crime, segregação e cidadania em São Paulo**. São Paulo: Ed. 34/ Edusp, 2000. 399 p.
- COWELL, F. A. **Measuring Inequality**. Oxford: Philip Allan, 1977. 193 p.
- DUNCAN, O. D.; DUNCAN, B. A methodological analysis of segregation indexes. **American Sociological Review**, v. 20, n.3, p. 210-217, 1955.
- FREUND, J. E.; PERLES, B. M. **Statistics: A First Course**. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 532 p.
- JAKUBS, J. F. A distance-based segregation index. **Journal of Socio-Economic Planning Sciences**, v. 61, p. 129-136, 1981.

- JARGOWSKY, P. A. Take the money and run: Economic segregation in U.S. metropolitan areas. *American Journal of Sociology*, v. 61, n.6, p. 984-999, 1996.
- LUCO, C. A.; RODRÍGUEZ, J., 2003, **Segregación residencial en áreas metropolitanas de América Latina: magnitud, características, evolución e implicaciones de política**, in UNIDAS, N., ed., Población y desarrollo, Santiago de Chile, Proyecto Regional de Población CELADE/Fondo de Población de las Naciones Unidas (UNFPA).
- MASSEY, D. S.; DENTON, N. A. Trends in the Residential Segregation of Blacks, Hispanics, and Asians: 1970-1980. *American Sociological Review*, v. 52, n.6, p. 802-824, 1987.
- MASSEY, D. S.; DENTON, N. A. The dimensions of residential segregation. *Social Forces*, v. 67, n.2, p. 281-315, 1988.
- MORGAN, B. S. A distance-decay interaction index to measure residential segregation. *Area*, v. 15, p. 211-216, 1983.
- MORRIL, R. L. On the measure of spatial segregation. *Geography Research Forum*, v. 11, p. 25-36, 1991.
- OPENSHAW, S. **The Modifiable Areal Unit Problem**. Norwich, United Kingdom: Geo Books, 1984.
- RAMOS, F. R. **Análise Espacial de Estruturas Intra-Urbanas: O Caso de São Paulo**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2002. Dissertação de Mestrado, Mestrado em Sensoriamento Remoto, 2002.
- REARDON, S.; O'SULLIVAN, D. Measures of Spatial Segregation. *Sociological Methodology*, v. 34, n.1, p. 121-162, 2004.
- REARDON, S. F.; FIREBAUGH, G. Measures of multigroup segregation. *Sociological Methodology*, v. 32, n.1, p. 33-67, 2002.
- RODRÍGUEZ, J., 2001, **Segregación residencial socioeconómica: que és?, cómo de mide?, que está pasando?, importa?**, Santiago de Chile, Centro Latinoamericano y Caribeño de Demografía (CELADE), Division de Población. Proyecto Regional de Población CELADE - FNUAP (Fondo de Población de las Naciones Unidas). p. 80.
- SABATINI, F.; CÁCERES, G.; CERDÁ, J. Segregación residencial en las principales ciudades chilenas: tendencias de las tres últimas décadas y posibles cursos de acción. *EURE (Santiago)*, v. 27, n.82, p. 21-42, 2001.
- SAKODA, J. A generalized index of dissimilarity. *Demography*, v. 18, n.2, p. 245-250, 1981.
- SCHÖLKOPF, B.; SMOLA, A. J. **Learning with Kernels : Support Vector Machines, Regularization, Optimization, and Beyond**. Cambridge, MA ; London: MIT Press, 2002. 626 p.
- SILVERMAN, B. W. **Density estimation for statistics and data analysis**. London ; New York: Chapman and Hall, 1986. 175 p.
- TELLES, E. E. Residential segregation by skin color in Brazil. *American Sociological Review*, v. 57, n.2, p. 186-198, 1992.
- TELLES, E. E. Structural sources of socioeconomic segregation in Brazil. *American Journal of Sociology*, v. 100, n.5, p. 199-223, 1995.
- THEIL, H.; FINIZZA, A. J. A note on the measurement of racial integration of schools by means of informational concepts. *Journal of Mathematical Sociology*, v. 1, n.3, p. 187-194, 1971.
- TORRES, H. D. G. Segregação Residencial e Políticas Públicas: São Paulo na década de 1990. *Revista Brasileira de Ciências Sociais*, v. 19, n.54, p. 41-56, 2004.
- WHITE, M. J. The measurement of spatial segregation. *American Journal of Sociology*, v. 88, n.4, p. 1008-1018, 1983.
- WONG, D. W. S. Spatial indices of segregation. *Urban Studies*, v. 30, n.3, p. 559-572, 1993.

WONG, D. W. S. Measuring multiethnic spatial segregation. **Urban Geography**, v. 19, n.1, p. 77-87, 1998.

ARMADILHAS DE DESIGUALDADE: DETECÇÃO E DINÂMICA ESPACIAL, TRAJETÓRIA DAS DESIGUALDADES SOCIAIS

PATRÍCIA CARNEIRO GENOVEZ¹
ANTÔNIO MIGUEL VIEIRA MONTEIRO¹
GILBERTO CÂMARA¹
CORINA DA COSTA FREITAS¹

1. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens (DPI)
Caixa Postal 515 – 12201 – 097 – São José dos Campos – SP, Brasil
(genovez@dpi.inpe.br, miguel@dpi.inpe.br, gilberto@dpi.inpe.br, corina@dpi.inpe.br)

1 – Armadilhas de Desigualdade: Concepções Metodológicas

A recorrência de regimes espaciais de desigualdade em diferentes organizações sociais têm sido comum ao longo da história da humanidade (Bowles, 2001). Esta “eficiência social”, ou “sucesso evolutivo” da desigualdade, constatada a partir da persistência destes arranjos sociais, estabelece uma trajetória, marcada por processos cíclicos que sobrepujam determinadas formas de organização social em detrimento de outras. À luz de teóricos como Talcott Parsons (1964) e **Gunnar Myrdal (1966)**, que procuraram entender as diferentes trajetórias econômicas percorridas por nações ricas e pobres, pôde-se perceber a recorrência histórica inerente ao fenômeno. Esta recorrência é fortemente determinada pelas condições iniciais, e intrinsecamente ligada ao desenvolvimento histórico destas nações, de maneira que, a presença de desvantagens múltiplas tende a ser intensificada pelo sistema. Este mecanismo de retroalimentação que provoca a persistência de características positivas ou negativas que tendem a reforçar a si mesmas é denominado “*armadilha de pobreza*”, e pode levar organizações sociais a persistirem durante longos períodos, ou indefinidamente, presas em trajetórias de pobreza (<[http://discuss.santafe.edu/poverty traps/](http://discuss.santafe.edu/poverty%20traps/)>, 2002).

A interpretação dos fragmentos urbanos¹ (Genovez 2002; Genovez, et al. 2003) sob o arcabouço teórico das “*armadilhas de pobreza*” é uma possibilidade interessante, porque busca ampliar a compreensão das possíveis causas da persistência dos regimes espaciais de pobreza (Morenoff et. al, 2001; Sampson e Morenoff, 2001). Entretanto, no presente capítulo, o termo “*armadilhas de pobreza*” mostra-se inadequado por referir-se unicamente a dimensão renda. A fim de capturar as múltiplas dimensões que compõe o índice exclusão/inclusão social (Sposati, 1996; Sposati, 2000a; Sposati, 2000b), o termo “*armadilhas de desigualdade*” mostra-se mais adequado à proposta, tendo como objetivo investigar a persistência, ou não, de regimes espaciais de exclusão/inclusão social nos fragmentos urbanos, definidos pela combinação de múltiplas variáveis.

A característica principal das armadilhas refere-se à geração de processos cíclicos, a partir dos quais estas variáveis reforçam positiva ou negativamente o sistema em que se inserem, provocando mudanças, ou mantendo-o estável em relação à sua condição inicial de exclusão/inclusão social. A hipótese deste trabalho sugere que a presença das “*armadilhas de*

¹ Fragmentos Urbanos são conjuntos de setores censitários agrupados segundo sua característica predominante, exclusão, inclusão social ou transição entre a exclusão/inclusão social.

*desigualdade*²” poderá ser constatada, indiretamente, através da persistência de agrupamentos de exclusão/inclusão social dotados de dependência espacial positiva condicionados, principalmente, pelas variáveis estatisticamente significativas para o modelo adotado, em sua condição inicial, a medida de exclusão/inclusão social em 1991 (IBGE, 1991).

Segundo Sampson e Morenoff (2001), diagnosticadas as variáveis determinantes para a persistência das desigualdades, pode-se traçar hipóteses sobre como determinados fragmentos urbanos estão presos em trajetórias de exclusão ou de inclusão social, indicando a presença de “*armadilhas de desigualdade*”. As análises realizadas para São José dos Campos em 1991 (Genovez et al., 2001; Genovez, 2002; Genovez et. al, 2003) mostraram que, embora o índice de exclusão/inclusão social seja composto por múltiplas dimensões, há variáveis determinantes comuns tanto nos fragmentos dotados de exclusão quanto nos fragmentos dotados de inclusão social. Dentre estas variáveis, o índice de desenvolvimento educacional foi o mais significativo em relação ao índice de exclusão/inclusão social sendo, com base no modelo, a variável determinante na persistência das desigualdades socioespaciais em 1991.

Desta forma, o arcabouço teórico das “*armadilhas de desigualdade*” considera o fenômeno da segregação socioespacial como um sistema dinâmico, onde as características iniciais e a trajetória histórica de uma determinada armadilha influenciam a potencialidade deste sistema mudar de estado ou permanecer estável em relação a uma dada situação de exclusão/inclusão social. Comparando resultados pretéritos obtidos em 1991 e 1996 (IBGE, 1996), esta abordagem procura estimar uma provável tendência para a exclusão/inclusão social entre 1991 e 2000 (IBGE, 2000) utilizando como parâmetro a situação educacional em 1996. A hipótese fundamenta-se na afirmação de que, devido a maior significância estatística constatada para o índice de Desenvolvimento Educacional em 1991 (Genovez, 2002), quanto melhor a situação educacional em um determinado fragmento em 1996, maior será o seu “potencial de mobilidade” em relação à linha de referência de inclusão (LRI) em 2000. A Figura 1.1 ilustra as etapas realizadas para a detecção das armadilhas de desigualdade.

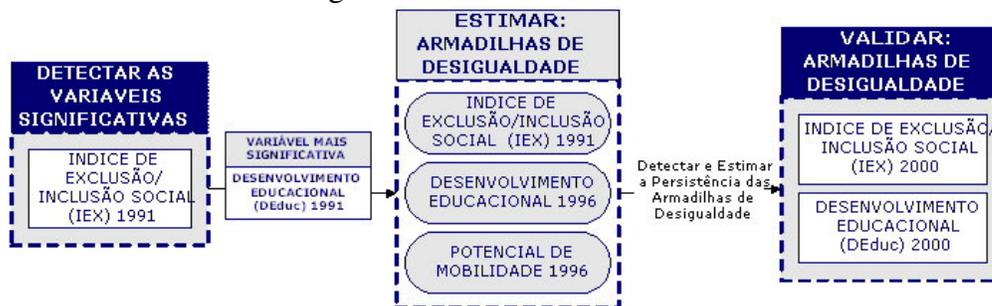


Figura 1.1 – Etapas realizadas para a detecção das armadilhas de desigualdade.

Neste contexto, buscam-se respostas a questões importantes para esta investigação:

1. A utilização de variáveis relacionadas à educação em 1996 apresenta, de fato, potencial para estimar possíveis tendências de exclusão/inclusão social em 2000?

² Fragmentos urbanos são referências concretas, visíveis através da análise espacial dos dados. As “*armadilhas de desigualdade*” são referências conceituais, não mensuráveis ou espacializadas a partir das técnicas utilizadas. Entretanto, a detecção dos fragmentos urbanos pode ser uma forma indireta de indicar a presença e a persistência de armadilhas de desigualdade. Este trabalho considera a persistência de fragmentos urbanos ao longo do tempo como um indicativo da presença de “*armadilhas de desigualdade*”.

2. A localização dos fragmentos urbanos dotados de exclusão social, ou seja, de menor “potencial de mobilidade” em 1991 corresponde à mesma localização dos fragmentos dotados de pior situação educacional, em 1996?

As respostas a estas questões trarão embasamento suficiente para constatar se há, ou não, persistência de padrões espaciais de desigualdade entre 1991 e 2000 e se estes padrões são, de fato, condicionados pelas condições iniciais determinantes para o fenômeno em 1991. Como a variável determinante em 1991 refere-se à educação, mediante resultados provenientes da Contagem 1996 e do Censo 2000, será possível constatar se esta condição inicial, de fato impele os fragmentos a trajetórias cíclicas, onde a persistência de desigualdades será constatada através da recorrência dos regimes espaciais de inclusão ou de exclusão social. Desta forma, a persistência de fragmentos de exclusão/inclusão social, condicionados pela variável desenvolvimento educacional, entre 1991, 1996 e 2000 é considerada uma evidência da formação e consolidação de “*armadilhas de desigualdade*”.

2 – Análise de Dados e Metodologia

As análises têm como parâmetro inicial o cálculo do Desenvolvimento Educacional para 1996, considerando como referência as faixas de anos de estudo da população. Em 1991 este índice foi calculado considerando os anos de estudo dos chefes de família. Estas diferenças respondem aos objetivos das análises propostas. Em 1991 busca-se gerar um índice que reflita os padrões de exclusão/inclusão social vigentes, neste sentido, a utilização dos anos de estudo dos chefes de família enfatizaria melhor as diferenças, restringindo o universo de análise, à medida que as características da família tendem a seguir o padrão dos chefes de família. Em 1996 o objetivo é gerar um índice que possibilite estimar perspectivas de mudança, neste sentido, utilizar o universo de chefes de família não se mostra funcional, porque um intervalo de cinco anos não provoca mudanças significativas na situação educacional dos mesmos os quais, em sua maioria, já ocupam um lugar no mercado de trabalho. A Figura 2.1 apresenta a espacialização do índice de desenvolvimento educacional para 1991 e 1996.

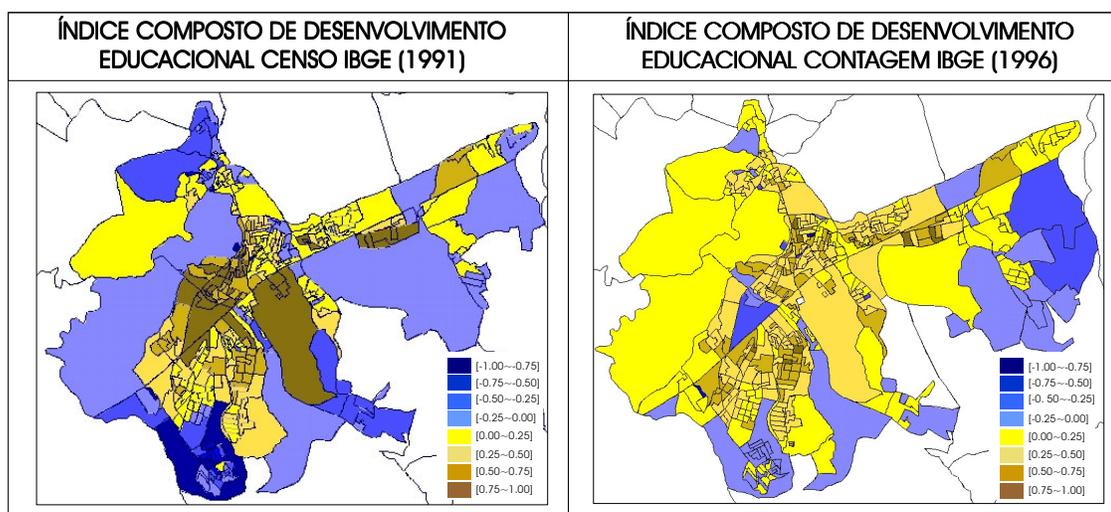


Figura 2.1 – Espacialização do Desenvolvimento Educacional para 1991 e 1996.

Embora hajam diferenças relacionadas às variáveis componentes deste índice em 1996, sua utilização é importante para verificar se os fragmentos urbanos tendem a manter o mesmo padrão espacial detectado em 1991 para a exclusão/inclusão social e para o desenvolvimento educacional.

Os mapas mostram que a segregação socioespacial evidenciada pelo desenvolvimento educacional dos chefes de família é bem mais acentuada quando comparada a da população, entretanto a polarização das desigualdades no sentido centro-periferia tende a se manter. Estas afirmações podem ser investigadas através da aplicação da análise espacial de áreas aos índices de exclusão/inclusão social 1991 e desenvolvimento educacional 1991 e 1996. Os resultados derivados destas análises permitem verificar se os fragmentos urbanos de exclusão/inclusão social detectados em 1991 persistem em 1996 em função da dependência espacial existente para o conjunto de índices.

Os gráficos presentes na Figura 2.2 são um indicativo inicial da coerência desta proposta evidenciando uma relação significativa entre o Desenvolvimento Educacional em 1991 e em 1996 com coeficiente de correlação (r_c) de 0,6753, e entre o Índice de Exclusão/Inclusão Social em 1991 e o Desenvolvimento Educacional 1996 com $r_c = 0,6711$. Estes resultados sugerem que o padrão das desigualdades sociais polarizado no sentido centro-periferia observado em 1996 tende a ser semelhante ao padrão obtido em 1991, o qual pode persistir em 2000.

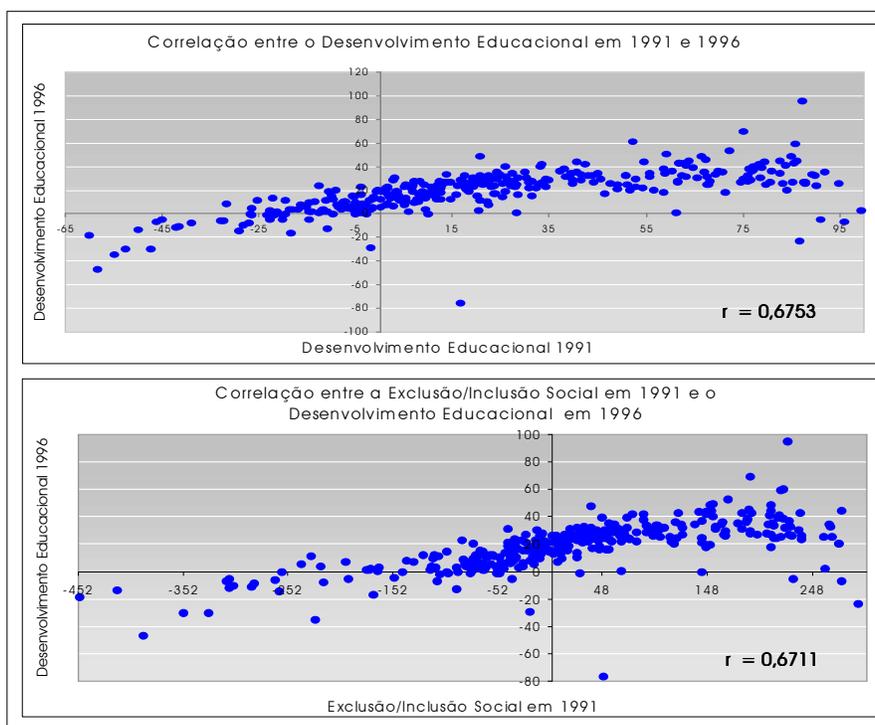


Figura 2.2 – Correlação entre o Des. Educacional em 1991 e em 1996 e entre o Índice de Exclusão/Inclusão Social em 1991 e o Desenvolvimento Educacional em 1996.

A Figura 2.3 apresenta os resultados provenientes do Índice Global de Moran (IGM) e da Média Móvel (MMo) juntamente com os índices de associação espacial local (LISA) *Box Map* (BM),

Lisa Map (LM) e *Moran Map* (MM), as áreas assinaladas com traço contínuo indicam certa estabilidade e as pontilhadas indicam presença de transformação (Anselin, 1995; Bailey & Gatrell, 1995; Câmara et al., 2000; Fisher et al., 1996).

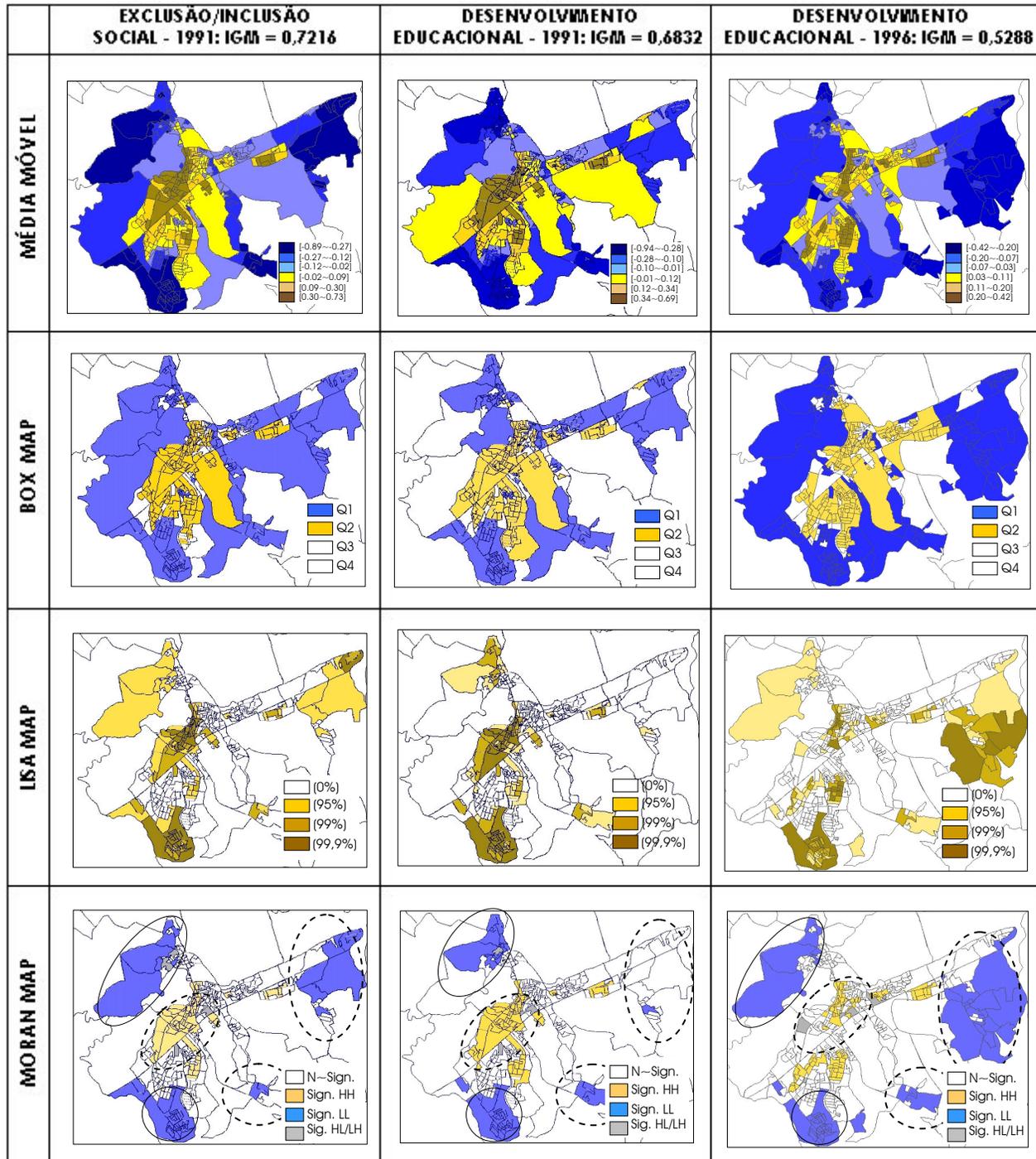


Figura 2.3 – Análise espacial dos índices de exclusão/inclusão social (1991), desenvolvimento educacional 1991 e 1996.

O IGM indica associação espacial positiva para os três índices variando entre 0,7216 e 0,5288, resultado que evidencia que o espaço é condicionante das desigualdades socioterritoriais. A MMO indica tendências semelhantes de polarização das desigualdades no sentido centro-periferia, com diferenças significativas na região central. Provavelmente, porque em 1991 a utilização dos anos de estudo para os chefes de família traz consigo uma alta dependência espacial à medida que, para um chefe de família se estabelecer nesta região da cidade, com base nos dados censitários, é necessário uma razoável estabilidade econômica e conseqüentemente um bom desenvolvimento educacional. Enquanto que em 1996, a utilização da população contém em si, além dos chefes de família já estabelecidos, a parcela da população que ainda não concluiu os estudos, resultando em uma alta variabilidade de anos de estudo e, conseqüentemente, uma reduzida dependência espacial.

Esta redução de associação espacial entre as variáveis no centro da cidade produz uma diminuição do *cluster* de inclusão social existente em 1991, visível no MM, tornando-o não significativo em 1996. Em contrapartida, os *clusters* de exclusão social tendem a manter sua localização. Este fato reforça a hipótese de que a alta dependência espacial dos fragmentos dotados de exclusão social é reforçada em função das condições iniciais determinantes ao fenômeno, ou seja, educação levando-os a persistirem em trajetórias de exclusão social (Sampson & Morenoff, 2001).

Estas constatações são comprovadas ao longo dos demais índices, entretanto, embora os *clusters* de exclusão social apresentem semelhança quanto à localização, há uma significativa diferença relacionada à extensão do fragmento Leste propagando-se na direção Sudeste. O desenvolvimento educacional em 1991 indica uma tendência à formação deste *cluster* de exclusão social a Leste, visível no BM, entretanto, este é considerado como não significativo pelo LM.

A consolidação deste *cluster* como significativo em 1996 – visível no MM - deve-se a um aumento considerável da população que, conseqüentemente, originou a subdivisão do antigo setor censitário 24 (considerado não urbano em 1991) em 6 novos setores (NS) considerados urbanos em 1996, aumentando o tamanho do fragmento Leste.

Os resultados espacializados na Figura 2.3 mostram que os padrões espaciais dos fragmentos urbanos presentes no desenvolvimento educacional em 1996 assemelham-se mais a exclusão/inclusão social, do que ao desenvolvimento educacional em 1991, o que pode ser mais um indicativo da possibilidade de utilização dos dados educacionais para se estimar o potencial de mobilidade associado a exclusão/inclusão social em 2000. Entretanto, avaliarmos a situação educacional apenas através do índice de desenvolvimento educacional não se mostra suficiente para gerar uma estimativa criteriosa sobre o potencial de mobilidade dos fragmentos de exclusão/inclusão social para 2000.

A Contagem IBGE (1996) possui diversos dados relacionados à educação da população. Além dos anos de estudo, há uma seqüência de dados relacionados à frequência escolar que se estende a todas as pessoas com 4 ou mais anos de idade. A frequência escolar mostra-se um dado interessante por possuir medidas associadas à situação educacional atual e cumulativa. A primeira considera como frequência escolar as pessoas que na data da Contagem estavam cursando o Sistema de Ensino Brasileiro nas seguintes categorias: Pré-escola, Fundamental, Supletivo,

Médio, Superior, Cursinho e Mestrado/Doutorado. A segunda reúne as pessoas que na data da Contagem não estavam freqüentando a escola, mas que já freqüentaram no passado em relação a todos os níveis educacionais acima citados.

Neste contexto, a Contagem apresenta uma riqueza de dados relacionados à educação que não se encontra no Censo Demográfico 1991. Esta diversidade de informações será utilizada para especificar a situação educacional já parcialmente indicada pelo Desenvolvimento Educacional em 1996. Para tal, elaborou-se um índice denominado Potencial de Mobilidade, composto por dois outros índices - igualmente compostos - denominados Normalidade Educacional e Mobilidade Complementar.

Estes índices têm como numerador o total da população cursando determinado nível de ensino e por denominador o total de população existente na faixa de idade normal para cursar o referido nível, ambos disponíveis por setor censitário. A idealização dos parâmetros para o cômputo destes indicadores teve como embasamento a Legislação Educacional Federal, Estadual e Municipal para torná-los mais coerentes com a realidade educacional do país e do Município.

2.1 - Índice Composto de Potencial de Mobilidade

2.1.1 – Índice Composto de Normalidade Educacional

O índice de Normalidade Educacional é composto pelo nível educacional básico, pela pré-escola, pelo ensino fundamental, pelo ensino médio e pelo nível superior (LDB³, Título V, Capítulo I, Artigo 21, 1996). A definição das faixas etárias correspondentes a cada nível educacional teve como fundamento o capítulo III, seção I da Constituição do Estado de São Paulo (1989) que prevê: (1) A duração de três anos para a pré-escola oferecida a crianças de 4 à 6 anos de idade; (2) A duração de oito anos para o ensino fundamental permitindo a matrícula de crianças com sete anos completos ou a completar.

Tendo como base estes parâmetros, foram estabelecidas as faixas etárias ideais correspondentes à duração dos níveis de ensino componentes deste índice. Desta forma, a população que está cursando a pré-escola, teria como intervalo ideal para o início e o término, a faixa etária entre 4 e 6 anos de idade, para o fundamental esta faixa estaria entre 6 e 14 anos, para o médio entre 14 e 17 e para o nível superior entre 18 e 25 anos de idade.

Como estes índices possuem características positivas e negativas, para associá-los à escala de -1 a +1 é necessário estipular um limiar para cada um, onde acima se considera positivo e abaixo negativo, tendo como base o método para cálculo do índice de exclusão/inclusão social baseado na definição dos Padrões de Referência de Inclusão (Genovez, 2002; Sposati, 1996; Sposati, 2000a; Sposati, 2000b). Uma situação de normalidade educacional ideal teria como parâmetro que no mínimo 90% do total da população, relacionada à faixa etária ideal para cada nível de ensino, estivesse cursando a referida série. Entretanto, esta situação ideal é extremamente hipotética e não acontece na realidade espacial dos dados, de tal maneira que a espacialização dos índices gerados a partir deste parâmetro mostra-se inviável para as análises, impossibilitando identificar as desigualdades educacionais existentes na cidade.

³ Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional (1996).

Conseqüentemente, buscou-se estabelecer outros parâmetros para os índices relacionados à Normalidade Educacional tendo por embasamento a Legislação Educacional e a disponibilidade de equipamentos de ensino público presentes em São José dos Campos.

A Legislação Federal (Capítulo 3, Seção I, Artigo 208, 1988), Estadual (Capítulo 3, Seção I, Artigo 249, 1989) e Municipal analisada pela Lei Orgânica (Capítulo 4, Seção I, Artigo 315, 1990), bem como o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado (item 3.4.2, a2, 1994) de São José dos Campos, versam sobre a garantia de gratuidade e obrigatoriedade para o ensino fundamental e evidenciam dados sobre a distribuição dos equipamentos urbanos de ensino. Paralelamente, a política de Municipalização do ensino, iniciada para o ensino fundamental, gerou um número diferenciado de equipamentos de ensino⁴. São José dos Campos apresenta 70 escolas destinadas ao ensino infantil (EMEI, NEI e EMEIPG), 102 destinadas ao ensino fundamental (EEPG, EEPSG, EEPGA, EMPG E EMEIPG) e apenas 30 ao ensino médio (EEPSG), sendo que no município há apenas universidades particulares, com exceção de um campus da UNESP destinado apenas ao curso de Odontologia (Plano Diretor, item 3.4.2, d.1, 1994). A Figura 2.4 apresenta a distribuição dos equipamentos de ensino de acordo com as categorias citadas acima.

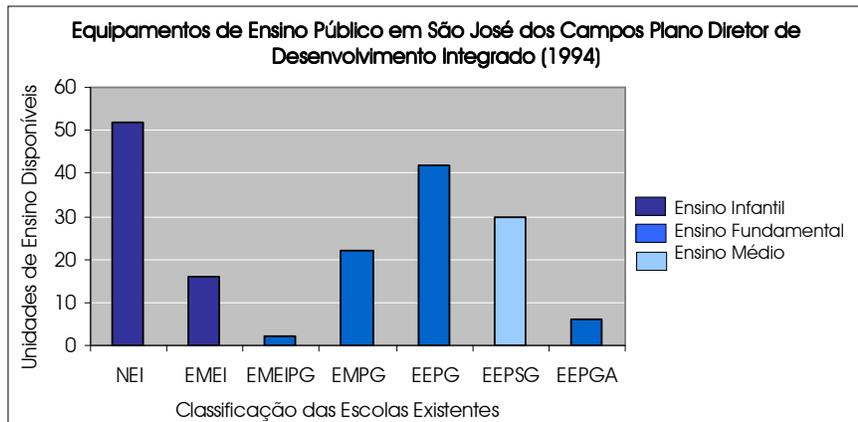


Figura 2.4 – Equipamentos de Ensino Público disponíveis segundo o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado – São José dos Campos (1994).

Portanto, levando em consideração a ênfase destinada ao ensino fundamental e a importância deste, aliado ao ensino médio, para a inserção da população no mercado de trabalho, utilizou-se: (1) Para o Índice de Normalidade Educacional relacionado ao ensino fundamental um limiar mais rigoroso, onde no mínimo 80% da população entre 6 e 14 anos deve estar cursando este nível; (2) Para o Índice de Normalidade Educacional relacionado ao ensino médio este limiar cai para 60% e; (3) Para a pré-escola e para o nível superior o limiar é no mínimo de 50%. A Figura 2.5 apresenta a espacialização dos índices de Normalidade Educacional para a pré-escola, ensino fundamental, ensino médio e superior.

⁴ Escola Municipal de Ensino Infantil (EMEI), Núcleo de Ensino Infantil (NEI), Escola Municipal de Ensino Infantil e Primeiro Grau (EMEIPG), Escola Estadual de Primeiro Grau (EEPG), Escola Estadual de Primeiro e Segundo

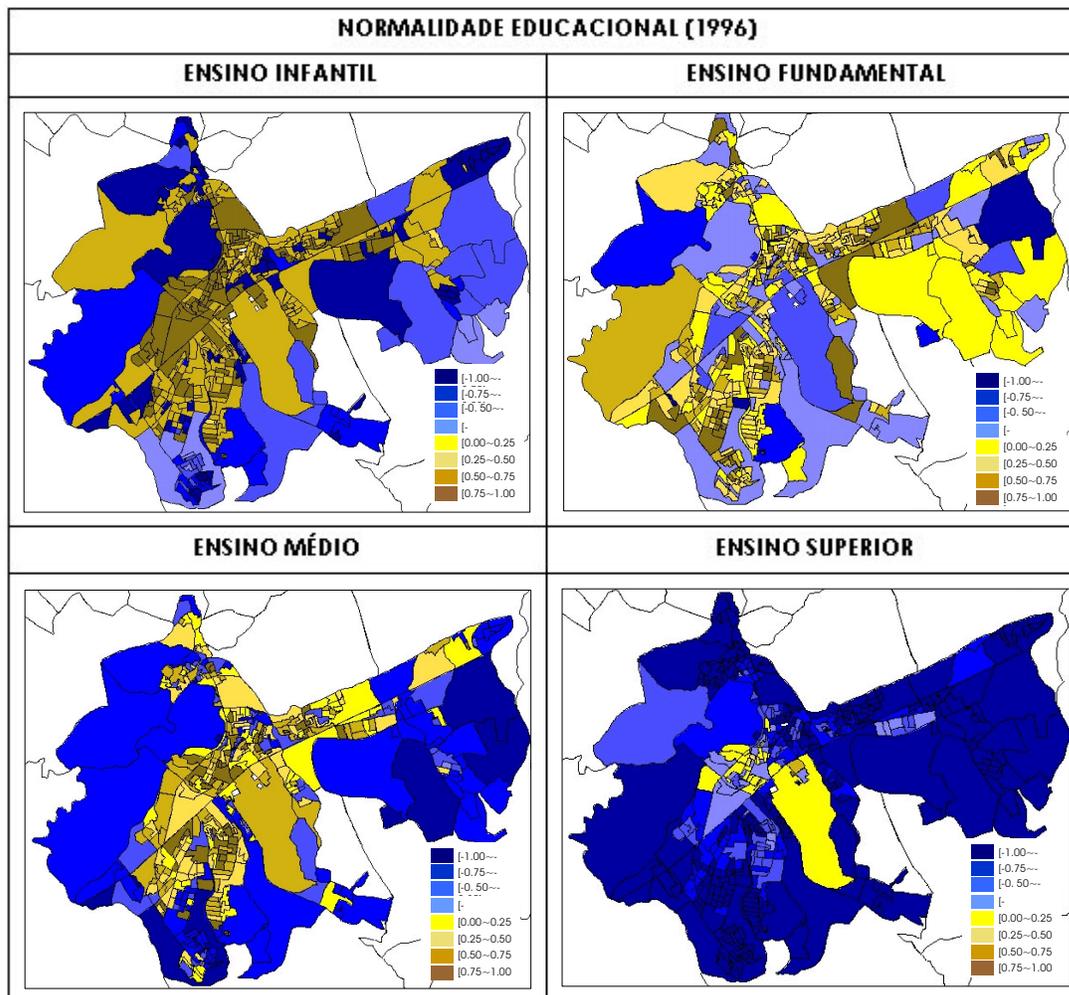


Figura 2.5 – Componentes da Normalidade Educacional para os níveis de ensino em 1996.

A frequência à pré-escola em São José dos Campos polariza-se, desigualmente, no sentido centro-periferia, mantendo os regimes espaciais de exclusão/inclusão observados em 1991. Com exceção do ensino fundamental, este padrão apresenta uma dinâmica contrária, ao longo dos índices de ensino médio e ensino superior, revelando uma gradual expansão dos *clusters* de exclusão social em direção ao centro da cidade.

O ensino fundamental possui um comportamento discrepante em relação aos demais, apresentando índices acima do limiar de inclusão expandindo o *cluster* central de inclusão social em direção as áreas periféricas da cidade, dotadas de exclusão social em 1991. O maior direcionamento de recursos para o ensino fundamental, resultando num maior número de equipamentos de ensino destinados a este nível de ensino, juntamente com a garantia de gratuidade e obrigatoriedade, pode ter provocado uma “*explosão demográfica*” nesta categoria de ensino. Estas afirmações fundamentam-se na Legislação Educacional: Constituição Federal (Capítulo III, Seção I, Artigo 211 §2º, 1988); Constituição do Estado de São Paulo (Capítulo III, Seção I, Artigos 237, 238, 240 e 249, 1989) e Lei Orgânica do Município de São José dos Campos (Capítulo V, Seção I, Artigo 315, 1990).

Graus(EEPSG), Escola Estadual de Primeiro Grau Agrupadas (EEPGA), Escola Municipal de Primeiro Grau (EMPG).

Esta “*explosão demográfica*” gerou porcentagens relativamente altas para este índice em relação aos demais, fato notado inclusive nas regiões dotadas de exclusão social (1991). Este fato influenciou diretamente os resultados dos índices compostos de Normalidade Educacional e Potencial de Mobilidade. Neste contexto, observa-se uma queda gradual na frequência escolar inversamente proporcional ao avanço dos níveis de ensino, culminando na situação de normalidade educacional obtida para o nível superior, onde na maior parte dos setores censitários que compõe a cidade há menos de 50% da população, na faixa etária considerada, cursando o nível superior. A Figura 2.6 apresenta a espacialização do índice de Normalidade Educacional.

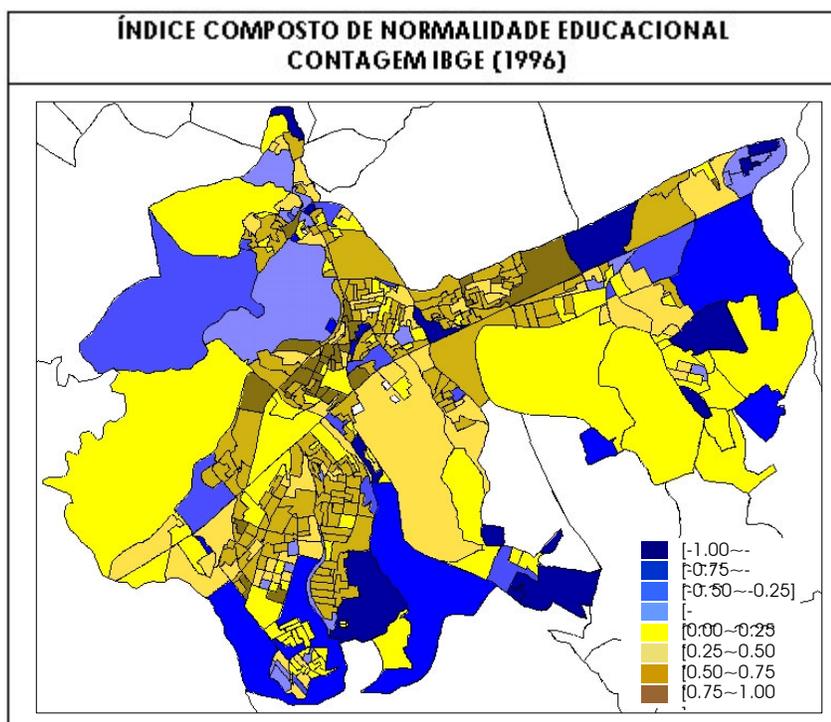


Figura 2.6 – Normalidade Educacional para os níveis de ensino em 1996.

A espacialização do índice de Normalidade Educacional apresenta tendências semelhantes às do ensino fundamental. A região central, de alta inclusão social, é influenciada pelos percentuais positivos de frequência à pré-escola, ao ensino médio e ao superior com menor ênfase. Embora as regiões mais periféricas sejam, predominantemente, negativas para a frequência ao ensino pré-escolar, médio e superior, sofrem influência positiva do ensino fundamental, classificando setores acima do limiar de referência de inclusão no índice composto final de Normalidade Educacional.

2.1.2 – Índice Composto de Mobilidade Complementar

O índice de Mobilidade Complementar considera dados complementares à situação educacional, sendo composto por:

1. Índices simples relacionados a frequência à cursinhos e à pós-graduação, ambos considerados não essenciais para a formação educacional e, portanto, considerados sempre como características positivas (0 a +1).
2. Índice de Anormalidade Educacional composto pela população que: a) nunca frequentou a escola; b) não declarou a escolaridade; c) frequentou a escola, mas não soube definir a série,

e; d) pela população que não declarou a freqüência à escola. Todos considerados como característica negativa (-1 a 0).

As faixas etárias ideais adotadas para o Índice de Mobilidade Complementar estão entre 18 e 19 para a freqüência a cursinhos, entre 21 e 70 para a pós-graduação e acima de 5 anos de idade para a situação de anormalidade educacional. A associação da escala de -1 à +1 para estes índices é realizada considerando a diferença entre as porcentagens positivas e negativas de cada índice tornando a utilização de limiares pré-definidos desnecessária (Genovez, 2002). A Figura 2.7 apresenta a espacialização dos índices de Mobilidade Complementar para a freqüência a cursinhos, pós-graduação e presença de situação de anormalidade escolar.

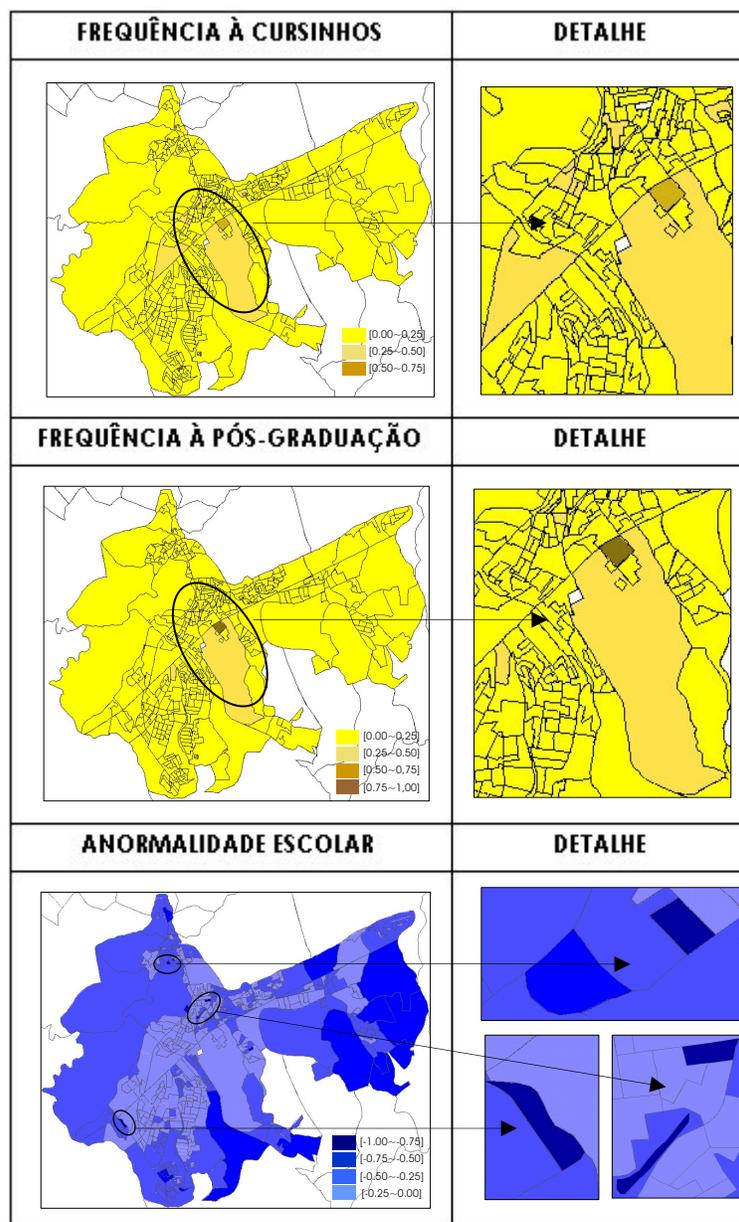


Figura 2.7- Parâmetros relacionados ao Índice de Mobilidade Complementar.

Os índices que se referem à frequência a cursinhos e pós-graduação, apresentam comportamento semelhante, com reduzidos percentuais para a cidade como um todo e alguns *outliers* localizados no centro, visíveis em detalhe na figura. Este resultado enfatiza a importância de utilizar a soma das porcentagens e não das escalas de representação no cômputo dos índices compostos de Mobilidade Complementar e de Potencial de Mobilidade, a fim de evitar representações equivocadas. Esta queda na frequência a cursinhos e à pós-graduação é uma continuação das tendências obtidas para os índices de normalidade educacional.

A situação de anormalidade educacional também não apresenta percentuais muito altos, entretanto, estão distribuídos com maior variabilidade, detectando melhor as diferenças relacionadas à distribuição espacial deste índice, mantendo o padrão de polarização centro-periferia e enfatizando os fragmentos de exclusão social. A Figura 2.8 apresenta a espacialização do índice composto de Mobilidade Complementar.

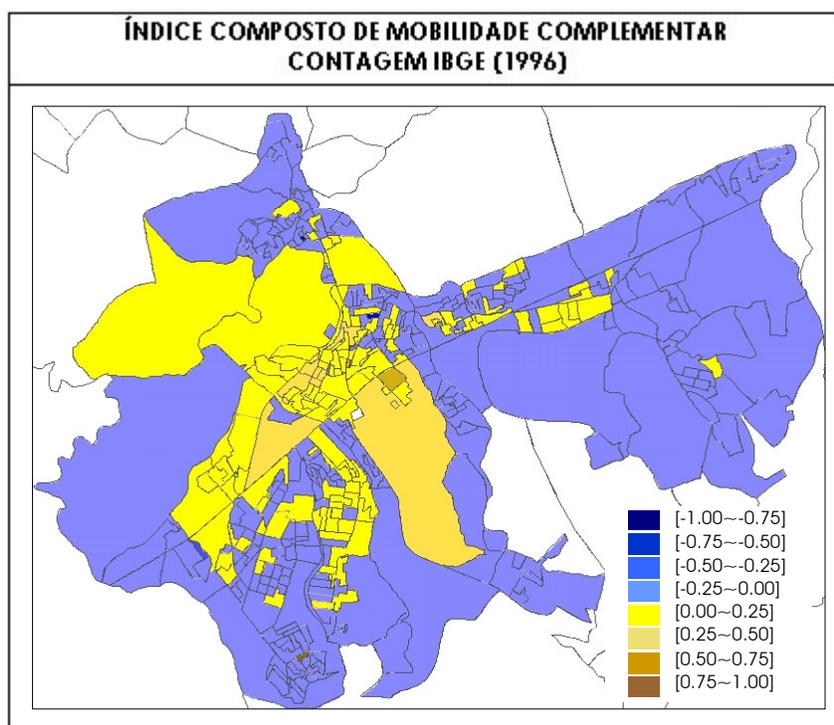


Figura 2.8 – Índice Composto de Mobilidade Complementar.

A fusão dos índices componentes da Mobilidade Complementar apresenta um resultado coerente com as tendências de segregação socioespacial observadas em 1991, sendo um indicativo de que a população localizada na região central apresenta maior potencial de mobilidade relacionado às categorias de ensino complementar e conseqüentemente uma baixa presença de situações de anormalidade educacional. Desta forma, o índice de anormalidade educacional reforça as *armadilhas* dotadas de exclusão social, com maior intensidade, nas regiões periféricas.

2.1.3 – Índice Composto de Potencial de Mobilidade

O índice de Potencial de Mobilidade, resultante da soma dos índices de Normalidade Educacional e de Mobilidade Complementar constitui, além do Desenvolvimento Educacional

em 1996, uma fonte de dados para estimar o potencial de mobilidade nas “*armadilhas de desigualdade*” em relação a LRI em 2000.

Este índice sofre grande influência do índice de Normalidade Educacional, expandindo índices positivos em direção às regiões periféricas. Esta influência se deve aos altos percentuais derivados do índice relacionado ao ensino fundamental. Estes resultados podem ser um indicativo do potencial de mobilidade em direção à inclusão social em 2000 para os setores classificados acima da LRI para o índice de Potencial de Mobilidade (1996). Entretanto, não se pode considerar que apenas a alta frequência ao ensino fundamental será propulsora de mudanças significativas nas *armadilhas* dotadas de exclusão social (1991). A Figura 2.9 apresenta a espacialização do índice de Potencial de Mobilidade.

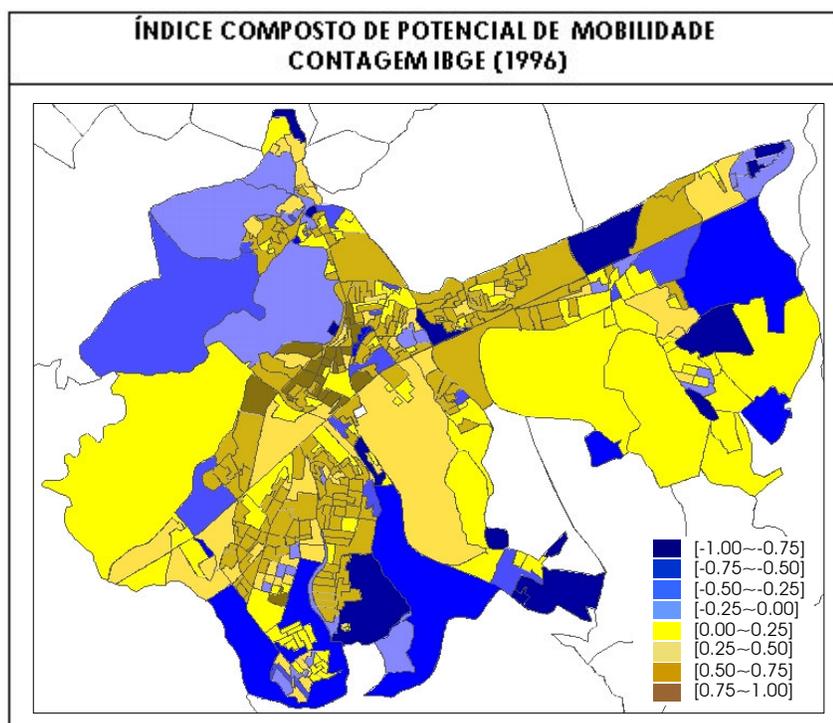


Figura 2.9 – Índice de Potencial de Mobilidade Contagem (1996).

Garantir o sucesso educacional significa democratizar o acesso e a permanência da população no sistema educacional de maneira articulada e em todos os níveis que a compõe. O processo de Municipalização restrito (até 1996) ao ensino fundamental produz índices discrepantes entre os níveis educacionais. Paralelamente, a crescente concorrência para inserção no mercado de trabalho exige formação educacional cada vez melhor, abrangendo níveis de ensino superiores ao ensino fundamental. Este fato indica que a obtenção apenas deste nível de ensino não garante modificações com intensidade suficiente para induzir o aumento do potencial de mobilidade nas *armadilhas* de exclusão social direcionando-as, de fato, à inclusão social em 2000. O Quadro 2.1 apresenta os índices, as variáveis e os limiares utilizados para a composição do Índice de Potencial de Mobilidade.

QUADRO 2.1 – ÍNDICES, VARIÁVEIS E LIMIARES CONSIDERADOS NA COMPOSIÇÃO DO ÍNDICE DE POTENCIAL DE MOBILIDADE

POTENCIAL DE MOBILIDADE	IND. COMPOSTO	INDICADORES SIMPLES	NUMERADOR	DENOMINADOR	LIMIARES	CLASSIFICAÇÃO
POTENCIAL DE MOBILIDADE	Normalidade Educacional (NE) (de -1 à +1)	NE Pré-escola (de -1 à +1)	Total de população Cursando o pré	Total população entre 4 e 6 anos de idade	Acima de 50%	Positivo (de 0 à +1)
					Abaixo de 50%	Negativo (de -1 à 0)
		NE Ensino Fundamental (de -1 à +1)	Total de população Cursando o fundamental	Total população entre 6 e 14 anos de idade	Acima de 80%	Positivo (de 0 à +1)
					Abaixo de 80%	Negativo (de -1 à 0)
		NE Ensino Médio (de -1 à +1)	Total de população Cursando o médio	Total população entre 14 e 17 anos de idade	Acima de 60%	Positivo (de 0 à +1)
					Abaixo de 60%	Negativo (de -1 à 0)
		NE Ensino Superior (de -1 à +1)	Total de população Cursando o superior	Total população entre 18 e 25 anos de idade	Acima de 50%	Positivo (de 0 à +1)
					Abaixo de 50%	Negativo (de -1 à 0)
Mobilidade Complementar (MC) (de -1 à +1)	MC Cursinho (de 0 à +1)	Total de população No cursinho	Total população entre 18 e 19 anos de idade	Positivo	(de 0 à +1)	
	MC Pós-graduação (de 0 à +1)	Total de população na pós-graduação	Total população entre 21 e 70 anos de idade	Positivo	(de 0 à +1)	
	MC Anormalidade Educacional (de -1 à 0)	Total de população em situação de anormalidade educacional	Total população > 5 anos de idade	Negativo	(de -1 à 0)	

Esta discussão torna explícita a complexidade da análise para a situação educacional em função dos índices gerados a partir de dados censitários. Analisar estes índices simples e compostos somente a partir da simples espacialização pode não fornecer embasamento suficiente para gerar uma estimativa do Potencial de Mobilidade existente nas armadilhas de desigualdade para o resultado do censo em 2000. A análise espacial de áreas pode gerar resultados mais adequados ao objetivo proposto, porque considera a relação espacial entre os dados, se há ou não dependência espacial, e se esta é estatisticamente significativa ou não.

3 – Análise Espacial do Potencial de Mobilidade para 2000

A proposta, embasada nas colocações acima, é estimar o potencial de mobilidade dos fragmentos urbanos para 2000 em função do comportamento espacial detectado para os mesmos em 1991 e em 1996.

A persistência, ou não, dos padrões de autocorrelação espacial entre 1991 e 1996 pode fornecer dados quantitativos para estimar uma progressão para o comportamento destes *clusters* em 2000, indicando a presença ou não de “*armadilhas de desigualdade*”. Como o objetivo principal é gerar uma estimativa futura, torna-se coerente considerar os fragmentos urbanos como um todo, analisando-os espacialmente através das modificações quantitativas ocorridas nas variáveis que os compõe. Neste sentido, o índice de Potencial de Mobilidade, síntese da situação educacional em 1996, será analisado prioritariamente e posteriormente comparado ao desenvolvimento educacional (1996) e a exclusão/inclusão social (1991). A Figura 3.1 apresenta a espacialização dos índices de autocorrelação espacial Média Móvel (MMo), *Box Map* (BM), *Lisa Map* (LM) e *Moran Map* (MM) para o Potencial de Mobilidade.

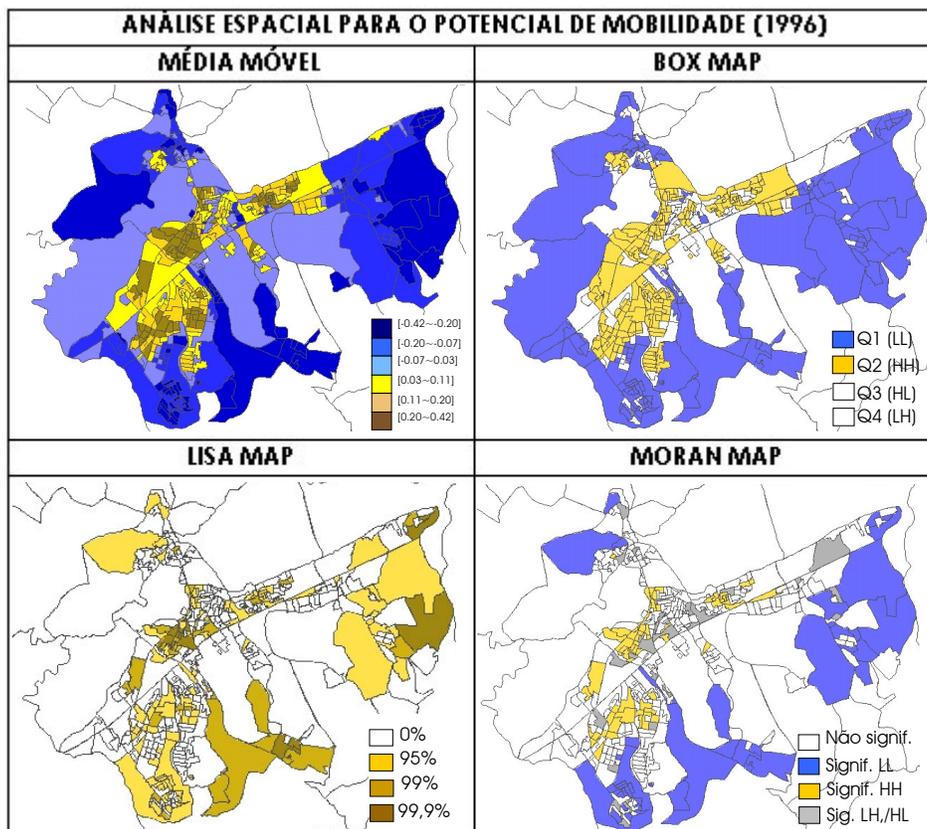


Figura 3.1 - Espacialização dos índices de autocorrelação espacial MMo, BM, LM e MM para o Potencial de Mobilidade.

Observando-se comparativamente os padrões obtidos para os índices de autocorrelação espacial acima, chegou-se a 4 interpretações possíveis para a tendência dos fragmentos em 2000, especificadas no Quadro 3.1.

QUADRO 3.1 – INTERPRETAÇÃO DAS TENDÊNCIAS DE MOBILIDADE PARA 2000 SEGUNDO RESULTADOS PROVENIENTES DA ANÁLISE ESPACIAL

SITUAÇÃO	POSSIBILIDADES PARA A ANÁLISE ESPACIAL	TENDÊNCIA 2000
A	Se o Box Map classifica como LL e o Lisa Map considera como <i>cluster</i> significativo.	Persistir ou Intensificar os Fragmentos LL (exclusão)
B	Se o Box Map classifica como HH e o Lisa Map considera como <i>cluster</i> significativo.	Persistir ou Intensificar os Fragmentos HH (inclusão)
C	Se o Box Map classifica como LL e o Lisa Map considera como <i>cluster</i> não significativo.	Permanecer estável ou diminuir os fragmentos LL (exclusão)
D	Se o Box Map classifica como HH e o Lisa Map considera como <i>cluster</i> não significativo.	Permanecer estável diminuir os Fragmentos HH (inclusão)

A seguir são apresentados exemplos de análises segundo o Quadro 3.2, utilizando como exemplo os fragmentos urbanos Sul, Leste e Central. A Figura 3.2 apresenta os índices de autocorrelação espacial para o fragmento Sul.

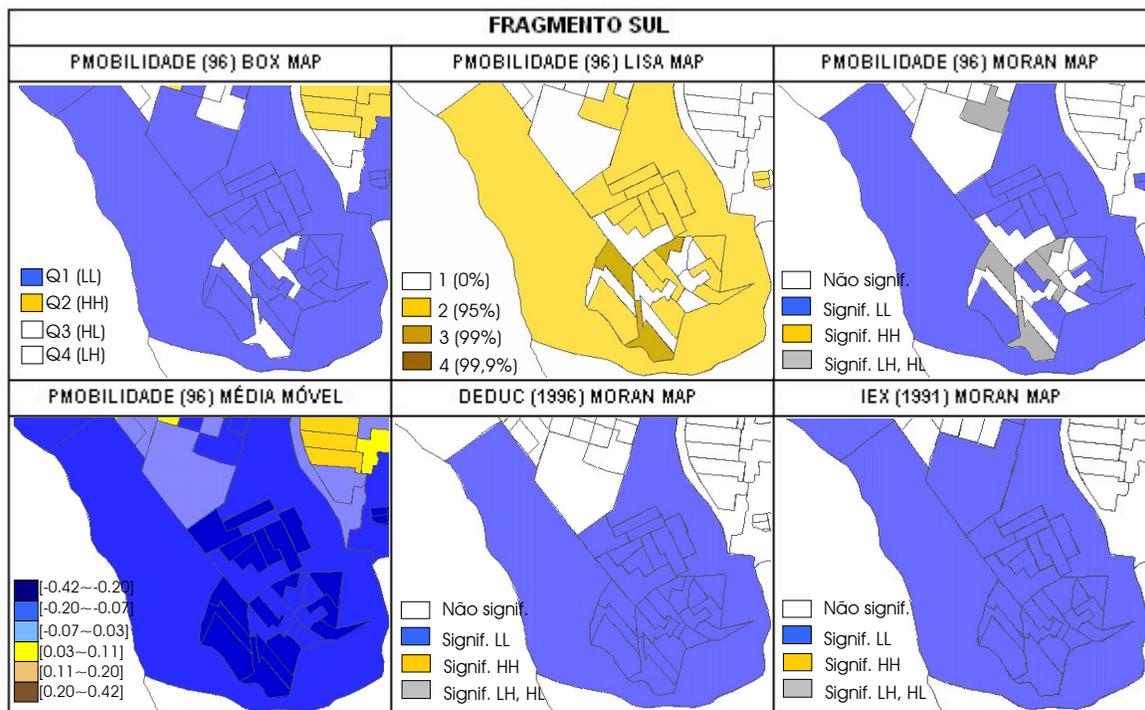


Figura 3.2 – Estimativa da tendência de exclusão/inclusão social para 2000 segundo a análise espacial de dados para o fragmento Sul.

O fragmento Sul constitui um exemplo da **situação C**, onde o *Box Map* confirma a predominância de índices negativos (*LL*), entretanto, o *Lisa Map* não considera todos os setores como significativos. Estes resultados, aliados à Média Móvel, indicam a possibilidade de persistência do regime espacial de exclusão social ou, em algumas regiões, uma tendência a mover-se em direção a LRI em 2000, reduzindo a exclusão social. A presença de setores em transição (*LH*, *HL*), considerados significativos, pode ser mais um indicativo deste potencial de mudança para 2000. Estas estimativas são enfatizadas pela permanência, sem expansão, deste *cluster* considerado significativo pelo *Moran Map* entre 1991 e 96 para os índices de exclusão/inclusão social (1991) e desenvolvimento educacional (1996), fato que reforça uma tendência à estabilidade ou à melhora em 2000.

Considerando os índices de normalidade educacional para a pré-escola e para o ensino superior, constata-se, uma trajetória de exclusão social para 2000. Entretanto, a presença de índices acima da LRI para o ensino fundamental e médio (em menor proporção) sugere, em regiões específicas, uma possível ascensão deste fragmento em direção à inclusão social em 2000. O cálculo do índice de exclusão/inclusão social para 2000 será essencial para revelar quão efetiva terá sido a prioridade dada ao ensino fundamental, revelando se apenas o investimento nesta categoria de ensino foi suficiente para mover este fragmento em direção à inclusão social. A Figura 3.3 apresenta os índices de autocorrelação espacial para o fragmento Leste.

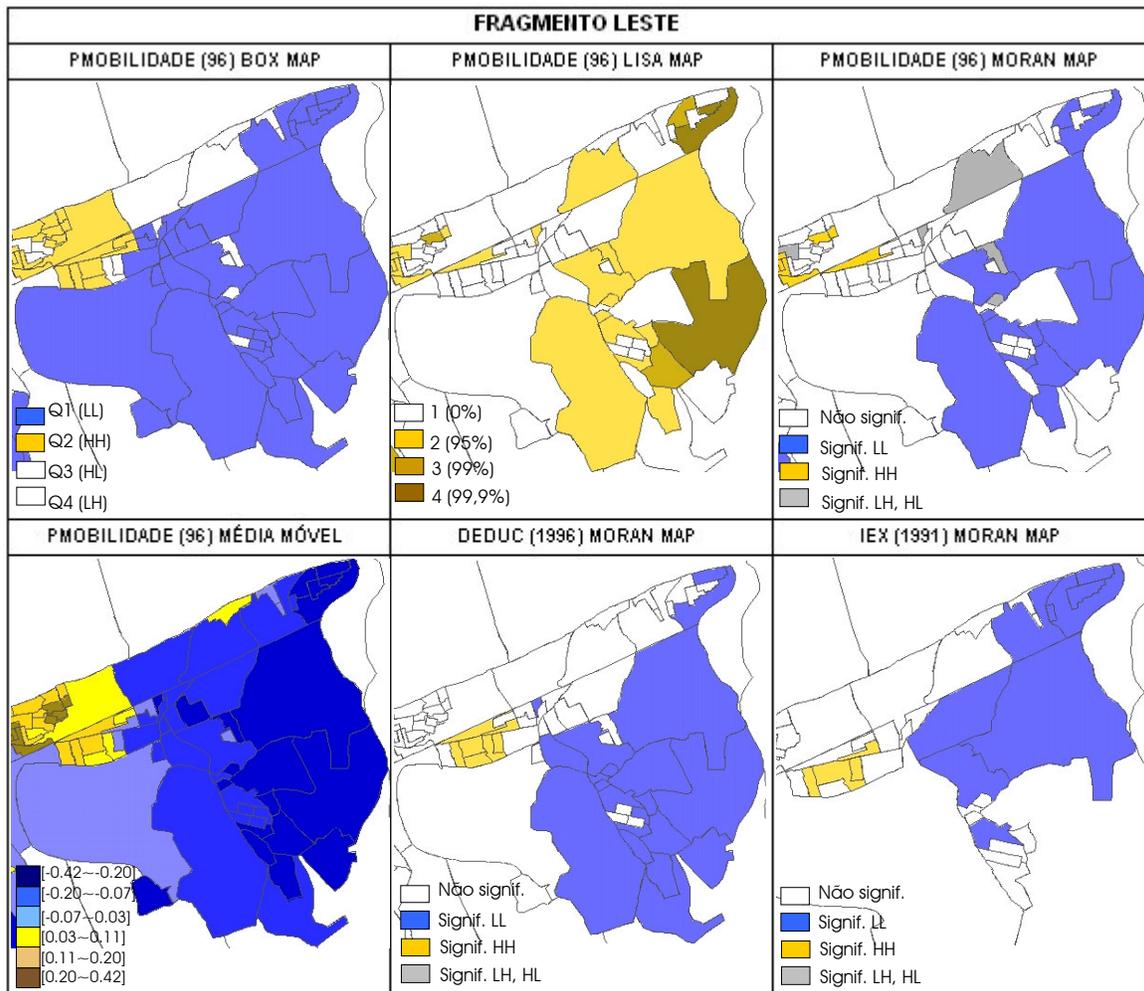


Figura 3.3 – Estimativa da tendência de exclusão/inclusão social para 2000 segundo a análise espacial de dados para o fragmento Leste.

O fragmento Leste constitui um exemplo da **situação A**, onde o *Box Map* confirma a predominância de índices negativos (*LL*) e o *Lisa Map* considera praticamente todos os setores significantes (*LL*) sem a presença de setores em transição (*HL*, *LH*). Estes resultados, aliados à Média Móvel indicam a persistência e provavelmente uma intensificação do regime espacial de exclusão social em 2000 para a região Leste. Estas estimativas são enfatizadas pela expansão deste *cluster* entre 1991 e 96, considerada significativa pelo *Moran Map* para os índices de exclusão/inclusão social (1991) e desenvolvimento educacional (1996), sendo mais um indicativo da persistência e/ou do aumento deste regime espacial de exclusão em 2000.

A Figura 3.4 apresenta os índices de autocorrelação espacial para o fragmento Central. Este fragmento constitui um exemplo da **situação D**, onde o *Box Map* confirma a predominância de índices positivos (*HH*), entretanto, o *Lisa Map* não considera todos os setores como significantes. Estes resultados, aliados à Média Móvel indicam a possibilidade de persistência ou diminuição do regime espacial de inclusão social em 2000. A presença de setores em transição (*LH*, *HL*), considerados significantes, pode ser mais um indicativo deste potencial de mudança para 2000. Estas estimativas são enfatizadas pela dissipação deste *cluster* entre 1991 e 96, visível no *Moran*

Map para os índices de exclusão/inclusão social (1991) e desenvolvimento educacional (1996). Este fato sugere a diminuição da inclusão social ou, como se trata de uma região já consolidada, a permanência do regime espacial de inclusão social em 2000 possivelmente concentrando-se em locais específicos.

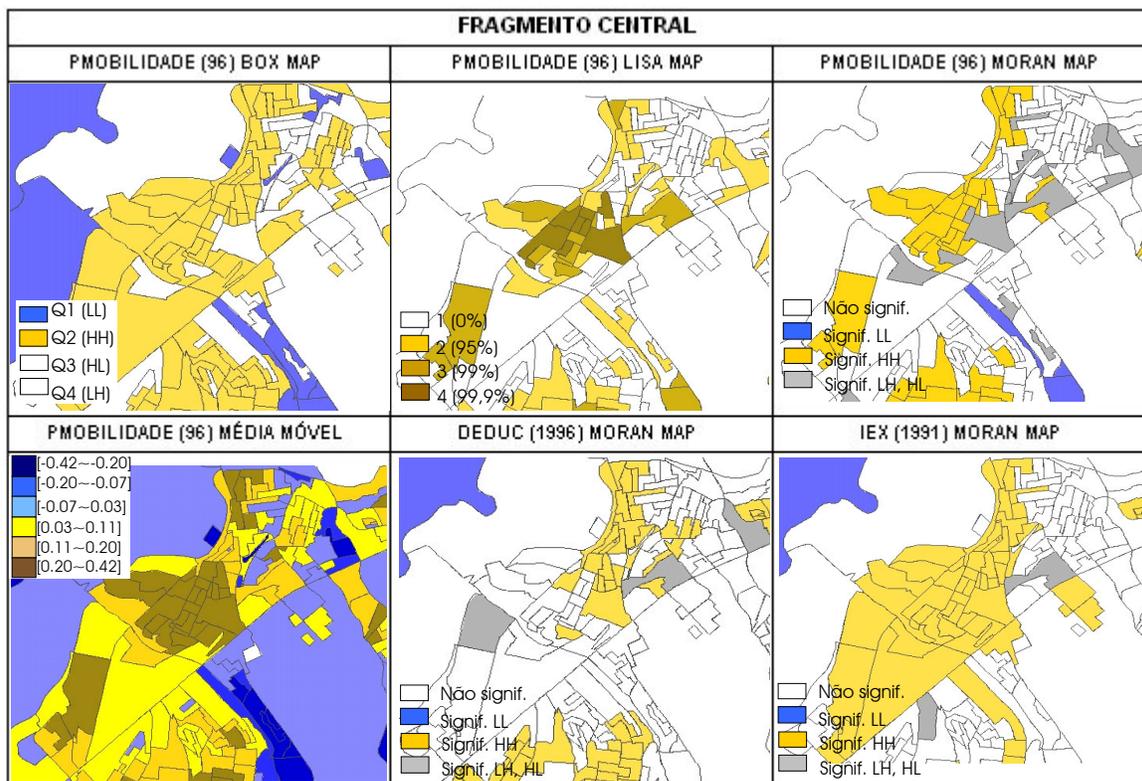


Figura 3.4 – Estimativa da tendência de exclusão/inclusão social para 2000 segundo a análise espacial de dados para o fragmento Central.

Estas estimativas têm coerência com as análises anteriores à medida que esta região possui os maiores índices de acesso à pré-escola, ao ensino médio, fundamental e superior. Estas colocações evidenciam que as regiões de inclusão social apresentam alta estabilidade interna, e são reforçadas em trajetórias de inclusão social pela retroalimentação de características positivas que persistem no sistema ao longo do tempo.

4 - Detecção e Dinâmica Espacial da Trajetória das Armadilhas de Desigualdade (1991-2000): Validação do Potencial de Mobilidade

A tendência estimada para o fragmento Sul em 2000, com base nos dados 1991 e 1996 foi validada comprovando: a) a persistência do regime espacial de exclusão social nos extremos norte e sul do fragmento, caracterizando a consolidação de uma armadilha de desigualdade, e; b) o potencial de mobilidade da área central do fragmento em direção a inclusão social, através da transformação dos setores em transição (*LH, HL*) em setores não mais significativos dentro do fragmento de exclusão social.

A concentração dos setores não significativos dentro do fragmento em 2000, tanto para o Desenvolvimento Educacional quanto para a Exclusão/Inclusão Social, indica a dissolução de

uma parte do fragmento de exclusão social existente em 1991, comprovando a tendência de melhoria dos índices nesta região da cidade e, portanto, a mobilidade de alguns setores acima da LRI. A Figura 4.1 apresenta os mapas referentes ao cálculo do *Moran Map* no fragmento Sul para os índices de Exclusão/Inclusão Social (1991), Desenvolvimento Educacional (1996), Potencial de Mobilidade (1996), Desenvolvimento Educacional (2000) e Exclusão/Inclusão Social (2000).

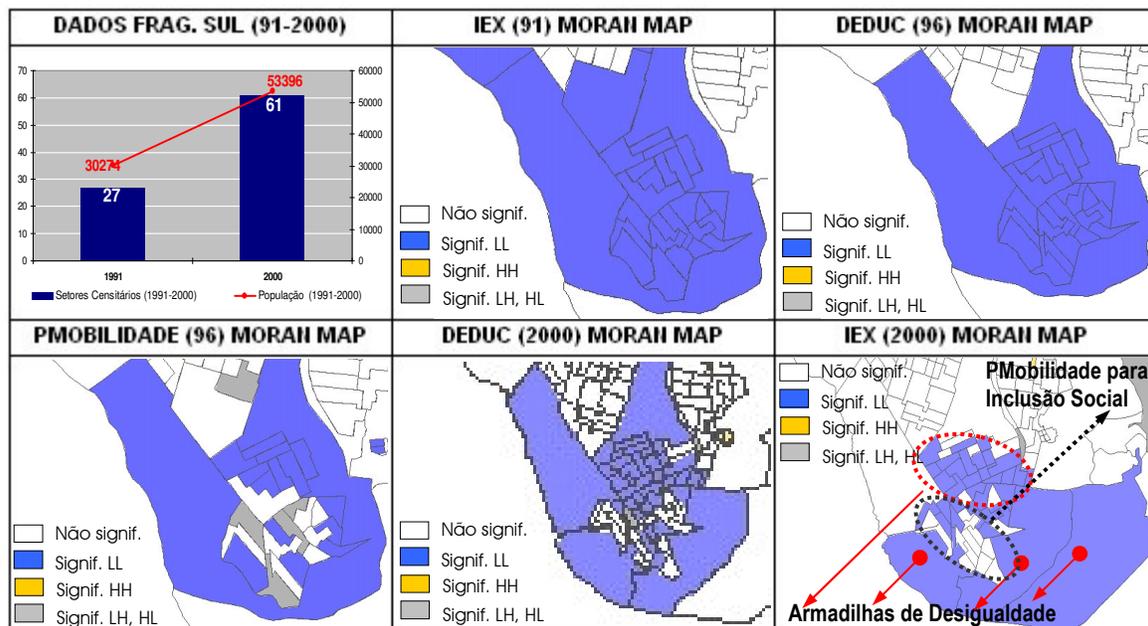


Figura 4.1 - *Moran Map* para o IEIX 1991, DEduc 1996, PMobilidade 1996, DEduc 2000 e IEIX 2000.

A consolidação desta armadilha de desigualdade é um reflexo das tendências observadas no gráfico da figura acima que evidencia intenso aumento (125%) do número de setores censitários e crescimento de 76% da população entre 1991 e 2000, fortalecendo a manutenção do fragmento de exclusão social. Estes resultados indicam a presença de processos cíclicos, intensificados pelo aumento da população em situação de exclusão social, consolidando este fragmento como uma armadilha de desigualdade onde a trajetória recorrente é retroalimentada por características de exclusão social.

A tendência estimada para o fragmento Leste em 2000, com base nos dados 1991 e 1996 foi validada comprovando a persistência e intensificação do regime espacial de exclusão social no fragmento, caracterizando a consolidação de uma armadilha de desigualdade. A concentração de setores significativos *LL* dentro do fragmento em 2000, tanto para o Desenvolvimento Educacional quanto para a Exclusão/Inclusão Social, indica a consolidação e expansão do fragmento de exclusão social Leste, comprovando a estimativa de persistência destes setores abaixo da LRI. A Figura 4.2 apresenta os mapas referentes ao cálculo do *Moran Map* no fragmento Leste para os índices de Exclusão/Inclusão Social (1991), Desenvolvimento Educacional (1996), Potencial de Mobilidade (1996), Desenvolvimento Educacional (2000) e Exclusão/Inclusão Social (2000).

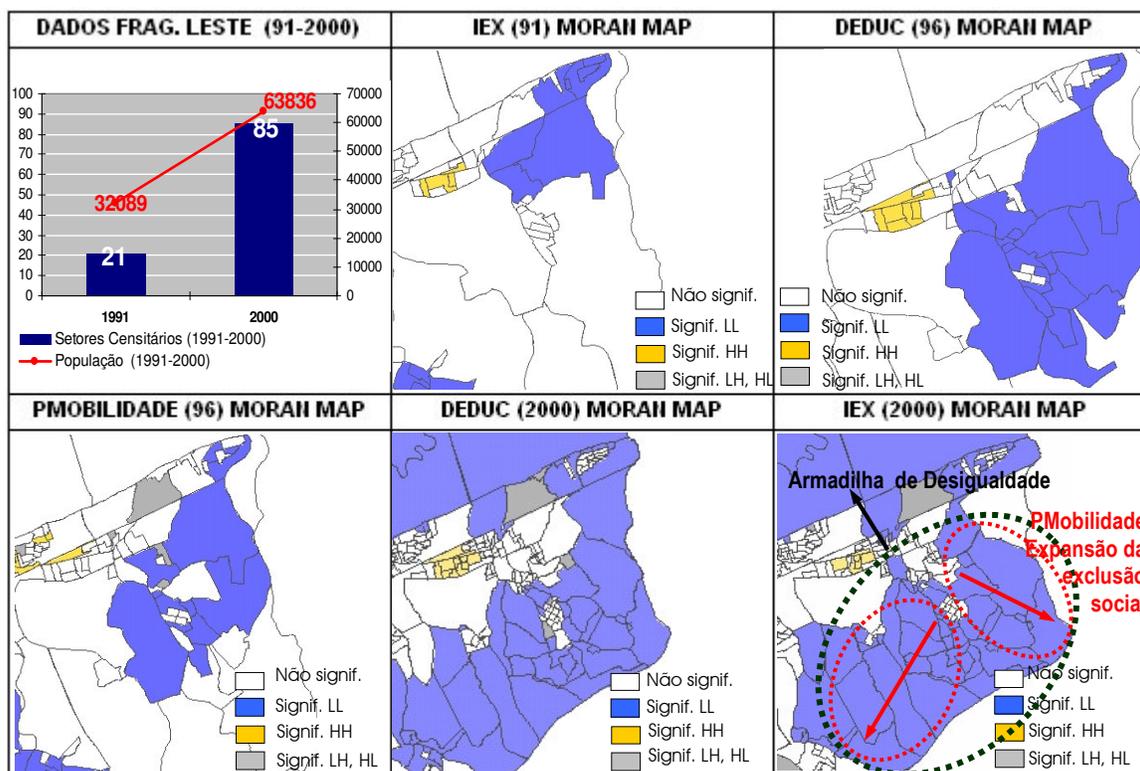


Figura 4.2 - *Moran Map* para o IEX 1991, DEduc 1996, PMobilidade 1996, DEduc 2000 e IEX 2000.

O fragmento Leste apresentou tendências mais drásticas em relação ao fragmento Sul por possuir índices extremamente negativos para todos os componentes da normalidade educacional, com exceção do ensino fundamental. A consolidação desta armadilha de desigualdade é um reflexo das tendências observadas no fragmento entre 1991 e 2000, crescimento populacional de 99% e de 304% do número de setores censitários. Estes dados mostram maior dinâmica populacional deste fragmento em relação ao fragmento Sul, fortalecendo e expandindo o fragmento de exclusão social na direção sudeste, consolidando-o como uma armadilha onde a trajetória recorrente é retroalimentada por características de exclusão social.

Os fragmentos de exclusão social analisados comprovaram que as regiões de exclusão social apresentam alta instabilidade interna e são reforçadas em trajetórias de exclusão social pela retroalimentação de características negativas que persistem no sistema ao longo do tempo.

A tendência estimada para o fragmento Central em 2000, com base nos dados 1991 e 1996 foi validada comprovando a persistência do regime espacial de inclusão social no fragmento, caracterizando a consolidação de uma armadilha de desigualdade. A concentração de setores significativos *HH* dentro do fragmento em 2000, tanto para o Desenvolvimento Educacional quanto para a Exclusão/Inclusão Social, indica a consolidação do fragmento de inclusão social, comprovando a estimativa de persistência destes setores acima da LRI. Isto ocorre porque o fragmento Central possui índices extremamente positivos para todos os indicadores componentes do índice de Potencial de Mobilidade. Interessante notar que apesar da consolidação desta armadilha de desigualdade, a estimativa de diminuição do fragmento não foi verificada, o menor crescimento populacional observado (13%), bem como o crescimento de apenas 100% no número

de setores censitários, embasam esta constatação. Este resultado é indicativo de que se trata de uma região com padrões estabelecidos e consolidados, onde é mais difícil estabelecer-se, por isso o crescimento populacional é reduzido, a população mantém-se praticamente estável e a dinâmica é contrária à observada nos fragmentos de exclusão social.

A Figura 4.3 apresenta os mapas referentes ao cálculo do *Moran Map* no fragmento Central para os índices de Exclusão/Inclusão Social (1991), Desenvolvimento Educacional (1996), Potencial de Mobilidade (1996), Desenvolvimento Educacional (2000) e Exclusão/Inclusão Social (2000).

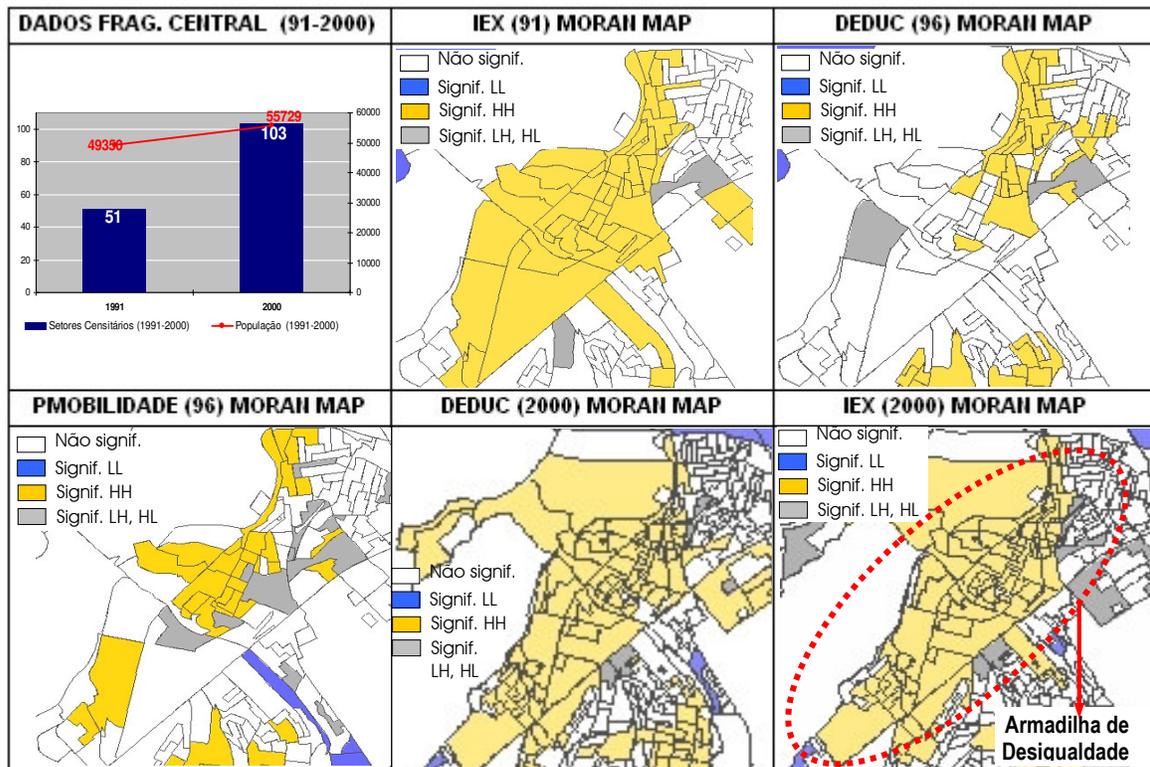


Figura 4.3 - *Moran Map* para o IEX 1991, DEDUC 1996, PMobilidade 1996, DEDUC 2000 e IEX 2000.

Ao contrário dos demais fragmentos, os resultados confirmam a presença de processos cíclicos, reforçados pela estabilização cada vez maior da população em situação de inclusão social. Característica que consolida este fragmento como uma armadilha de desigualdade onde a trajetória recorrente é retroalimentada por características de inclusão social.

5 - Conclusões

As armadilhas de desigualdade são mantidas por processos cíclicos, onde a(s) variável(is) significativa(s) reforça(m) positiva ou negativamente o sistema em que se insere(m), provocando mudanças, ou mantendo-o estável em relação à sua condição inicial de exclusão ou de inclusão social. A detecção destas mudanças permitiu identificar a existência e a dinâmica das armadilhas de desigualdade entre os anos de 1991 e 2000.

A localização recorrente dos clusters de exclusão e de inclusão social observados para os índices de Exclusão/Inclusão Social em 1991, Desenvolvimento Educacional e Potencial de Mobilidade em 1996 e Desenvolvimento Educacional e Exclusão/Inclusão Social em 2000, foi um indicativo da existência e consolidação das armadilhas de desigualdade. As tendências estimadas para as armadilhas de desigualdade com base nos dados 1991 e 1996 foram validadas com os dados 2000, comprovando que a manutenção dos regimes espaciais de exclusão/inclusão social foi condicionada pela variável determinante ao fenômeno em sua condição inicial, o DEduc em 1991. Estas constatações validaram a utilização dos dados da Contagem Intercenso (1996) e, conseqüentemente, do índice educacional de Potencial de Mobilidade, como uma alternativa para estimar a dinâmica da exclusão/inclusão social no intervalo de 10 anos existente entre os Censos. Desta forma, quanto melhor a situação educacional em um determinado fragmento, maior será o seu “potencial de mobilidade” em relação à linha de referência de inclusão (LRI) em um momento futuro.

Neste sentido, os resultados gerados e o método de análise proposto são importantes para avaliar, criticamente, os efeitos da política e da legislação educacional vigentes, fornecendo informações não apenas sobre as áreas de exclusão que persistem ao longo do tempo, mas também indicando as variáveis determinantes neste processo, auxiliando o planejamento, o monitoramento e o redirecionamento de Políticas Públicas Territoriais.

Percebe-se que a diversidade territorial das desigualdades sociais relacionadas à educação é diretamente condicionada pelas políticas educacionais enfatizando a importância de Políticas Públicas que considerem estas diferenças em seu planejamento. Paralelamente, a alta instabilidade interna das armadilhas de exclusão social exige políticas públicas dotadas de “força” suficiente para mudar a natureza condicionada destes sistemas evitando sua expansão e consolidação. A ausência de intervenções políticas, bem como intervenções políticas efêmeras, de pequeno porte e que desconsideram as necessidades específicas dos diferentes locais, podem levar à persistência e até mesmo ao agravamento da situação de exclusão social presente nestas armadilhas. Este efeito nulo ou contrário pode ser revertido através de intervenções políticas continuadas e de porte planejado segundo as características particulares de cada local.

Referências Bibliográficas:

- Anselin, L. "Local indicators of spatial association - LISA." *Geographical Analysis*, 27: 91-115, 1995.
- Bailey, T.; Gatrell, A.C., "*Interactive Spatial Data Analysis*", Longman Group Limited, England, 1995.
- Bowles, S. The Evolution of inequality. *Poverty Traps workshop*. Santa Fé and University of Massachussets, 17 May, 2001.
- Brasil. Lei nº 9.394, de 20 de dezembro de 1996. Estabelece as Diretrizes e Bases da Educação Nacional. **Diário Oficial [da República Federativa do Brasil]**, Brasília, DF, v. 134, n. 248, 23 dez. 1996. Título V, Capítulo I, Artigo 21, 1996
- Brasil. Constituição Federal de 1988. Capítulo III, Seção I, Artigo 211 §2º, 1988.
- Brasil. Constituição Federal de 1988. Capítulo III, Seção I, Artigos 238, 240 e 249, 1989.
- Brasil. Constituição do Estado de São Paulo de 1989. Capítulo III, Seção I, Artigo 249, 1989.
- Brasil. Lei Orgânica de São José dos Campos, Capítulo IV e V, Seção I, Artigo 315, 1990.
- Brasil. Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado de São José dos Campos, Item 3.4.2, a2, 1994.
- Câmara, G.; Monteiro, M.; Ramos, F.; Sposati, A.; Koga, D. "*Mapping Social Exclusion/Inclusion in Developing Countries: Social Dynamics of São Paulo in the 1990s*". São José dos Campos, DPI/INPE, 2001.
- Câmara, G.; Monteiro, A. M.; Carvalho, M. "*Análise Espacial e Geoprocessamento*" Curso on-line, INPE, 2000.
- Fisher, M. ; Scholten, H. ; Unkin, D. "*Spatial Analytical Perspectives on GIS*", Taylor & Francis, Londres, Cap. 8, 1996.
- Genovez, P; Monteiro M.; Câmara G.; Freitas C. Medidas Territoriais de desigualdade social: análise espacial da dinâmica de exclusão/inclusão social em São José dos Campos - SP (1991-2000). *Anais*, Gis Brasil, São Paulo, 2003.
- Genovez, P. Território e desigualdades: análise espacial intra-urbana no estudo da dinâmica de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos. *Dissertação* INPE (código-12177-TDI/973) - 220 pg., São José dos Campos- SP, 2002.
- Genovez, P; Monteiro M.; Câmara G.; Freitas C.. Diagnóstico das Áreas de Exclusão/Inclusão Social através de Sistema de Informação Geográfica na Área Urbana de São José dos Campos - SP. *Anais*, X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz do Iguaçu, 2001.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Censo Demográfico São José dos Campos*, São Paulo, 1991.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Contagem Demográfica São José dos Campos*, São Paulo, 1996.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). *Censo Demográfico São José dos Campos*, São Paulo, 2000.
- Morenoff, J., Sampson, R., Raudenbush, S. “Neighborhood inequality, collective efficacy, and the spatial dynamics of urban violence”. *National conference, “Neighborhood Effects on Low-Income Families,”* sponsored by the National Science Foundation and the Joint Center for Poverty Research, Northwestern University and University of Chicago, 1999.
- Parsons, T. “Evolutionary Universals in Society”. *American Sociological Review*, 29:3, pp. 339-57, 1964.
- Poverty Traps. *Workshop announcement*, www.discuss.santafe.edu/povertytraps, 2002.
- Sampson, R.; Morenoff, J. “Durable inequality: spatial dynamics, social processes, and the persistence of poverty in Chicago neighborhoods”. *Poverty Traps Conference, Santa Fe Institute*, 2001.
- Sposati, A. “*Cidade em pedaços*”, Editora Brasiliense, São Paulo, 2001.
- _____. “Cidade, Território, Exclusão/Inclusão Social”, *Congresso Internacional de Geoinformação – Geo Brasil*, 2000 a.
- _____. “Mapa da Exclusão/Inclusão Social da cidade de São Paulo: dinâmica social dos anos 90, São Paulo, *CDRom*, 2000 b.
- _____. “Exclusão social abaixo da linha do Equador”, *Seminário de Exclusão Social*, PUC/SP, 1998.
- _____. “Sobre os programas brasileiros de garantia de renda mínima – PGRM, in “*Renda Mínima e Crise Mundial: saída ou agravamento?*” organizado por Sposati, A, São Paulo, 1997.
- _____. “*Mapa de Exclusão/Inclusão Social da Cidade de São Paulo*”, Editora PUC-SP, São Paulo, 1996.

A Relevância de uma Infraestrutura Geoinformacional como Subsídio ao Desenvolvimento de Políticas Urbanas¹

MARCEL FANTIN*

MARCELLO ALVES*

ANTÔNIO MIGUEL VIEIRA MONTEIRO*

*. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens (DPI)
Caixa Postal 515 – 12201 – 097 – São José dos Campos – SP, Brasil
(fantin@dpi.inpe.br, malves@dpi.inpe.br, miguel@dpi.inpe.br)

Resumo

Em grande parte dos municípios brasileiros podemos encontrar as trágicas conseqüências do chamado "desenvolvimento industrial periférico" que resultou em um intenso processo de urbanização, cumulado com negativos aspectos sócio-econômicos e uma grande especulação imobiliária. Isto gerou uma ocupação urbana sem maiores considerações com o meio físico, com sérias conseqüências danosas ao meio ambiente e a qualidade de vida da população, como por exemplo, construções em locais com severas restrições ao uso urbano. Procurando solucionar, minimizar ou mitigar estes impactos negativos, o Estatuto da Cidade (Lei 10.257/01) veio a estabelecer diretrizes gerais para a política urbana, trazendo uma série de instrumentos que visam assegurar o direito às "cidades sustentáveis". Entretanto, a ausência de dados geográficos, a falta de acesso aos dados produzidos ou a falta de precisão e confiabilidade da geoinformação existente nas bases municipais, podem dificultar ou diminuir a eficácia dos instrumentos de política urbana previstos no Estatuto da Cidade. Neste sentido, este trabalho busca apresentar idéias preliminares que visam fornecer subsídios a formulação de políticas públicas voltadas a geoinformação, através de uma metodologia de análise e integração de dados georeferenciados que envolve estudos anteriores relativos à: caracterização de desigualdades sócio-territoriais através de indicadores com expressão territorial (Genovéz, 2002), unidades físicas do terreno (IPT, 1996), uso e ocupação da terra do município de São José dos Campos (Valério Filho et al, 2003) e Lei de Zoneamento Municipal (Lei Municipal 165/97). Procurou-se analisar como objeto de estudo a zona leste do município de São José dos Campos - SP, uma vez que esta conta com um grande número de loteamentos clandestinos, implantações em desconformidade com o meio físico e legislação, além da presença de grandes vazios urbanos. Para o cruzamento das geoinformações utilizou-se o software SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas) que permitiu espacializar, analisar e diagnosticar as diversas informações relativas às dinâmicas municipais de maneira integrada, definindo assim, um grau qualitativo de criticidade que considerou como parte integrante da política urbana, tanto os dados relativos ao meio físico, quanto os dados relativos à escala do cidadão. Após, o resultado dos cruzamentos foi analisado com ênfase nos instrumentos de política urbana previstos no Estatuto da Cidade e avaliado como ferramenta de subsídio à gestão dos administradores públicos. Foi possível concluir que o conjunto de dados organizados e com vínculo geográfico utilizados esboçam, com clareza, um mosaico das estruturas relativas ao lugar e das variáveis relativas as populações que habitam este lugar, criando novas possibilidades para o estudo dos impactos provocados pela urbanização nas cidades. Assim, esta metodologia ao ser aplicada em conjunto com os instrumentos de política urbana avança na instrumentalização necessária do poder público para o desenvolvimento de uma gestão territorial que contemple uma visão sistêmica para a solução dos problemas urbanos. Daí, a importância da incorporação das geotecnologias e da aquisição e produção de dados georeferenciados referentes às dinâmicas municipais pelo poder público que permitam melhor visualizar a realidade local e gerar metodologias de integração mais adequadas para implementar o Estatuto da Cidade nos municípios e atingir a "utopia" denominada "cidades sustentáveis".

¹ Esta contribuição está baseada em três trabalhos previamente publicados:

Fantin, M; Alves, M; Monteiro, A. M. V. **A Relevância de uma Infra-estrutura Geoinformacional como Subsídio ao Desenvolvimento de Políticas Urbanas: O Caso da Características do Meio Físico e Dados Sócio-territoriais no Município de S. J. Campos.** In: XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. São Paulo: Anais...p. 3785 - 3801, 2005.

Alves, M; Fantin, M; Monteiro, A. M. V. **A Integração de Dados Socioterritoriais como Subsídio ao Estudo de Impacto de Vizinhança para Políticas Urbanas: o Caso da Política Habitacional em S. J. Campos.** In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia: Anais... p. 3707-3714, 2005.

Alves, M; Monteiro, A. M. V. **Integração de Dados Socioterritoriais e Características do Meio Físico, em Bacias Hidrográficas, como Subsídio à Gestão da Saúde Pública.** In: I Simpósio Nacional de Geografia da Saúde. Presidente Prudente: Anais... CD - Room, 2003.

1 - Introdução

No Brasil, a partir do século XX, vem ocorrendo um intenso e desenfreado processo de “industrialização-urbanização” nas cidades brasileiras.

Em nenhum outro país foram contemporâneos e concomitantes processos como a desruralização, as migrações desenraizadoras e brutais, a urbanização galopante e concentradora (SANTOS, 2000).

Assim, se em 1940 a população que residia nas cidades era de 18,8 milhões de habitantes (26,3%), no ano 2000 ela chegou a aproximadamente 138 milhões de habitantes (81,2%) (MARICATO, 2000).

Todo este crescimento dos centros urbano-industriais brasileiros foi realizado sem maiores considerações com o meio físico, baseado em uma estrutura social injusta e ligado a uma grande especulação imobiliária.² Como resultado, surgem cidades caóticas, com sérios problemas referentes à ausência de saneamento básico, escolas, transporte coletivo, violência, desemprego, segregação urbana, concentração fundiária, degradação ambiental e favelização.

Procurando solucionar, minimizar ou mitigar estes impactos negativos, o Estatuto da Cidade (Lei 10.257/01) veio a estabelecer diretrizes gerais para a política urbana, trazendo uma série de instrumentos que visam assegurar o direito às “*cidades sustentáveis*”.^{3, 4}

Dentre estes instrumentos urbanísticos, podemos destacar: o plano diretor, o direito de superfície, a concessão do direito real de uso, a edificação e o parcelamento compulsórios, o direito de preempção, a urbanização consorciada, o imposto predial progressivo, a outorga onerosa do direito de construir (solo criado), o usucapião especial urbano, a concessão de uso especial para fins de moradia, a transferência do direito de construir, o consórcio imobiliário, o estudo do impacto de vizinhança e a gestão democrática da cidade.

Entretanto, a ausência de dados geográficos, a falta de acesso aos dados produzidos ou a falta de precisão e confiabilidade da geoinformação existente nas bases municipais, podem dificultar ou diminuir a eficácia social⁵ destes instrumentos.

Exemplo disto é o dilema envolvendo o número de favelas existentes em todo Brasil, número este, essencial para o desenvolvimento de políticas públicas⁶ urbanas.

² A especulação imobiliária urbana é definida segundo Campos Filho (2002) como “*uma forma pelo qual os proprietários da terra recebem uma renda transferida dos outros setores produtivos da economia, especialmente através de investimentos públicos através da infra-estrutura e serviços urbanos, que são os meios coletivos de produção e consumo ao nível do espaço urbano*” (p. 48).

³ O Estatuto da Cidade determina que a política urbana deve ser pautada com o objetivo de ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana. Para isto, estabeleceu como uma de suas diretrizes gerais a “*garantia do direito a cidades sustentáveis, entendido como o direito à terra urbana, à moradia, ao saneamento ambiental, à infra-estrutura urbana, ao transporte e aos serviços públicos, ao trabalho e ao lazer, para as presentes e futuras gerações*” (Art. 2º, inc. I).

⁴ Segundo Rolnik (2002), com a aprovação do Estatuto da Cidade (Lei n. 10.257/2001) foi oferecido aos municípios uma nova concepção de planejamento e gestão urbanos, com um conjunto inovador de instrumentos de intervenção sobre seus territórios.

⁵ Barroso (2000) conceitua a eficácia social da norma jurídica como “*a realização do Direito, o desempenho concreto de sua função social*” (p. 85).

Não há números gerais confiáveis sobre a ocorrência de favelas em todo o Brasil. A divulgação dos resultados iniciais do Censo IBGE de 2000 dá a entender que entre 1991 e 2000 o número de favelas teria aumentado 22% em todo o Brasil, atingindo um total de 3.905 núcleos. Segundo o mesmo levantamento, o município de São Paulo, que apresentava em 1991 585 favelas, passa a apresentar 612 em 2000. Porém, no mapeamento realizado pela Prefeitura de São Paulo, classificando a situação e a localização de cada núcleo de favela, revelam a existência de 763 núcleos já em 1980, e 1.592 núcleos em 1987 (MARICATO, 2001).

Essa diferença pode ser explicada pelo fato do IBGE não contabilizar como favela núcleos que possuam menos de cinquenta unidades. Mas, provavelmente, a diferença não se deve, simplesmente, a essa questão metodológica. Há uma grande incoerência entre estes dois levantamentos. Ainda, os números a respeito do tema são, novamente, imprecisos e mesmo inexistentes na maior parte das cidades brasileiras. A falta de rigor nos dados, que mostra o pouco interesse no conhecimento do tema, já é, por si, reveladora.

Assim, para a efetiva implementação destes instrumentos de política urbana previstos no Estatuto da Cidade, faz-se necessária à existência de uma infra-estrutura Geoinformacional sob pena de se criar um vácuo entre a eficácia jurídica e a eficácia no mundo fático-social destes instrumentos. Esta infra-estrutura é essencial no fornecimento de subsídios à implementação e gestão do Estatuto da Cidade pelo Município, uma vez que permite espacializar, analisar e diagnosticar integradamente as informações relativas às dinâmicas municipais e ampliar o debate sobre o desenvolvimento urbano local.

Neste sentido, este trabalho busca apresentar idéias preliminares que visam fornecer subsídios a formulação de políticas públicas voltadas a geoinformação⁷, através de uma metodologia de análise e integração de dados georeferenciados que envolve estudos anteriores relativos à: caracterização de desigualdades sócio-territoriais através de indicadores com expressão territorial (GENOVÊZ, 2002), unidades físicas do terreno (IPT, 1996), uso e ocupação da terra do município de São José dos Campos (VALÉRIO FILHO et al e Lei de Zoneamento (LEI MUNICIPAL 165/97).

Procurou-se analisar como objeto de estudo a zona leste do município de São José dos Campos - SP, uma vez que esta conta com um grande número de loteamentos clandestinos, implantações em desconformidade com o meio físico e legislação, além da presença de grandes vazios urbanos.

Para o cruzamento das geoinformações utilizou-se o software SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas) que permitiu espacializar, analisar e diagnosticar as diversas informações relativas às dinâmicas municipais de maneira integrada, definindo assim, um grau qualitativo de criticidade que considerou como

⁶ Segundo Bucci (2002), as políticas públicas são um dos principais temas do moderno direito administrativo brasileiro e dizem respeito à interferência estatal na vida social para a consecução de objetivos de interesse comum. Estas são "*programas de ação governamental*" e representam o encontro de elementos técnicos de administração de recursos e meios públicos com a escolha política de prioridades para uso desses recursos.

⁷ A Política Pública voltada a Geoinformação deve ser entendida como um conjunto de normas, regulamentos, decisões, ações políticas, investimentos e estratégias que visam fomentar a produção de dados georeferenciados para a implementação do Estatuto da Cidade.

parte integrante da política urbana, tanto os dados relativos ao meio físico, quanto os dados relativos à escala do cidadão.

Após, o resultado dos cruzamentos foi analisado com ênfase nos instrumentos de política urbana previstos no Estatuto da Cidade e avaliado como ferramenta de subsídio à gestão dos administradores públicos.

2 - Localização e Características da Área de Estudo

São José dos Campos localiza-se à altura do Médio Vale do Paraíba do Sul, na Província Geomorfológica denominada Planalto Atlântico, entre 23° 13' 53" de Latitude Sul e 45° 51' 21" de Longitude Oeste, com 1.118 km² de área total e altitudes variando de 530 a 2000 metros acima do nível do mar (PMSJC, 2000).

Este município passou por grandes transformações em virtude de um grande processo de industrialização e como em outras localidades, acabou não sustentando o aumento do contingente populacional, principalmente no que se refere ao setor habitacional, quando grande parte da população de baixa renda acabou por ocupar áreas de forma ilegal, ocasionando o surgimento de favelas e loteamentos clandestinos (GOUVÊA, 2003).

A Zona Leste de São José dos Campos, objeto de estudo específico deste trabalho, possui cerca de 136.180 habitantes, sendo que no período compreendido entre os anos de 1985 a 1987, a ocupação dessa região foi responsável por 44,1% do crescimento da área urbana do município. Isto gerou uma explosão de loteamentos “legais” e “ilegais”, devido, entre outros motivos, a existência de grandes vazios urbanos nessa região (COSTA et al., 2001).

A Figura 1 traz o mapa de localização da Zona Leste do Município de São José dos Campos:

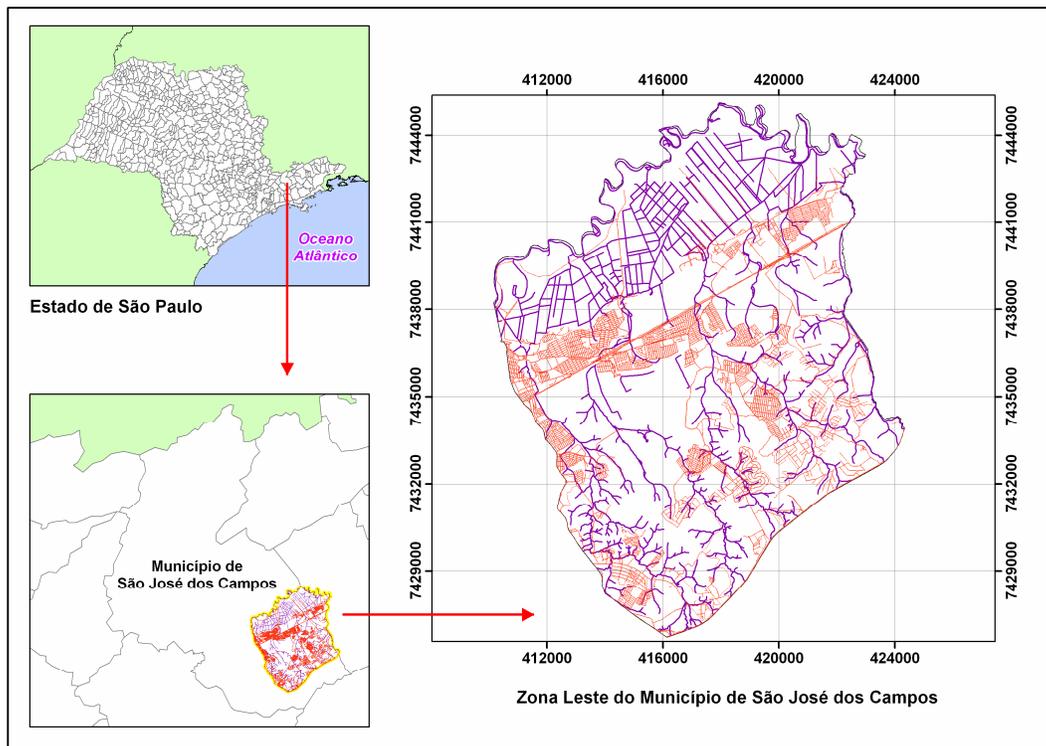


Figura 1 - Localização da área de estudo (Zona Leste do município de S. J. Campos).

Maricato (2001) utiliza as expressões “cidade legal” e “cidade ilegal” para definir este fenômeno. Para a autora, o número de imóveis ilegais na maior parte das cidades brasileiras é tão grande que a cidade legal (cuja produção é hegemônica e capitalista) caminha para ser, cada vez mais, espaço da minoria.

Neste contexto, Santos (1981) afirma que existem duas ou diversas cidades dentro da cidade. Este fenômeno é o resultado da oposição entre níveis de vida e entre setores de atividade econômica, isto é, entre classes sociais. Assim, às diferentes paisagens urbanas correspondem classes sociais diferentes.

Villaça (2001) classifica este fenômeno como “*segregação urbana*”⁸ e destaca como o mais conhecido padrão de segregação urbana o do centro *versus* periferia. O primeiro dotado de serviços urbanos, públicos e privados, é ocupado pelas classes de mais alta renda. A segunda, subequipada e distante, é ocupada predominantemente pelos excluídos.

A “cidade legal” da zona leste do município de São José dos Campos é bem dotada de equipamentos e serviços públicos urbanos, como: hospital, escolas, transporte coletivo e saneamento básico (Figura 2).



Figura 2 - Aspecto da “cidade legal” da zona leste do município de S. José dos Campos.

Já, a periferia da zona leste do Município de São José dos Campos conta atualmente com um grande número de vazios urbanos e ainda, é o maior vetor de crescimento desordenado proveniente de loteamentos clandestinos⁹ da cidade (“cidade ilegal”).

No ano de 2002 existiam cerca de 120 loteamentos clandestinos em toda a cidade, sendo em sua grande maioria localizados na zona leste (FREITAS, 2002) (Figura, 3).

Convém salientar que os loteamentos clandestinos são o território onde as desigualdades sociais se fazem mais presentes, caracterizadas por um retardamento na implantação dos serviços básicos de esgoto, tratamento de lixo e abastecimento d’água.¹⁰

⁸ Castells (1983) entende como segregação urbana à tendência à organização do espaço em zonas de forte homogeneidade social interna e com intensa disparidade social entre elas, tanto em termos de diferença, como também de hierarquia.

⁹ Segundo Gasparini (1985), o loteamento clandestino pode ser entendido como um parcelamento, loteamento ou desmembramento em que o Poder Público competente para examinar e, se for o caso, aprovar seu plano, dele não tem qualquer conhecimento oficial.

¹⁰ KOGA, D. **Medidas de Cidades: entre territórios de vida e territórios vividos**. São Paulo: Editora Cortez, 2003.



Figura 3. Vista Panorâmica de Loteamentos Clandestinos e vazios urbanos da zona leste do município de São José dos Campos (1999).

3 - Materiais e Métodos

Para a execução deste trabalho foram utilizados uma série de dados em formatos analógicos e digitais, coletados em diversas fontes e formatos, segundo sua disponibilidade e descritos nos item abaixo.

a) Materiais cartográficos:

- Carta de Unidades Geotécnicas elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em parceria com a Prefeitura municipal de São José dos Campos. A carta de unidades geotécnicas, segundo IPT (1996), contém informações sobre o meio físico e a ocupação do município.
- Índice Composto de Qualidade Ambiental elaborado por Genovêz (2002), agregado e espacializado utilizando-se a malha dos setores censitários estipulada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano 2000.
- Mapa de Uso e Cobertura Vegetal Natural das Terras elaborado na escala 1:10000 por Valério Filho et al. (2002), nas bacias hidrográficas da margem direita do Rio Paraíba do Sul.
- Lei de Zoneamento Municipal que dispõe sobre a ordenação do território mediante controle do parcelamento, do uso e da ocupação do solo (PMSJC , 2000).

b) Equipamentos:

Para a entrada, organização, manipulação, processamento e saída das informações do projeto foram utilizados os seguintes equipamentos:

Micro padrão IBM/PC - Pentium 4 com instalação do sistema de informação geográfica¹¹ SPRING (Sistema de Processamento de Informações Georeferenciadas) que conjuga funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais.

¹¹ De acordo Burrough (1986), o sistema de informações geográficas é um programa capaz de armazenar, integrar, manipular e visualizar diferentes informações da superfície terrestre. Tais elementos compõem o denominado mundo real em termos de posicionamento e estão alocados segundo um sistema de coordenadas. Desta forma, os Sistemas de Informações Geográficas - SIG's tornam-se uma importante ferramenta de auxílio aos estudos de áreas ambientais e recursos naturais, subsidiando o planejamento e as ações em diversas áreas.

c) Metodologia:

Para a realização deste trabalho, primeiramente foram integrados a base de dados os seguintes dados secundários: Índice de Qualidade Ambiental (GENOVÊZ, 2002), Carta de Unidades Geotécnicas (IPT, 1996), Carta de Uso e Ocupação do Solo (VALÉRIO FILHO et al., 2002) e Lei de Zoneamento do Município de São José dos Campos (Lei Complementar nº 165/97).

1. Índice de Qualidade Ambiental - Segundo Genovêz (2002), o índice de “Qualidade Ambiental”¹² é composto pelos índices de precário abastecimento de água, precária instalação sanitária e precário tratamento de lixo (Figura 4). O mesmo apresenta um Padrão de Referência de Inclusão (PRI) definido segundo a autora, variando de -1 a 0. Assim, este índice possibilitou evidenciar as maiores porcentagens de instalações precárias (-1) e, por conseguinte as menores (0) para a política urbana. Os valores referentes ao índice composto de “Qualidade Ambiental” foram agrupados em (quatro) classes de escalonamento variando no intervalo “-1 a 0” e reclassificadas como “bom”, “moderado”, “regular” e “ruim” (Figura 5).

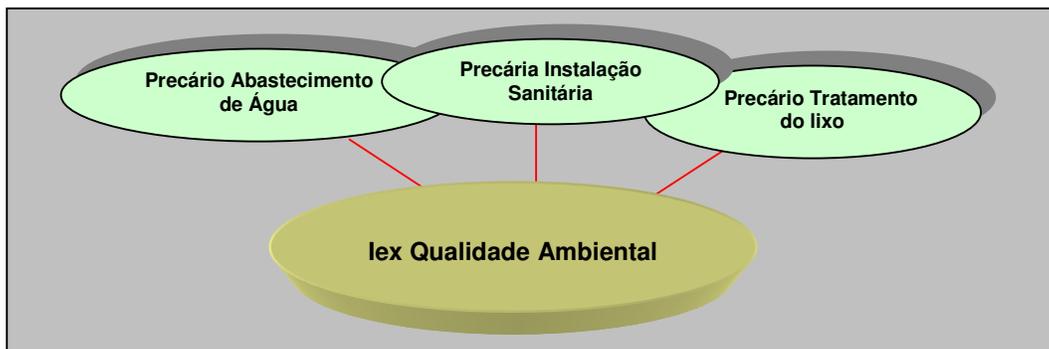


Figura 4. Indicadores que compõem o índice “Qualidade Ambiental”.

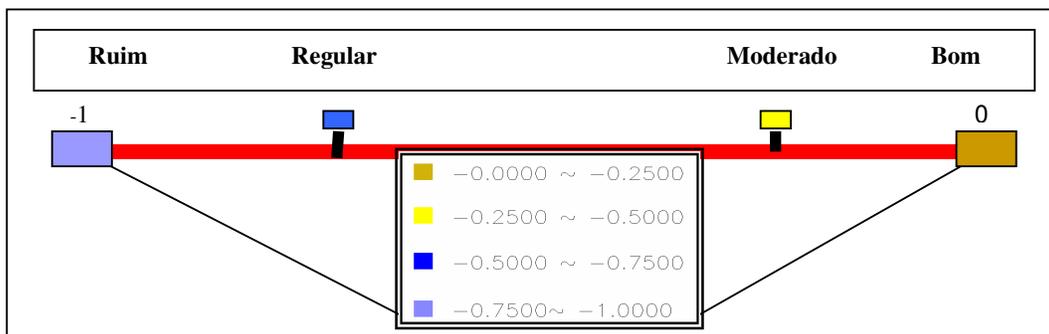


Figura 5. Classes de agrupamento estabelecidas para o escalonamento proposto.

Após o agregamento e a espacialização das informações obteve-se o mapa síntese das informações, demonstrando-se assim o comportamento dos setores censitários segundo o índice agregado de “Qualidade ambiental” (Figura 6).

¹² Segundo Genovêz (2002), mesmo tendendo o índice de “Qualidade Ambiental” a não ser muito representativo para o município de São José dos Campos devido à universalização dos Serviços Públicos de Abastecimento d’água, Tratamento de lixo e Coleta de esgoto, o município estudado apresenta diversas áreas periféricas urbanizadas e em processo de ocupações não regulamentado pela administração pública desprovidas da maioria dos serviços públicos básicos.

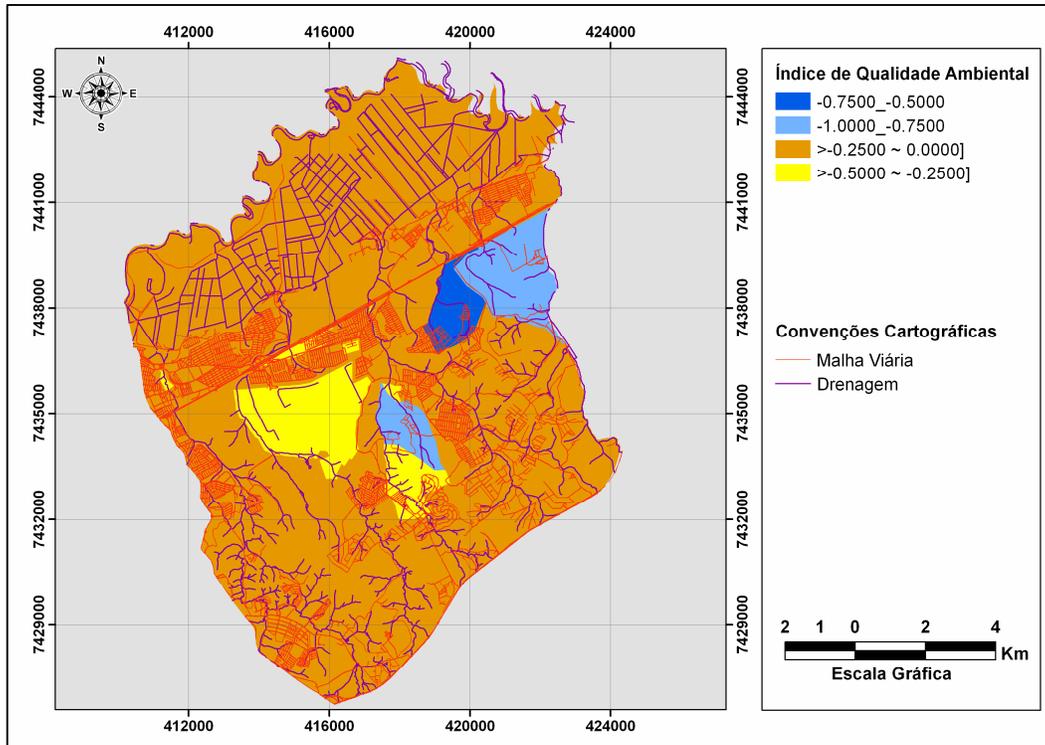


Figura 6. Índice de “Qualidade Ambiental” espacializado (GENOVÊZ, 2002).

2. Carta de Unidades Geotécnicas – A compartimentação da Carta de Unidades Geotécnicas do município de São José dos Campos foi realizada em face das características relevantes do relevo, das rochas e dos solos, que se interagem condicionando o desenvolvimento dos processos do meio físico.¹³

A integração das informações relativas ao meio físico, segundo os critérios apontados pelo Relatório Técnico da Carta de Unidades Geotécnicas, foram adaptados aos conceitos de análise deste trabalho. Assim, foi possível estabelecer as possíveis combinações e as respectivas qualificações com relação ao tema analisado. Para elaboração dos critérios de “Fragilidade / Criticidade” das áreas analisadas, avaliou-se o grau de influência de cada unidade do meio físico presente na área de estudo segundo suas características de susceptibilidade ao fenômeno da urbanização delimitada pelo Relatório Técnico da Carta de Unidades Geotécnicas elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1996), como disposto a seguir:

a. Aluviões (Arenosos ou Argilosos) – Os aluviões são terrenos localizados junto às calhas das drenagens, sendo que as porções mais rebaixadas apresentam declividades médias inferiores a 5%, estando portanto, sujeitos a inundações periódicas por ocasião das enchentes. Outro complicador relacionado à ocupação desta classe é o nível d’água raso ou aflorante, com solos constantemente encharcados nos níveis mais baixos e naqueles predominantemente argilosos, apresentando baixa permeabilidade e capacidade de suporte. Assim, estas áreas foram classificadas como “ruins” para a ocupação urbana no presente estudo devido aos problemas relacionados a inundações, degradação dos recursos hídricos e saúde ambiental.

¹³ As classes de unidades geotécnicas foram cartografadas na escala 1:50 000, correspondendo a todo o município, e na escala 1:25 000, na área urbana e de expansão. Ainda, estas classes foram discriminadas em um quadro-legenda (Relatório Técnico da Carta de Unidades Geotécnicas), que sintetiza as recomendações e as informações de interesse para os usuários (IPT, 1996).

b. Colinas e Morrotes em Sedimentos Arenosos - Ocorre em relevo de colinas, subordinadamente morrotes e planícies aluviais, com declividade predominante entre 5% e 10% nos topos e chegando a situações de 20% nas vertentes, sendo topograficamente em geral satisfatórias à ocupação. Entretanto, esta unidade foi classificada como “moderada” à ocupação urbana em virtude da alta suscetibilidade à erosão laminar e em sulcos.

c. Colinas e Morrotes em Sedimentos Argilosos - É encontrada em relevo de colinas, subordinadamente morrotes e planícies aluviais, com declividades predominantes menores que 20%. Em relação aos aspectos do uso do solo, estas áreas topograficamente em geral são satisfatórias a ocupação urbana. Porém, esta unidade foi classificada como “moderada” à ocupação urbana devido à presença de processos existentes e potenciais de erosão laminar e em sulcos, que é incrementada pela presença de nível d’água suspenso e pela desagregação superficial.

d. Colinas e Morrotes em Sedimentos Argilo Expansivos -Em relação aos aspectos do uso do solo para assentamentos humanos, esta unidade foi classificada como “regular”, pois tem baixa capacidade de suporte, uma vez que, está localizada nas vertentes abruptas próximas das drenagens, oferecendo risco de erosão laminar e em sulcos, incrementada pela presença de nível d’água suspenso e pela desagregação superficial.

e. Colinas e Morrotes com Embasamento Cristalino - Está localizada em relevo residual de rochas cristalinas, dispersa em setores de topografia mais suave das serras e junto às baixadas, isolada pelos sedimentos das planícies, com declividades variando entre 5 e 20%, contando com solo de alteração em geral siltoso, às vezes micáceo, com espessura média acima de 10m, e cobertura de solo superficial coluvionar de espessura média em torno de 2m. Esta unidade foi clasificada como “ruim” em virtude da alta suscetibilidade a formação de sulcos e ravinas no solo de alteração, devido a sua exposição por longos períodos, com erosões desenvolvidas a partir da concentração das águas do escoamento superficial.

A figura 7 traz a espacialização das unidades geotécnicas presentes na área de estudo:

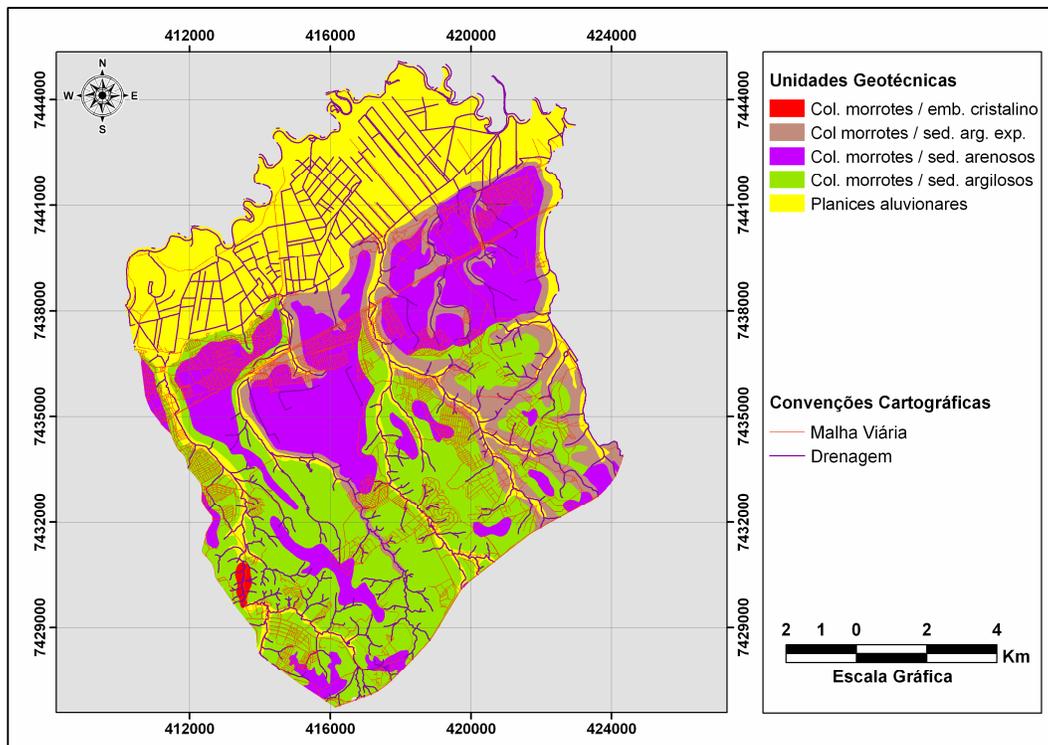


Figura 7. Unidades geotécnicas presentes na área de estudo (IPT, 1996).

3. Mapa de Uso e Cobertura Vegetal Natural das Terras¹⁴ - Valério Filho et. al (2003) realizaram o levantamento das diferentes classes de uso e cobertura vegetal natural das terras existente na área de estudo a partir da análise e interpretação de fotografias aéreas coloridas na escala aproximada de 1:10.000 relativas ao aerolevanteamento realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) no ano de 1997.

Este Mapa de Uso e Cobertura Vegetal Natural das Terras foi incorporado a base de dados, sendo determinados pesos qualitativos em relação as densidades e estágios de ocupação definidos por Valério Filho et. al. (2003) e em face da localização periférica/central destas classes definida por Gouvêa (2003) com ênfase à implantação de novos assentamentos humanos, como disposto abaixo:

a. Área urbana consolidada com alta taxa de ocupação e Área urbana consolidada com média taxa de ocupação: Foram consideradas “ruins” para a implantação de programas habitacionais, em virtude de inexistirem nestas áreas de espaços livres, uma vez que quase todo os terrenos são ocupado por construções.

b. Área urbana não consolidada com média taxa de ocupação e Área urbana não consolidada com baixa taxa de ocupação: Nestas áreas ocorre a presença de espaços livres que correspondem a lotes ainda não ocupados por edificações. Estas áreas foram divididas em duas, sendo que as detentoras de uma infra-estrutura satisfatória foram consideradas moderadas para a implementação de programas habitacionais e as periféricas consideradas ruins.

c. Área em implantação: Como áreas em implantação foram considerados loteamentos com ausência de edificações, verificando-se apenas o sistema de arreamento. Foram divididas em duas classes, sendo que as próximas aos centros urbanos foram consideradas regulares e as distante ruins, devido a inexistência de infra-estrutura mínima próxima e pela dificuldade de acesso aos aparelhos públicos urbanos.

d. Área agrícola: Nesta classe foram mapeadas as áreas agrícolas de grande representatividade em área. Encontram-se incluídas nesta classe as áreas agrícolas existentes nas várzeas do rio Paraíba, correspondentes às culturas temporárias (arroz, feijão e batata). Dado a relevância da atividade agrícola para os centros urbanos, foi considerada ruim para o processo de ocupação.

e. Reflorestamento, Pastagem /campo antrópico e Pasto sujo: Estas classes foram divididas em duas, sendo que as próximas a uma infra-estrutura urbana satisfatória e destinadas a especulação imobiliária foram consideradas boas para a implementação de programas habitacionais e as periféricas consideradas ruins.

f. Mata / Capoeira/Cerrado: Nesta classe estão incluídos fragmentos de mata/capoeira e mata galeria associadas a determinados rios da área de estudo, bem como remanescentes de vegetação típica de cerrado. Devido à necessidade de preservação da diversidade biológica e do equilíbrio ambiental foram consideradas ruins ao processo de ocupação urbana.

A figura 8 traz a espacialização das classes uso e cobertura vegetal natural das terras presentes na área de estudo para o ano de 1997:

¹⁴ Segundo Pereira et al. (1989), o termo cobertura e uso da terra refere-se a forma pela qual o espaço esta sendo ocupado tanto pelos aspectos naturais ou pelas atividades desenvolvidas pelo homem. Os autores ainda relatam que neste sentido não há uma divisão entre o uso da terra e o revestimento do solo e que “*ter conhecimento da distribuição espacial da cobertura e uso da terra torna-se imprescindível no processo de tomada de decisões, no que se refere à organização racional da atividade humana no espaço*”.

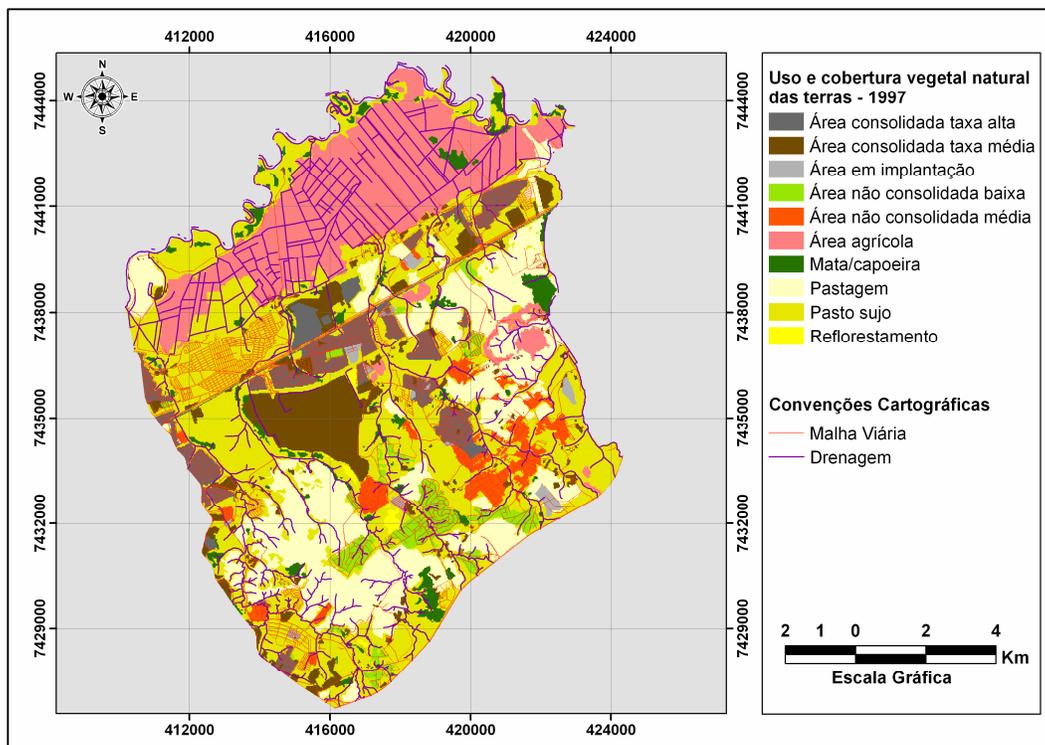


Figura 8. Uso e cobertura vegetal natural das terras na área de estudo - 1997.

4. Lei de Zoneamento¹⁵ n° 165/97 – Esta lei dispõe sobre a ordenação do território mediante controle do parcelamento, do uso e da ocupação do solo no Município de São José dos Campos e traz informações sobre a ausência, presença e saturação da infraestrutura urbana nas diferentes zonas de uso existentes.

Para o presente estudo, estas zonas de uso foram agregadas à base de dados, sendo reclassificadas em “Bom”, “Moderado”, “Regular” e “Ruim” para a implantação de novos assentamentos humanos, levando em consideração: a ausência, presença e saturação da infraestrutura urbana e a localização periférica ou central destas classes definida por Gouvêa (2003), com ênfase à implantação de novos assentamentos humanos. Assim, segue as zonas de uso com a respectiva reclassificação:

a.ZRs 1, 2, e 3 (Zonas Residenciais Um, Dois, e Três): por conterem toda a infraestrutura básica foram classificadas como “boa”;

ZM1 (Zona Mista Um): por apresentar tendências a saturação do sistema viário local, exigindo um rígido controle do adensamento, foi classificada como “moderada”;

ZM 2 e 3 (Zonas Mistas Dois e Três): Por conterem toda a infraestrutura básica e pela tendência à intensificação da urbanização, o que permite maior adensamento, para melhor e maior otimização da infraestrutura existente e pela existência de terrenos ociosos, foram classificadas como “boa”;

ZM4 (Zona Mista Quatro): Devido à satisfatória infraestrutura instalada, com tendência à baixa intensidade de aproveitamento dos terrenos, na qual se permite índice construtivo de média densidade e o uso residencial, foi classificada como “bom”;

¹⁵ Rocha (1999) conceitua o zoneamento urbanístico como um “*instrumento de divisão territorial*”, que é “*traçado mediante o cumprimento de determinados aspectos urbanísticos-ambientais*”, objetivando “*disciplinar o uso do solo urbano, tendo em vista o interesse no bem-estar dos habitantes da cidade*”.

ZEPAS 1 e 3 (Zona Especial de Proteção Ambiental Um e Três): Devido as limitações legais e ambientais à ocupação urbana foram classificadas como “ruim”;

ZUPI (Zona de Uso Predominantemente Industrial): Em consequência de serem áreas destinadas a localização de indústrias, cujos processos, mesmo que submetidos a métodos adequados de controle e tratamento de efluentes, ainda tem fatores nocivos, em relação as demais atividades urbanas foram reclassificadas como “ruim”;

ZETI (Zona Especial de Transição Industrial): Sendo áreas destinadas a garantir a proteção das áreas circunvizinhas as ZUPI's contra possíveis efeitos residuais e acidentes, provenientes de atividades de risco ambiental significativo, foram classificadas como “ruim”;

ZEA (Zona Especial Aeroportuária): Esta área é destinada a impedir a instalação de usos incompatíveis com a curva de ruído do aeroporto do Município, nesse sentido, foi classificada como ruim;

ZVU (Zona de Vazio Urbano): São áreas compreendidas por glebas de médio e grande porte, não ocupadas, constituindo vazios no perímetro urbano. Foram divididas em duas classes e reclassificadas. As ZVUs próximas ou intrínsecas a infra-estrutura urbana foram classificadas como “boa” e as periféricas, devido à falta de infra-estrutura, foram classificadas como “ruim”;

ZEIS (Zona Especial de Interesse Social): São áreas carentes de infra-estrutura e são ocupadas por sub-habitações/favelas e loteamentos clandestinos onde haja interesse social em promover a regularização fundiária e urbanística. Foram divididas em duas classes e reclassificadas. As ZEIS próximas ou intrínsecas a área central foram classificadas como “bom” devido a proximidade da infra-estrutura urbana e por permitir limites mais flexíveis para a regularização fundiária. Já, as periféricas, devido à falta de infra-estrutura próxima, foram classificadas como “ruim”.

A figura 9 traz a espacialização das classes de zoneamento urbano presentes na área de estudo:

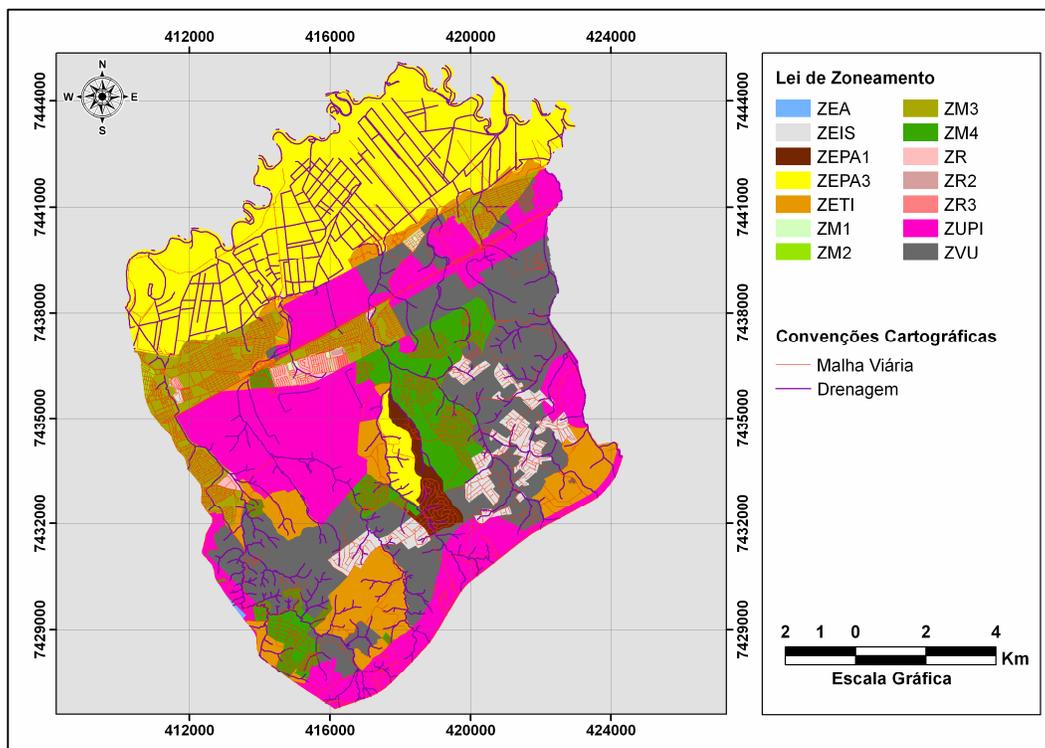


Figura 9. Lei de Zoneamento do Município de São José dos Campos.

Às quatro variáveis descritas anteriormente foram agregados indicadores qualitativos divididos em quatro classes com base nas bibliografias consultadas. Em seguida às classes foram agregados pesos qualificadores, variando seu valor de 1 a 4, conforme apresentam as tabelas 1 (classes qualificadoras) e 2 (pesos atribuídos às classes qualificadoras):

TABELA 1 - CLASSES QUALIFICADORAS

QUALIDADE AMBIENTAL	UNIDADES GEOTECNICAS	USO_1997	ZONEAMENTO
-1.0000_-0.7500	Planices aluvionares	Área não-consolidada baixa (periférica)	Zona Especial de Proteção Ambiental Um
-0.7500_-0.5000	Colinas e morrotes em sedimentos de argila expandida	Área em implantação (periférica)	Zona Especial de Proteção Ambiental Três
>-0.5000 ~ -0.2500]	Colinas e morrotes em embasamento cristalino	Pastagem (periférica)	Zona de Uso Predominantemente Industrial
>-0.2500 ~ 0.0000]	Colinas e morrotes em sedimentos arenosos	Reflorestamento (periférico)	Zona Especial de Transição Industrial
	Colinas e morrotes em sedimentos argilosos	Pasto sujo (periférico)	ZEA
		Mata/capoeira	Zona Especial de Interesse Social (Periférica)
		Área consolidada taxa alta	Zona de Vazio Urbano (Periférica)
		Área não consolidada taxa média (periférica)	Zona Mista Quatro (Periférica)
		Área consolidada taxa média	Zona Mista Um
		Área agrícola	Zona Residencial
		Área em implantação (central)	Zona Residencial Dois
		Área não consolidada taxa baixa (central)	Zona Residencial Três
		Área não consolidada taxa média (central)	Zona Mista Dois
		Pasto sujo (central)	Zona Mista Três
		Pastagem (central)	Zona Mista Quatro
		Reflorestamento (central)	Zona de Vazio Urbano (Central)
			Zona Especial de Interesse Social (Central)

TABELA 2 - PESOS ATRIBUÍDOS ÀS CLASSES QUALIFICADORAS

QUALIFICADORES	PESOS
Bom	1
Moderado	2
Regular	3
Ruim	4

Para a espacialização dos pesos atribuídos às classes qualificadoras, foi gerada uma grade numérica para cada uma das variáveis estudadas (representada em escala de cinza), utilizando o método de ponderação da linguagem de programação denominada LEGAL¹⁶ (Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico) no SIG SPRING.

Como exemplo, a Figura 10 traz o procedimento de geração da grade numérica que espacializou os pesos atribuídos às classes qualificadoras da variável “Geotecnia” no SIG SPRING:

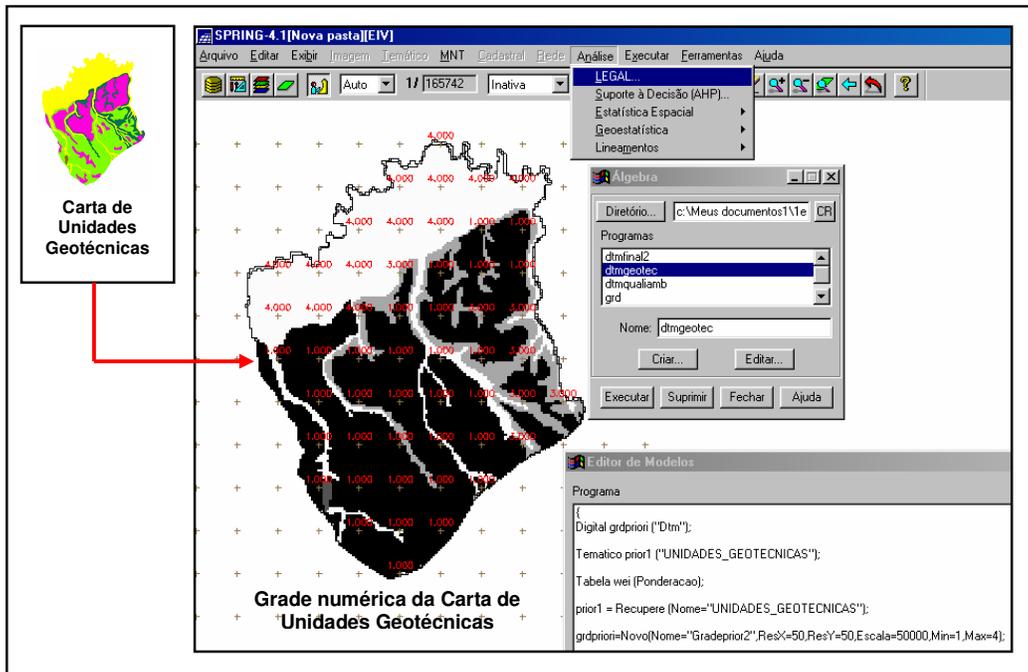


Figura 10 - Procedimento de geração da grade numérica no SIG SPRING.

A integração destas informações na base de dados foi realizada somando-se as grades numéricas de valores dos pesos das quatro variáveis utilizadas.

Após, foi realizada a transformação do modelo numérico, resultante da somatória das quatro grades numéricas geradas, para o modelo temático.

Para isto, foi necessário realizar uma operação de fatiamento¹⁷, onde os valores integrados/somados dos pesos atribuídos aos qualificadores das variáveis foram agregados em quatro classes temáticas pré-definidas. Isto possibilitou espacializar e gerar um mapa síntese que demonstra as áreas prioritárias à implantação de assentamentos humanos.

¹⁶ A linguagem de programação LEGAL é utilizada pelo SPRING para executar análises e cruzamentos de mapas. É constituído de sentenças (linhas de comando), que estão estruturadas em três partes: declarações, instanciações e operações (INPE, 2004).

¹⁷ “O fatiamento de um modelo consiste em se definir intervalos, ou fatias, de cotas com a finalidade de se gerar uma imagem temática a partir do modelo. Assim, cada tema, ou classe, da imagem temática é associado a um intervalo de cotas dentro dos valores atribuídos ao fenômeno modelado. O usuário de GIS é responsável pela definição das fatias e também da associação dessas fatias com classes predefinidas no sistema. As fatias são definidas de acordo com intervalos de cotas que são úteis para uma determinada aplicação (INPE, 2004, p. 14).

A tabela 3 traz os intervalos definidos para o fatiamento do resultado da integração dos dados e a figura 11 ilustra o procedimento de fatiamento destes dados realizado no SIG SPRING:

TABELA 3 - INTERVALOS PARA FATIAMENTO

QUALIFICADORES	INTERVALOS PARA FATIAMENTO APÓS INTEGRAÇÃO DOS DADOS
Bom	0 ~ 4
Moderado	4 ~ 8
Regular	8 ~ 12
Ruim	12 ~ 16

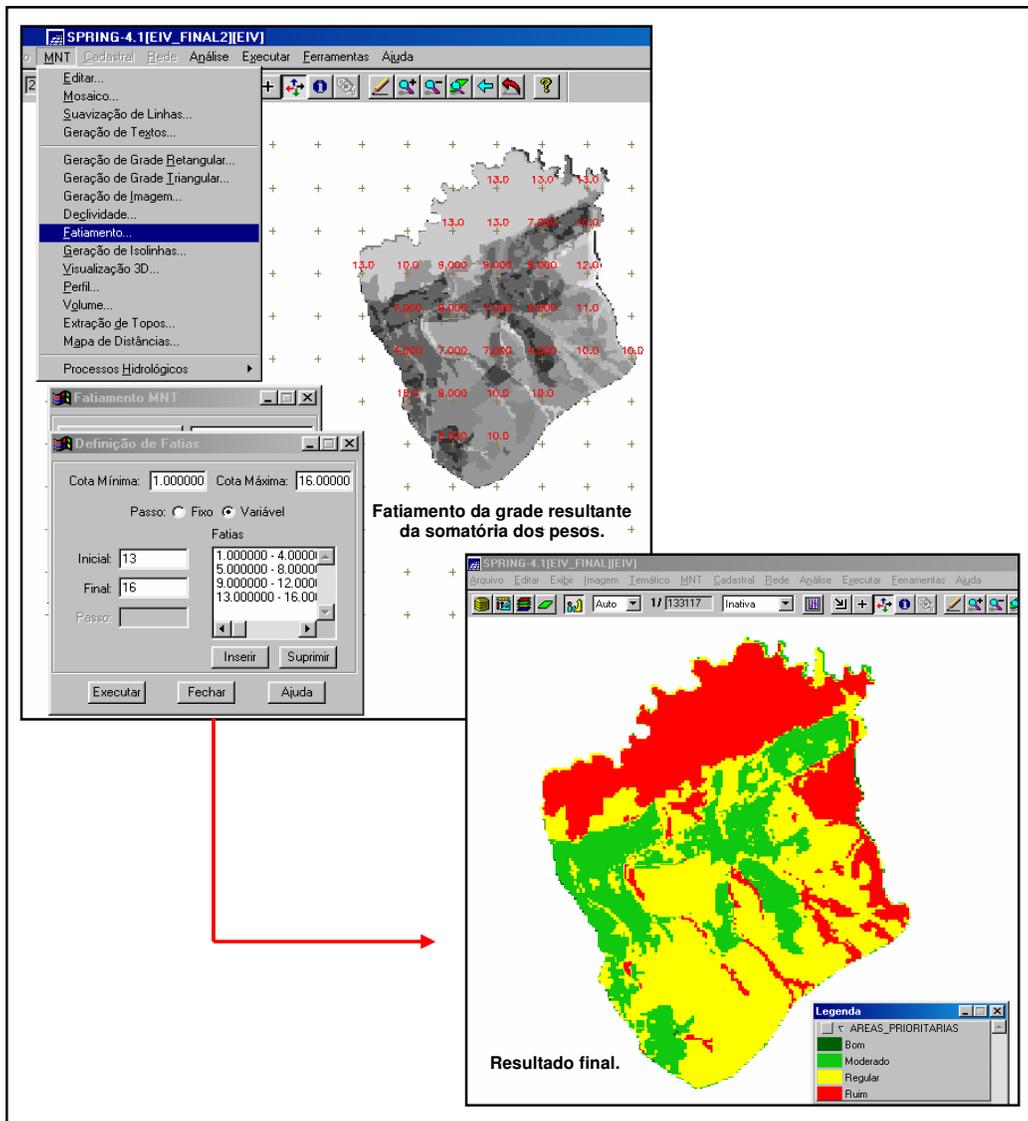


Figura 11 - Fatiamento do plano de informação numérico e resultado final.

d) Resumo dos procedimentos adotados:

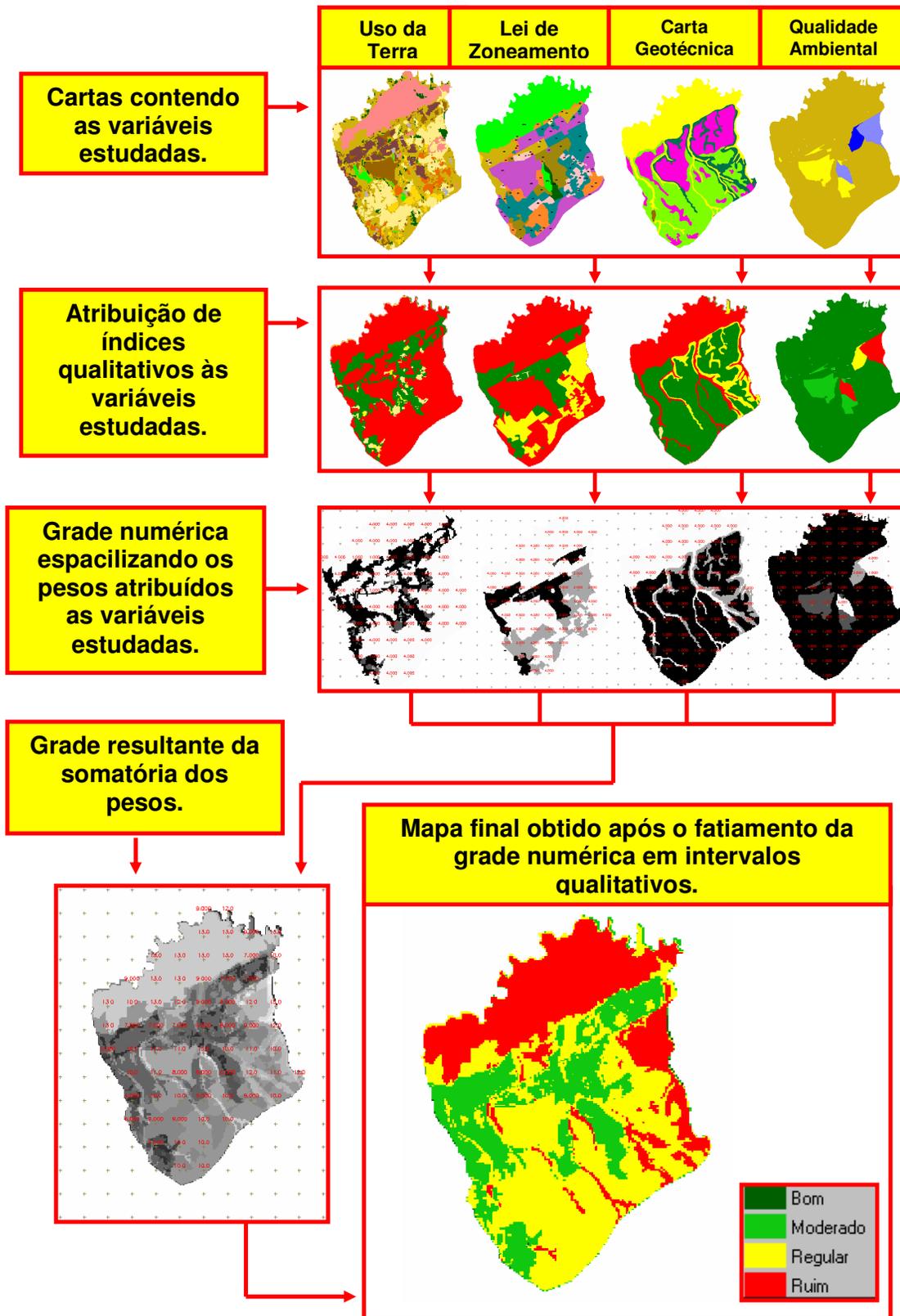


Figura 12. Procedimentos adotados.

4 - Resultados

Os resultados obtidos através da integração das variáveis estudadas através do critério de Fragilidade / Criticidade demonstraram a ocorrência de áreas críticas e propícias à implantação e adensamento de assentamentos humanos na zona leste do município de São José dos Campos – SP (Figura 13).

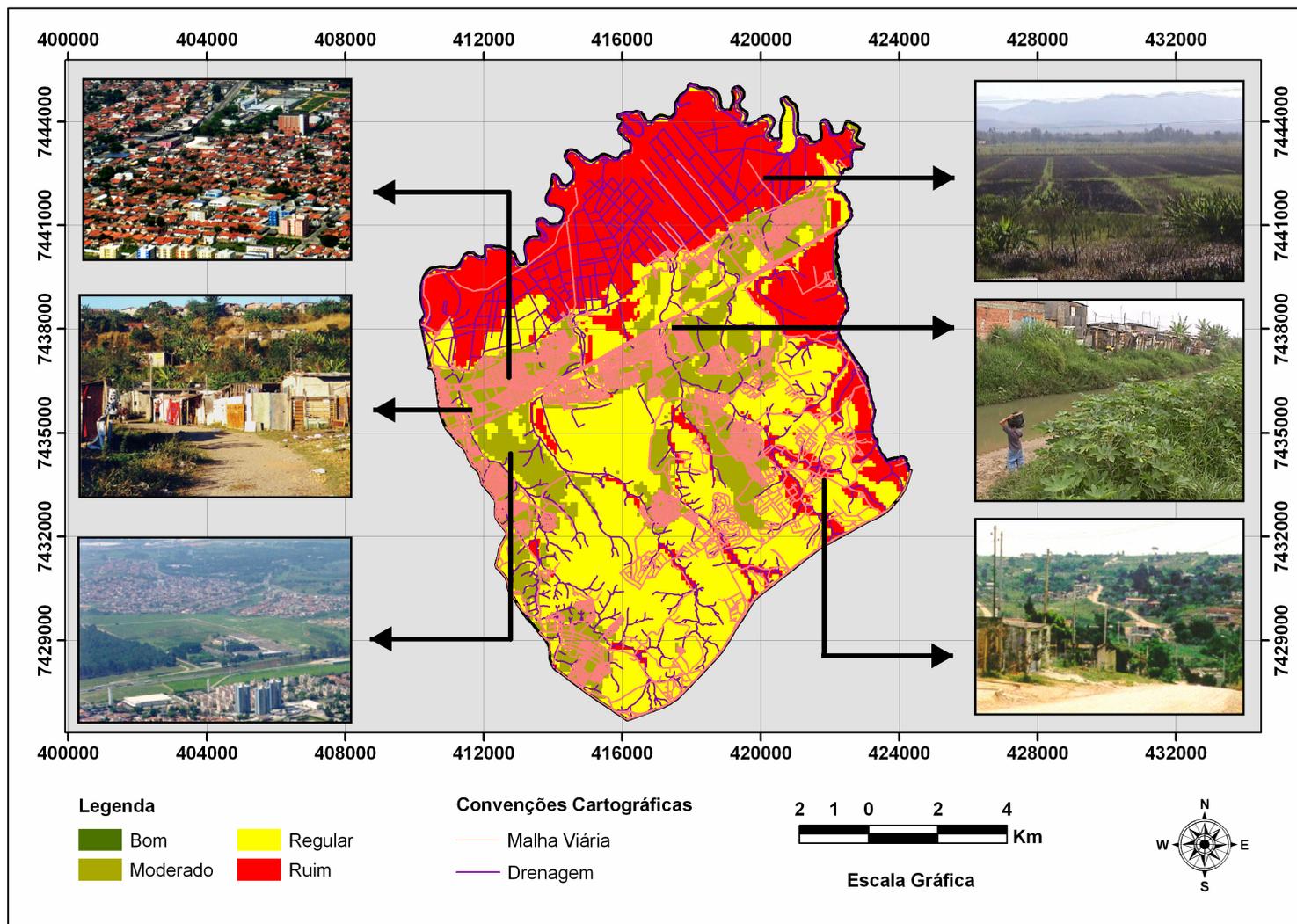


Figura 13 - Mapa de áreas prioritárias à implantação de assentamentos humanos (descrição das fotografias nas figuras 15 a 20).

De um total de 16099,1 hectares referentes a área de estudo, 34,4 hectares (0,22%) foram classificados como “bom” para a implantação de assentamentos humanos, 3843,3 hectares (23,8%) foram classificados como “moderado”, 7256,4 hectares (45,08%) foram classificados como “regular” e 4965 hectares (30,9%) foram classificados como “ruim” (Tabela 4 e Figura 14).

TABELA 4 - RESULTADO ESPACIAL DAS CLASSES QUALIFICADORAS

CLASSES QUALIFICADORAS	ÁREA (HA)	ÁREA (%)
Bom	34,4	0,22
Moderado	3843,3	23,8
Regular	7256,4	45,08
Ruim	4965	30,9

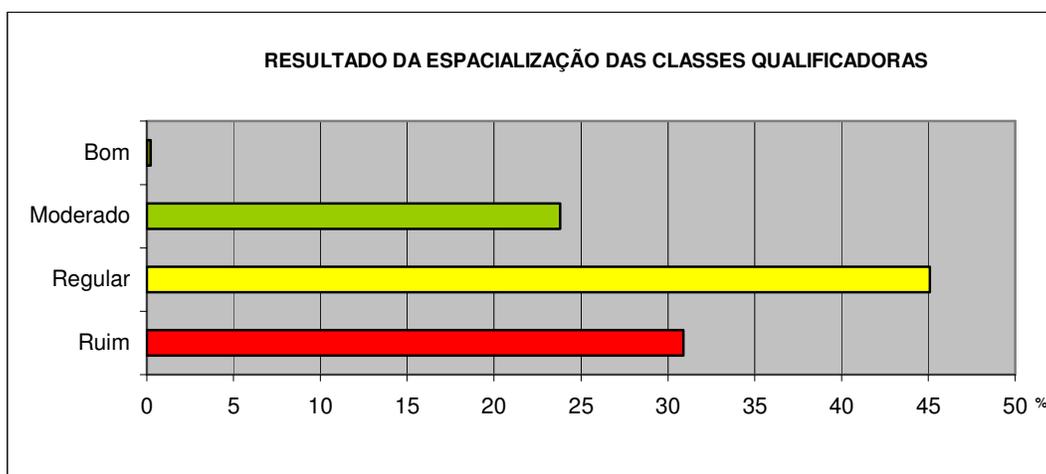


Figura 14 - Resultado da espacialização das classes qualificadoras.

Ainda, com a classificação da área de estudo em quatro classes qualificadoras, foi possível atribuir para as diversas áreas classificadas, a aplicação de determinados instrumentos presentes no Estatuto da Cidade com o objetivo de valorizar a função social da cidade e subsidiar a elaboração de políticas públicas que visem uma melhor gestão territorial no tocante ao desenvolvimento sustentável urbano.

As classes “bom” e “moderado” foram áreas que apresentaram no conjunto, condições mais favoráveis à ocupação. Estão localizadas, principalmente, em setores mais centrais da região leste, onde existe uma boa infra-estrutura e um adensamento urbano que ainda não saturou o sistema viário local.

Estas áreas podem ser consideradas um “lócus privilegiado”, que remete a configuração urbana destas áreas em relação aos demais espaços urbanos da zona leste, que são carentes de infra-estrutura. Sendo assim, este fator está diretamente relacionado ao acesso as funções básicas, serviços e aparelhos públicos urbanos.

Com o agravamento da crise habitacional brasileira, ocorreu uma grande valorização do fator localização no sítio urbano, sendo assim, este “lócus privilegiado” passou a ser alvo de uma grande especulação imobiliária (retenção especulativa de imóvel).

Segundo Oliveira (2001), a retenção especulativa de imóvel urbano ocorre quando o respectivo proprietário não investe em seu terreno e não o vende, esperando que seu valor de mercado aumente com o tempo, em virtude dos investimentos feitos na vizinhança pelo poder público e, também, por agentes privados. O prejuízo que a ociosidade de imóveis pode causar à população é o alto custo, por habitante, de equipamentos e serviços públicos. Isso acontece quando muitos terrenos permanecem baldios no interior de bairros já consolidados e quando, ao redor da cidade, se multiplicam loteamentos dispersos, em área ainda não urbanizada e distante dos locais onde há oferta de empregos, comércio e serviços urbanos.

Para o combate aos terrenos ociosos dedicados à especulação imobiliária localizados nas classes “bom” e “moderado” (Figura 15), podem ser indicados os seguintes Instrumentos previstos no Estatuto da Cidade, aplicados seqüencialmente:

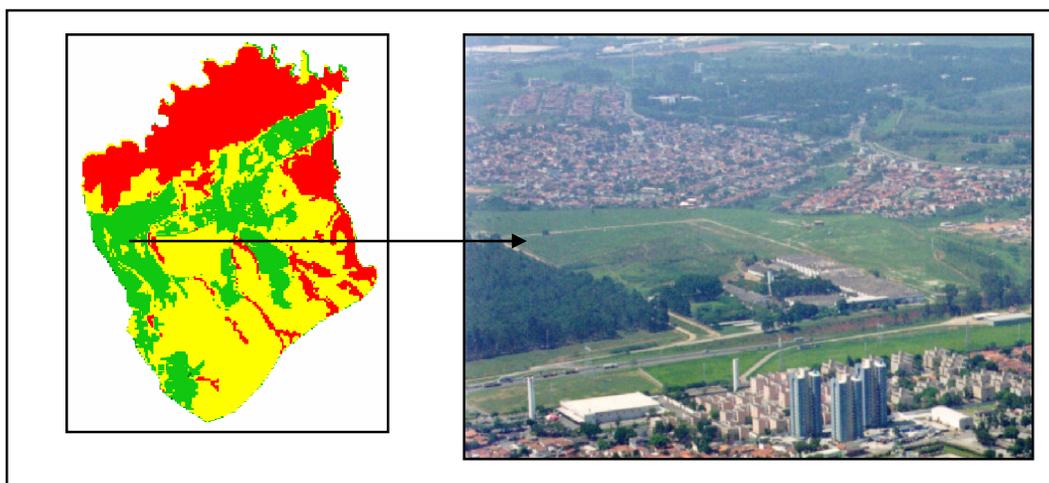


Figura 15 - Terreno baldio localizado na área central e classificado com “moderado”
(Fonte: Adriane Aparecida Moreira, 1999).

Parcelamento, Edificação ou Utilização Compulsórios do Solo Urbano¹⁸ – este instrumento possibilita que o poder público municipal, obrigar os proprietários de imóveis ociosos ou subutilizado a dar uma destinação a estes, o que permite ampliar o acesso à terra urbana para fins de moradia.

Imposto Predial e Territorial Urbano Progressivo no Tempo¹⁹ – este instrumento é utilizado quando os proprietários não atendem à notificação para parcelamento, edificação ou utilização compulsórios e possibilita punir com tributação de valor crescente, anual, os proprietários de terrenos onde a ociosidade ou maU aproveitamento acarrete prejuízo à população.

Desapropriação com Pagamento em Títulos da Dívida Pública²⁰ – após cinco anos de cobrança do IPTU progressivo no tempo, sem o cumprimento pelo proprietário da obrigação de parcelamento, edificação ou utilização, o poder público municipal pode proceder à desapropriação do imóvel, com pagamentos em título da dívida pública de emissão previamente aprovada pelo Senado Federal, com prazo de resgate de até dez anos, em parcelas anuais, iguais e sucessivas, assegurados o valor real da indenização e os juros legais.

¹⁸ Art. 5º da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

¹⁹ Art. 7º da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

²⁰ Art. 8º da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

As áreas que chegarem a ser objeto de desapropriação poderão servir para a promoção de transformações na cidade, dentre elas, por exemplo, a implantação de unidades habitacionais ou a criação de espaços públicos para atividades culturais, de lazer e de preservação do meio ambiente; bem com a destinação de áreas para atividades econômicas voltadas à geração de renda e emprego para a população pobre (OLIVEIRA, 2001).

Um outro importante instrumento para o caso em questão é o Direito de Preempção²¹ – este instrumento confere ao poder público municipal a preferência para a compra de um determinado imóvel urbano, respeitado seu valor no mercado imobiliário, e antes que o imóvel de interesse do município seja comercializado entre particulares.

Isto permite ao município a aquisição de áreas para a construção de habitações populares, atendendo a uma demanda social, bem como para a implantação de atividades destinadas ao lazer e recreação coletivos, como, por exemplo, parques, ou mesmo para a realização de obras públicas de interesse geral da cidade (OLIVEIRA, 2001).

Ainda, em setores desta área central classificada como “bom” e “moderado” e que permitem uma intensificação da urbanização, para uma melhor e maior otimização da infra-estrutura existente, é também interessante a aplicação da outorga onerosa do direito de construir (Figura 16).

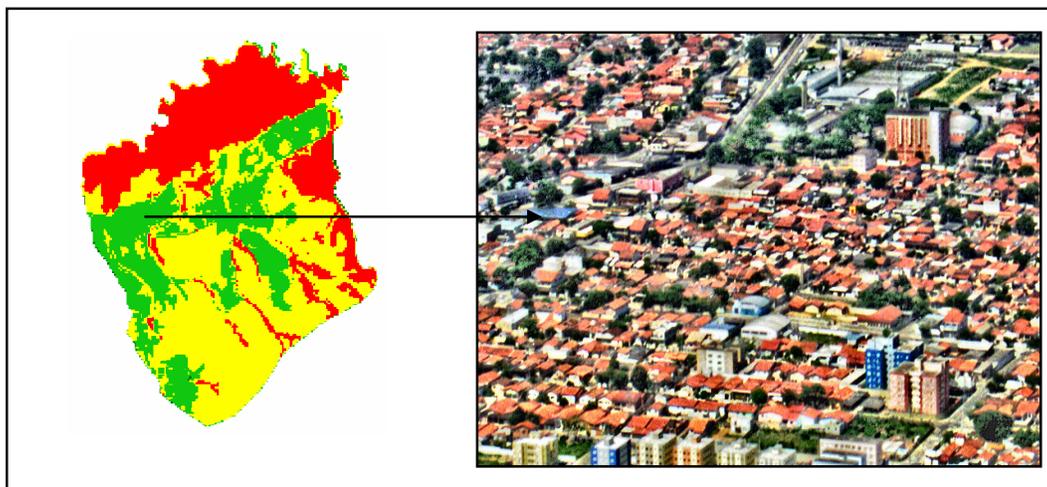


Figura 16 - Área urbanizada na área central classificada como “moderado”.
(Fonte: Adriane Aparecida Moreira, 1999).

A Outorga Onerosa do Direito de Construir²² é um instrumento que permite ao poder público municipal estabelecer uma relação entre a área edificável e a área do terreno, a partir da qual a autorização para construir passaria a ser concedida de forma onerosa.

A utilização deste instrumento possibilita um maior controle de densidades urbanas; permite a geração de recursos para investimentos em áreas pobres; e promove a desaceleração da especulação imobiliária. Cabe salientar, que a sua adoção exige, do poder público, controles muito ágeis e complexos (OLIVEIRA, 2001).

²¹ Art. 25 da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

²² Art. 28 da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

Os recursos advindos da outorga onerosa do direito de construir e de alterações de uso devem ser aplicados na construção de moradias, regularização e reserva fundiárias, implantação de equipamentos públicos urbanos, criação e proteção de áreas verdes ou de valor histórico, cultural ou paisagístico.

Com relação a presença de submoradias nas diferentes classes qualificadoras, podemos observar que os impactos sociais e ambientais da urbanização se entrelaçam e geram uma dinâmica pontilhada de negatividades, levando pessoas a morarem em situações limites, como favelas em áreas de risco²³.

Maricato (2003) afirma que é justamente nas áreas rejeitadas pelo mercado imobiliário privado e nas áreas públicas, situadas em regiões desvalorizadas, que a população trabalhadora pobre vai se instalar:

a. regiões poluídas, beira de córregos e terrenos sujeitos a enchentes (Figura 17):

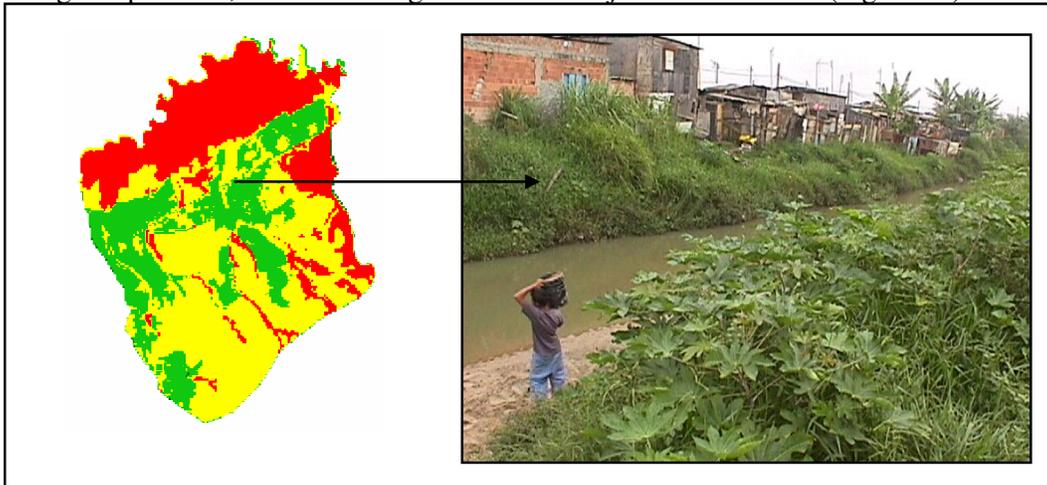


Figura 17 - Sub-moradias localizadas na área central e classificadas como “regular”.
(Fonte: Projeto Macrodrenagem do Município de São José dos Campos, 2001).

b. encostas dos morros (Figura 18):

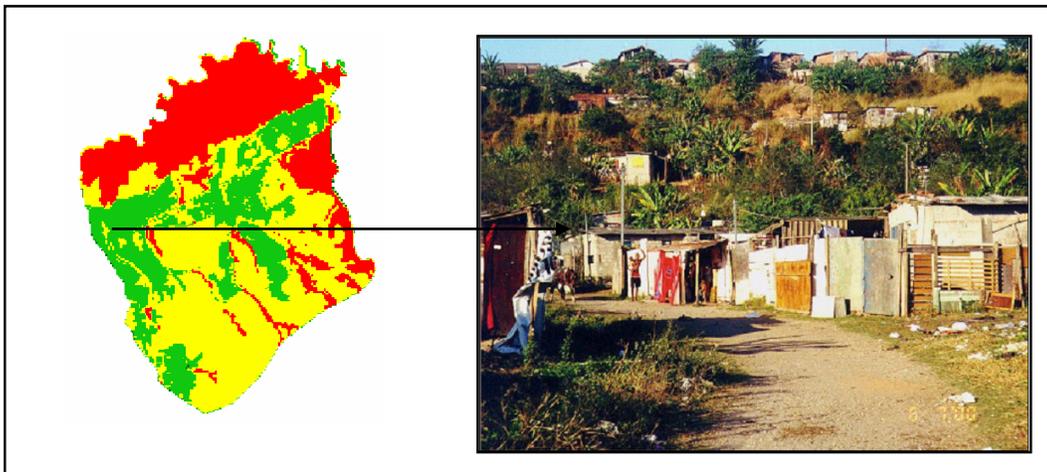


Figura 18 - Sub-moradias localizadas na área central e classificadas como “moderado”.
(Fonte: Patrícia Genovêz, 1999).

²³ Definem-se como áreas de risco, aquelas que podem resultar em danos à pessoa humana ou na destruição do ambiente devido à forma de uso ou de ocupação inadequada da terra (Mendonça, 2003).

c. outros tipos de riscos e áreas de proteção ambiental (onde a vigência da legislação de proteção e a ausência de fiscalização definem a desvalorização).

Procurando mitigar estes impactos negativos da urbanização, muitas vezes, as soluções encontradas pelos entes públicos ou agravam estes problemas ou acabam gerando outros impactos sócio-ambientais ainda maiores. Casos clássicos são os de realocação de populações que vivem em áreas de risco para as periferias dos municípios, ocupando, na maioria das vezes, áreas com precárias condições de sobrevivência e baixa qualidade ambiental e de vida, o que agrava a exclusão social e a segregação espacial dos centros urbanos.

Convém salientar que, segundo o conceito de Rezende (1982), as submoradias definidas nas figuras 17 e 18 surgiram justamente pela necessidade de uma parcela da população em se instalar em um local onde existe acessibilidade a um centro de emprego e a equipamentos urbanos (lócus privilegiado), áreas de alto valor da terra e, portanto, impróprias para essa população de baixa renda da cidade sob o aspecto do consumo legalizado.

Assim, no sentido de se evitar o deslocamento de populações para as periferias através de programas de realocação urbana, o Instituto Pólis (2005) afirma que, no tocante as áreas de risco, faz-se necessário mapeamentos e estudos que permitam definir os diferentes graus de risco existentes nas diferentes ocupações. Com isto, é possível promover programas para controlar estes riscos, uma vez que algumas destas áreas podem receber obras que permitam sanar o problema, como é o caso dos programas de contenção de encostas.

Por apresentarem condições de localização, qualidade ambiental e geotécnica favoráveis, as submoradias visualizadas na figura 18 estão localizadas em uma área definida como “moderada” para a implantação de assentamentos humanos, devendo então, primeiramente, sofrer uma intervenção para a contenção e mitigação dos riscos existentes.

Ainda, deve-se adequar a Zona Especial de Interesse Social (ZEIS): ali criada, em face das diretrizes estabelecidas no Estatuto da Cidade. Como os padrões urbanísticos idealizados são, na prática, inviáveis para esta população (figura 18), a criação da ZEIS nesta área permite adotar padrões urbanos mais flexíveis e compatíveis com a população de baixa renda, evitando deixá-las na ilegalidade.²⁴

Após, procede-se a Regularização Fundiária²⁵, objetivando dar licitude à ocupação da terra nos casos em que o acesso à habitação tenha ocorrido de forma irregular.

Entretanto, quando em última instância, a área de risco não comportar nenhum programa de regularização é que o Poder Público pode fazer o remanejamento da população. Este é caso das submoradias localizadas na área classificada como “regular” (Figura 17).

²⁴ A instituição das ZEIS, estabelecendo regras especiais para determinada área, permitem a municipalidade promover a integração das pessoas mais necessitadas aos espaços habitáveis (OLIVEIRA, 2001).

²⁵ Normalmente a expressão “regularização fundiária” é utilizada para designar a atuação destinada a revestir com maiores proteções a posse existente sobre determinado imóvel. Isso pode ocorrer mediante a instituição de um título de propriedade ou de outro direito real. Note-se que a posse é situação de fato com proteções jurídicas em menor grau do que as existentes para os direitos reais. Não há lei geral sobre o assunto (OLIVEIRA, 2001).

Como estas submoradias estão localizadas em Área de Preservação Permanente e sujeita à inundação, isto inviabiliza qualquer programa de regularização.

Nestes casos é necessário que esta população seja removida para uma região vizinha à área original, com condições de habitabilidade que propicie uma vida digna aos seus moradores (INSTITUTO PÓLIS, 2005).

Convém salientar que esta região vizinha à área original pode ser adquirida através de instrumentos já mencionados, como a Desapropriação com Pagamento em Títulos da Dívida Pública e o Direito de Preempção.

No que tange aos recursos para programas de regularização e realocação de submoradias, estes podem vir da Outorga Onerosa do Direito de Construir.

Desta forma, é possível resolver ou mitigar os problemas relacionados às áreas de risco e ao mesmo tempo, considerar como parte integrante da política de intervenção/realocação urbana a questão “localização”, uma vez que este conceito está diretamente relacionado ao direito de acesso desta população às funções básicas da cidade.

Já, a ocorrência de habitações não normatizadas e de caráter clandestino na periferia da zona leste do município de São José dos Campos (figura 19), caracterizadas pela baixa qualidade ambiental e pela distância dos equipamentos públicos urbanos, acabaram contribuindo para caracterizar este setor como “regular” e “ruim”, de acordo com a metodologia utilizada.



Figura 19 - Loteamentos clandestinos periféricos classificados como “ruim”.
(Fonte: Central de Movimentos Populares, 2001).

Assim, supõe-se que a adensamento urbano da periferia da zona leste, da forma como vem ocorrendo, tende a congestionar ainda mais os serviços públicos oferecidos à população residente neste local, uma vez que esta é subequipada e distante, além de aumentar as desigualdades no acesso aos bens/serviços urbanos e agravar a segregação socioespacial existente.

Silva (1999) afirma que os centros urbanos, cujas desigualdades e deficiências se acentuam, criam obstáculos e estrangulamentos para a expansão das políticas urbanas, pois temos custos crescentes de transportes, energia, falta de saneamento, abastecimento de água, deficiência de comunicação, falta de preservação ambiental, etc.

Para Ab'Sáber (1986), a partilha de glebas em posições descontínuas na cidade, a quilômetros de distância da área central, pode gerar uma dinâmica pontilhada de negatividades, com um alto custo social e propiciadora de imensas desigualdades. Para ele, é necessária uma reforma de mentalidade administrativa, mediante a incorporação de outras dimensões da percepção dos fatos espaciais.

Assim, faz-se necessário primeiramente, ampliar a oferta de moradias nas áreas mais centrais e dotadas de toda infra-estrutura urbana, preenchendo os vazios ali existentes e evitando um maior adensamento da periferia da zona leste.

Quanto aos loteamentos clandestinos localizados na periferia da zona leste classificados como “regular” e “ruim” pela metodologia utilizada, faz –se necessários investimentos para sanar os problemas ambientais e de infra-estrutura para proceder a regularização fundiária.

Como estas ocupações clandestinas ocorrem em posições descontínuas e permeadas por grandes glebas de particulares que irão se beneficiar com a valorização destes terrenos devido aos investimentos públicos para a regularização fundiária, pode-se cogitar a realização das Operações Urbanas Consorciadas²⁶ com a participação financeira destes proprietários para evitar ganhos especulativos.

As Operações Urbanas Consorciadas referem-se a um conjunto de intervenções e medidas, coordenadas pelo poder público municipal, com a finalidade de preservação, recuperação ou transformação de áreas urbanas contando com a participação de proprietários, moradores usuários permanentes e investidores privados. O objetivo é alcançar, em determinada área, transformações urbanísticas estruturais, melhorias sociais e a valorização ambiental (OLIVEIRA, 2001).

Vale também destacar que foram classificadas como “ruim” para a implantação de assentamentos humanos, principalmente devido as restrições em relação ao meio físico, a grande Várzea do Rio Paraíba do Sul (Figura 20) e as várzeas de seus afluentes.

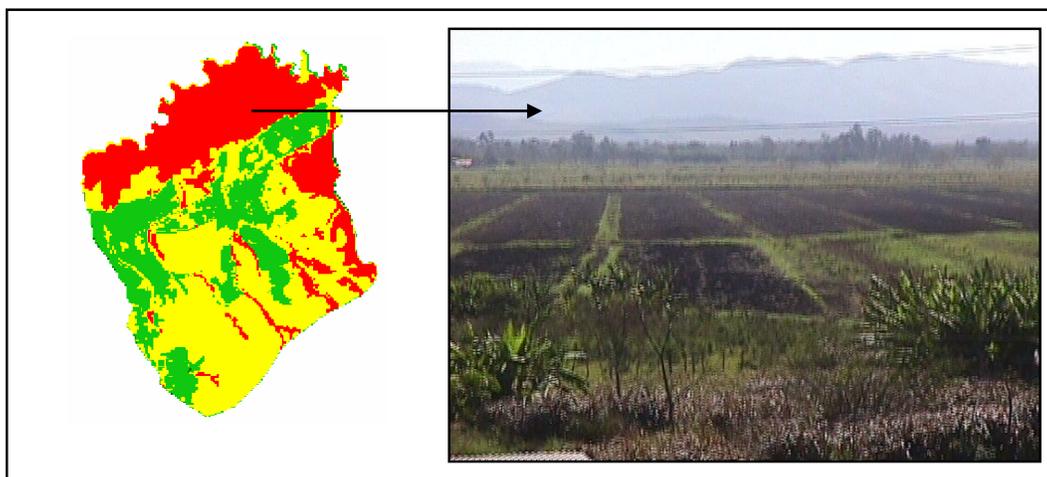


Figura 20 - Área de várzea do Rio Paraíba do Sul classificada como “ruim”.
(Fonte: Projeto Atlas Ambiental do Município de São José dos Campos, 2000).

²⁶ Art. 32 da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

As áreas de várzea do Rio Paraíba do Sul são constituídas de terrenos baixos e praticamente planos, com declividade geralmente inferior a 5% e sujeitos à inundação periódica. A característica dominante deste solo é a má drenagem ou hidromorfismo.

Brito (1944) afirma que a inundação é um fenômeno da natureza e se o homem o considera uma calamidade é porque habita ou cultiva terras inundáveis – as várzeas, as depressões alagadiças, os pântanos, os lagos. Essas áreas constituem elementos reguladores das águas correntes. A função é simples e conhecida: reter uma parte da água das chuvas ou das enchentes para fazer lentamente a entrega ao curso de água. Dizia em seu alerta que querer tomar definitivamente ao rio a várzea de expansão das águas para nelas edificar é estabelecer o problema das inundações.

Ab’Sáber (1995) salienta que área em comento não possui aptidão para a produção de espaços urbanos. Entretanto, no momento atual, onde todos os espaços são vistos como mera mercadoria financeiramente especulável, tem ocorrido um assédio sistemático a sua ocupação pela atividade urbana.

Como solução para estas várzeas classificadas como “ruins” para a implementação de assentamentos humanos, temos a criação e implementação de Unidades de Conservação que é regida pela Lei Federal nº 9985/2000 (Sistema Nacional de Unidades de Conservação).

Segundo Oliveira (2001), os espaços territoriais que apresentem significativa importância ou representatividade para o meio ambiente natural devem ser objeto de especial proteção, segundo o artigo 225, § 1º, III da Constituição Federal. Para tanto a Lei Federal nº 9985/2000 estabelece uma série de unidades de conservação (parques, estações ecológicas, áreas de proteção ambiental etc.), cada qual adequada para um tipo de situação. Todos os entes federativos são competentes para estabelecer tais unidades em seus respectivos territórios, observando a disciplina contida na legislação federal e eventualmente as suas respectivas normas.

Um outro importante instrumento previsto no Estatuto da Cidade para este estudo de caso é o Estudo de Impacto de Vizinhança.²⁷ Este determina que uma lei municipal deverá definir critérios, delimitando as espécies de empreendimentos que dependerão de um estudo prévio de impacto de vizinhança como condicionante de sua aprovação. O Estudo de Impacto de Vizinhança deve ser executado com o objetivo de contemplar os efeitos positivos e negativos do empreendimento, analisando no mínimo, os impactos relativos ao adensamento populacional, aos equipamentos urbanos e comunitários, ao uso e ocupação do solo, a valorização imobiliária, a geração de tráfego, a demanda por transporte público, a paisagem urbana e o patrimônio natural e cultural.²⁸

Assim, esta metodologia de análise e integração de dados, ao trazer um conjunto de dados que esboçam, com clareza, um mosaico das estruturas relativas ao lugar e das variáveis relativas as populações que habitam este lugar, fornece também, importantes subsídios para a análise do impacto de grandes empreendimentos na área em estudo.

Finalizando, Maricato (1999) afirma que todos o processo de implementação dos instrumentos do Estatuto da Cidade deve ser feito com uma ampla participação da

²⁷ Art. 36 da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

²⁸ Cymbalista (2001) alerta para a imperiosa necessidade de levar-se em conta impactos que ultrapassem aqueles sobre o sistema viário, como variáveis ambientais, paisagísticas, econômicas e sociais.

comunidade, uma vez que, sem a participação social a implementação de qualquer plano se torna inviável, pois toma os moradores como objetos e não como sujeitos.

Entretanto, para que a participação social através da Gestão Democrática da Cidade,²⁹ que é uma das principais engrenagens do Estatuto da Cidade, seja efetiva e consciente, faz-se necessário fornecer subsídios, propiciando dados organizados e com vínculo geográfico que tenham a capacidade de representar e interconectar dados; revelar territórios e realidades invisíveis e acompanhar as dinâmicas municipais de maneira integrada.

Nesse sentido, os dados utilizados neste estudo de caso, bem como a produção de dados a partir da definição de um mapa urbano básico com acesso livre, permite atingir a chamada “função social do dado” e cumprir o princípio constitucional da informação.

Com isto, seria possível qualificar a participação social dos habitantes do local, ampliar o debate público do urbano e realizar um melhor monitoramento/controlado social da aplicação dos instrumentos de política urbana previstos no Estatuto da Cidade.

5 - Conclusão

A utilização de dados secundários de diversas fontes apresentou-se como uma limitação metodológica, não permitindo uma análise pelo método da classificação contínua, possibilitando apenas a análise com uso da classificação pontual³⁰, uma vez que a análise final utiliza sempre dados gerados por terceiros e disponibilizados em sua forma final, sem informações sobre seus processos geradores e de sua qualidade em relação as propriedades de extensão e localização.

Câmara et. al. (2004) afirma que os processos tradicionais de análise geográfica (discretizar variáveis para posteriormente combiná-las) engendram uma grande perda de sensibilidade no resultado final. A alternativa é trabalhar sempre com dados em representação contínua³¹, e utilizar análises quantitativas sobre mapas geográficos.

Entretanto, se a incerteza posicional do diagnóstico, provocada pelo uso de dados secundários sem muitas informações adicionais, dificulta afirmações definitivas quanto as classes qualificadoras utilizadas, por outro lado permitiu demonstrar que o conjunto de dados utilizados esboçam, com clareza, um mosaico das estruturas relativas ao lugar e das variáveis relativas as populações que habitam este lugar, criando novas possibilidades para a implementação dos instrumentos previstos no Estatuto da Cidade. Assim, esta metodologia ao ser aplicada em conjunto com estes instrumentos avança na instrumentalização necessária para o desenvolvimento de uma gestão democrática da cidade que contemple uma visão sistêmica para a política urbana.

²⁹ Art. 43 da Lei Nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto da Cidade).

³⁰ “As operações pontuais geram como saída um geo-campo cujos valores são função apenas dos valores dos geo-campos de entrada em cada localização correspondente. Podem operar apenas sobre um campo (ex, fatiar um modelo numérico de terreno, classificar uma imagem) ou realizar intersecções entre conjuntos espaciais (ex. operações booleanas entre mapas temáticos)” (Câmara, et al., 2004, p. 3-2).

³¹ “O uso de técnicas de classificação contínua busca utilizar as noções de conjuntos nebulosos (“fuzzy”), para substituir os processos tradicionais de geração de mapas. Este aspecto é particularmente evidente no manuseio de mapas temáticos para análises de meio-ambiente. Uma fronteira arbitrária, definida precisamente por uma linha, entre dois tipos de solo, representa erradamente o que é, na realidade, uma variação contínua (Burrough, 1986). Quando realizamos operações de superposição entre mapas temáticos, o erro inerente à divisão arbitrária dos mapas em áreas estanques é propagado” (Câmara, et al., 2004, p. 3-10).

Daí, a importância de aquisição e produção de dados municipais que permitam melhor visualizar a realidade local e gerar metodologias de integração mais adequadas.

Assim, para implementar o Estatuto da Cidade e atingir a “utopia” denominada “Cidades Sustentáveis” neste descrita, é de fundamental importância instrumentalizar o poder público e a comunidade com dados adequados que analisados de maneira integrada possibilitem a observação das dinâmicas municipais.

Referências Bibliográficas

- AB’SÁBER, A. N. **Humanidades**. São Paulo: Edusp, 1986. 105 p.
- AB’SÁBER, A. N. **Estratégias para a proteção da orla das escarpas, banhados e paisagismo das avenidas de fundo de vale em São José dos Campos**. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 1995.
- Alves, M; Monteiro, A. M. V. **Integração de Dados Socioterritoriais e Características do Meio Físico, em Bacias Hidrográficas, como Subsídio à Gestão da Saúde Pública**. In: I Simpósio Nacional de Geografia da Saúde. Presidente Prudente: Anais... CD - Room, 2003.
- Alves, M; Fantin, M; Monteiro, A. M. V. **A Integração de Dados Socioterritoriais como Subsídio ao Estudo de Impacto de Vizinhança para Políticas Urbanas: o Caso da Política Habitacional em S. J. Campos**. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia: Anais... p. 3707-3714, 2005.
- BARROSO, L. R. **O direito constitucional e a efetividade de suas normas: limites e possibilidades da constituição brasileira**. Rio de Janeiro: Renovar, 2000.
- BRASIL. **Lei Federal 10.257, de 10 de JULHO de 2001 (Estatuto da Cidade)**. Disponível em: <<https://www.planalto.gov.br/L10257.htm>>. Acesso em: 20 janeiro 2005.
- BRASIL. **Lei Federal nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (Código Florestal)**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L4771.htm>. Acesso em: 20 janeiro 2005.
- BRASIL. **Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979 (Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências)**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6766.htm>. Acesso em: 20 janeiro 2005.
- BRASIL. **Lei nº 9.985, de 18 de junho de 2000 (Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza)**. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9985.htm>. Acesso em: 20 janeiro 2005.
- BRITO, F.R.S. DE. **Defesa contra as inundações**. Rio de Janeiro: Imprensa Nacional, 1944. (Obras Completas de Saturnino de Brito, v. 19).
- BUCCI, M. P. D. **Direito administrativo e políticas públicas**. São Paulo: Editora Saraiva, 2002. 342 p.
- BURROUGH, P. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986.
- CÂMARA, G. **Introdução ao Geoprocessamento**. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/spring/teoria/introdu1/teoria11.htm>, Acesso em: 28 junho 2000.
- CÂMARA, G. CLÁUDIO, B. FREITAS, U. M. **Curso de Geoprocessamento em Projetos Ambientais. Operações de Análise Geográfica**. Disponível em: <http://www.inpa.gov.br/siglab/paginas/material_didat/menu.htm>. Acesso em: 18 julho 2004.
- CÂMARA, G. SOUZA, R.C.M. FREITAS, U.M. GARRIDO, J. **SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modeling**. Elmsford, *Computers & Graphics*, v.20, n.3, p. 395-403, May-Jun, 1996.
- CAMPOS FILHO, C. M. **Cidades brasileiras: seu controle ou seu caos**. 2 ed. São Paulo: Studio Nobel, 1992.
- CASTELLS, M. A. **A questão urbana**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1983.
- COSTA S. M.; SANCHES, R. **Crescimento Urbano e Meio Ambiente: Uma Abordagem Metodológica Utilizando Geotecnologias**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Foz do Iguaçu: Anais... p. 1081-1088, 2001.
- CYMBALISTA R. **Estudo de Impacto de Vizinhança. Idéias para a Ação Municipal**. São Paulo: Instituto Pólis, 2001. 3 p.
- Fantin, M; Alves, M; Monteiro, A. M. V. **A Relevância de uma Infra-estrutura Geoinformacional como Subsídio ao Desenvolvimento de Políticas Urbanas: O Caso da Características do Meio**

- Físico e Dados Sócio-territoriais no Município de S. J. Campos.** In: XI Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. São Paulo: Anais...p. 3785 - 3801, 2005.
- FREITAS, R.N.; SERPA, M.J. DE J.; MANOLESCU, F.M.K. **Favela e Programa de Desfavelização.** São José dos Campos: PLUR/IPD/UNIVAP, 2002.
- GASPARINI, D. **Regularização de Loteamento e Desmembramento.** São Paulo: Fundação Prefeito Faria Lima – CEPAM, 1985.
- GENOVÊZ, P.C. **Território e Desigualdades: análise espacial Intra-Urbana no estudo da dinâmica de exclusão/inclusão social no espaço urbano em São José dos Campos – SP.** 2002. 201 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2002.
- GOUVÊA, R.A.R. **O espaço urbano e a clandestinidade: um estudo de caso dos loteamentos clandestinos no município de São José dos Campos; SP.** 2003. 234p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional). Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2003.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - (IPT). **Carta Geotécnica do Município de São José dos Campos.** São Paulo: IPT, 1996.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – (INPE). **Apostila teórica de introdução ao Spring.** São José dos Campos: INPE, 2004.
- INSTITUTO PÓLIS. **Regularização da terra e da moradia: o que é e como implementar.** São Paulo: Gráfica da Caixa Econômica Federal, 2002.
- KOGA, D. **Medidas de Cidades: entre territórios de vida e territórios vividos.** São Paulo: Editora Cortez, 2003.
- MARICATO, E. **Urbanismo na periferia do mundo globalizado.** São Paulo, *São Paulo em Perspectiva*, v.14, n. 4, p. 21-33, 2000.
- MARICATO, E. **Metrópole, legislação e desigualdade.** São Paulo, *Estudos Avançados*, maio/ago., vol.17, nº 48, p.151-166, 2003.
- MARICATO, E. **As idéias fora do lugar e o lugar fora das idéias.** In: ARANTES, O.; VAINER, C.; MARICATO, E. **A cidade do pensamento único: desmanchando consensos.** Petrópolis: Editora Vozes, 1999.
- MARICATO, E. **Brasil, Cidades: alternativas para a crise urbana.** Petrópolis: Vozes, 2001.
- MENDONÇA, C.A.L. **Intervenções em áreas de risco.** In: FERNANDES, E. ALFONSIN, B. **A lei e a ilegalidade na produção do espaço urbano.** Belo Horizonte: Editora Del Rey, 2003.
- MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Lei Complementar nº 165, de 15 de dezembro de 1997 (Dispõe sobre a ordenação do território mediante controle do parcelamento, do uso e da ocupação do solo no Município).** Disponível em: <p://www.sjc.sp.gov.br/downloads/legislacao/LEI165_zoneamento.pdf >. Acesso em: 20 janeiro 2004.
- OLIVEIRA, I.C.E. **Estatuto da Cidade para compreender.** Rio de Janeiro: IBAM/DUMA, 2001.
- PEREIRA, M. N.; KURKDJAN, M. L. N. O.; FORESTI, C. **Cobertura e Uso da Terra através de Sensoriamento Remoto.** S. J. Campos: INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1989.
- PMSJC (Prefeitura Municipal de São José dos Campos). **São José em Dados.** Disponível em: <http://www.sjc.sp.gov.br/html/prefeitura/sjcemdados.htm>>. Acesso em: 12 novembro 2000.
- REZENDE, V. **Planejamento urbano e ideologia.** Rio de Janeiro: Civilização Brasileira, 1982.
- ROCHA, J. C. S. **Função ambiental da cidade: direito ao meio ambiente urbano ecologicamente equilibrado.** São Paulo: Juarez de Oliveira, 1999.
- ROCHA, P. M. **Espaço urbano a favor do homem.** In: Roda Viva. São Paulo: TV Cultura, 17 jun. 2002.
- ROLNIK, R. **Estatuto da Cidade – Instrumento para as Cidades que Sonham Crescer com Justiça e Beleza.** Disponível em: <<http://www.estatutodacidade.org.br/estatuto/artigo1.html>>. Acesso em: 11 outubro 2002.
- SANTOS, M. **O Espaço do Cidadão.** 2 ed. São Paulo: Nobel, 2000.
- SANTOS, M. **Manual de geografia urbana.** São Paulo: Hucitec, 1981.
- SILVA, E. J. **Parcelamento e Desmembramento do Solo Urbano.** Leme: Led, 1999.
- VALÉRIO FILHO, M. KURKDJAN, M.L.N.O. PERRELLA, A.C.F. PEREIRA, M.N. ALVES, M. FANTIN, M. **Projeto Macrodrenagem de São José dos Campos - Margem Direita do Rio Paraíba do Sul (no prelo).** São José dos Campos: Prefeitura Municipal de São José dos Campos - Universidade do Vale do Paraíba - Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, 2003.
- VILLAÇA, F. **Espaço Intra-urbano no Brasil.** São Paulo: Studio Nobel, 2001.

Compatibilização de Dados Censitários para Análises Multitemporais com o Auxílio de Imagens Landsat

Flávia F. Feitosa, Antônio Miguel V. Monteiro, Gilberto Câmara

1 Introdução

São inúmeros os estudos que demandam dados provenientes de levantamentos populacionais cujas informações coletadas são relativas a indivíduos localizados em pontos específicos do espaço. Contudo, estas informações são de caráter confidencial e sua disponibilização exige cuidados para preservar a privacidade dos indivíduos. Por esta razão, a solução normalmente adotada para a representação destes dados é sua agregação geográfica a unidades de área (Martin, 1996). Este procedimento parte da premissa de que as características populacionais apresentam um padrão discreto, que pode ser representado por polígonos fechados internamente homogêneos e com variações abruptas entre si. Sabe-se, porém, que normalmente o processo de delimitação destas unidades de área não objetiva a determinação de locais relativamente homogêneos, estando condicionados a critérios operacionais de levantamento ou políticos (Câmara et al., 2002).

No caso do Censo Demográfico Brasileiro, os registros individuais coletados são agregados em unidades de área conhecidas como setores censitários. De acordo com o IBGE, um setor censitário representa uma “unidade de controle cadastral formada por área contínua, situada em um único quadro urbano ou rural, com dimensão e número de domicílios que permitam o levantamento das informações por um único recenseador, segundo cronograma estabelecido” (IBGE, 2000b). Em outras palavras, a delimitação dos setores censitários, por definição, é guiada por critérios exclusivamente operacionais. Em casos como este, no qual o estabelecimento das unidades de área desconsidera a distribuição espacial da população, os resultados gerados sobre os dados são influenciados pela definição espacial das fronteiras destas unidades. Esta interferência é conhecida como *Problema das Unidades de Área Modificáveis* – MAUP (Openshaw, 1984).

Em análises temporais, as alterações nos resultados das análises provocadas pelo MAUP são ainda mais sérias, dado que as fronteiras dos setores censitários são geralmente modificadas a cada recenseamento. Estudos sob estas condições - sejam eles baseados em cálculos de índice, taxas, modelos de regressão etc. - tornam-se limitados, pois não é possível

distinguir se as mudanças indicadas pelos resultados de fato ocorreram ou se representam meras distorções provocadas pelas alterações nas fronteiras dos setores censitários.

Uma opção existente para trabalhos desta natureza é o agrupamento de setores censitários compatíveis nos dois censos utilizando o conceito de áreas mínimas comparáveis (IPEA, 2004). Contudo, em geral este procedimento implica em uma agregação expressiva das informações associadas aos setores e conseqüente perda de detalhes fornecidos pelos dados originais.

Buscando amenizar este problema, este artigo apresenta um procedimento alternativo para a compatibilização da geometria dos setores censitários de datas distintas, assim como dos dados a eles associados. Diferentemente do critério utilizado para o estabelecimento de áreas mínimas comparáveis, que envolve apenas a agregação de áreas, o procedimento aplicado inclui também a desagregação de alguns setores. Esta desagregação é possível graças à integração de dados populacionais a dados do meio físico. Para tanto, imagens de satélite são utilizadas na identificação e quantificação das áreas ocupadas por usos urbanos nos anos dos levantamentos. Para ilustrar o procedimento, foram compatibilizados dados censitários dos anos de 1991 e 2000 relativos à área urbana do município de São José dos Campos (SP).

2 Compatibilização dos dados censitários de São José dos Campos

Conforme o exposto na seção anterior, cada setor censitário deve ser dimensionado de tal forma que permita o levantamento das informações por um único recenseador em um determinado tempo. Nas áreas urbanas, estes condicionantes resultam em setores com aproximadamente 250 domicílios. Em virtude deste critério de zoneamento, o aumento da população nas cidades vem acompanhado de um aumento no número de setores censitários, o que impõe dificuldades a estudos temporais.

No caso de São José dos Campos, cujo incremento da população no período 1991-2000 foi de 96.943 habitantes, a diferença entre o número de setores censitários dos dois últimos recenseamentos foi significativa. Em 1991, o município era subdividido em 356 setores censitários e, em 2000, passou a ser subdividido em 759 setores. A Figura 1 mostra a localização do município de São José dos Campos e a área selecionada para a compatibilização dos setores de 1991 e 2000, que corresponde à área urbana e de expansão urbana da cidade (PMSJC, 2003). A área selecionada era subdividida em 347 setores no ano de 1991 (340 setores inteiros e 7 parciais) e passou a ser subdividida em 739 setores no ano de 2000.

Para a compatibilização das bases foram utilizados os seguintes dados:

- Censos Demográficos de São José dos Campos de 1991 e 2000 (IBGE, 1991, 2000).
- Tabelas de comparabilidade entre os setores censitários de 1991 e 1996 e entre os setores de 1996 e 2000 (IBGE, 1996, 2000c). Estas tabelas foram fornecidas pelo IBGE de São Paulo e descrevem a equivalência dos setores censitários em relação aos setores do levantamento anterior, assim como sua formação e o motivo das alterações ocorridas.
- Imagens Landsat-5/TM (INPE, 1990) e Landsat-7/ETM+ (INPE, 2000) nas bandas 3 (0,63 μm - 0,69 μm), 4 (0,76 μm - 0,90 μm) e 5 (1,55 μm - 1,75 μm). As imagens correspondem às datas 27/04/90 e 09/01/00, respectivamente, e à órbita/ponto 219/76. A utilização de uma imagem do ano de 1990, ao invés de 1991, foi necessária em virtude da presença de nuvens nas imagens adquiridas durante o ano do recenseamento.
- Mosaico digital ortorretificado (PMSJC, 2003), referente ao ano de 2000 e na escala de 1:30.000.
- Dados complementares da cidade, mapas digitais do sistema viário e das quadras na escala de 1:2.000 (PMSJC, 2003).



Figura 1 – Localização de São José dos Campos (SP) e indicação da área selecionada para a compatibilização dos dados censitários.

Fonte: Adaptado de IBGE (2000) e INPE (2000).

2.1 Registro das imagens Landsat e delimitação das áreas de ocupação urbana

As imagens Landsat-5/TM (INPE, 1990) e Landsat-7/ETM+ (INPE, 2000) foram registradas tomando-se como referência o mosaico digital ortorretificado do ano 2000. Para o registro das imagens, foram utilizados polinômios de primeiro grau e seis pontos de controle distribuídos sobre a área de interesse.

Após as operações de registro, as áreas de ocupação urbana puderam ser extraídas das imagens. Para tanto, optou-se por uma classificação por interpretação visual sobre composições coloridas formadas pelas bandas 5, 4 e 3.

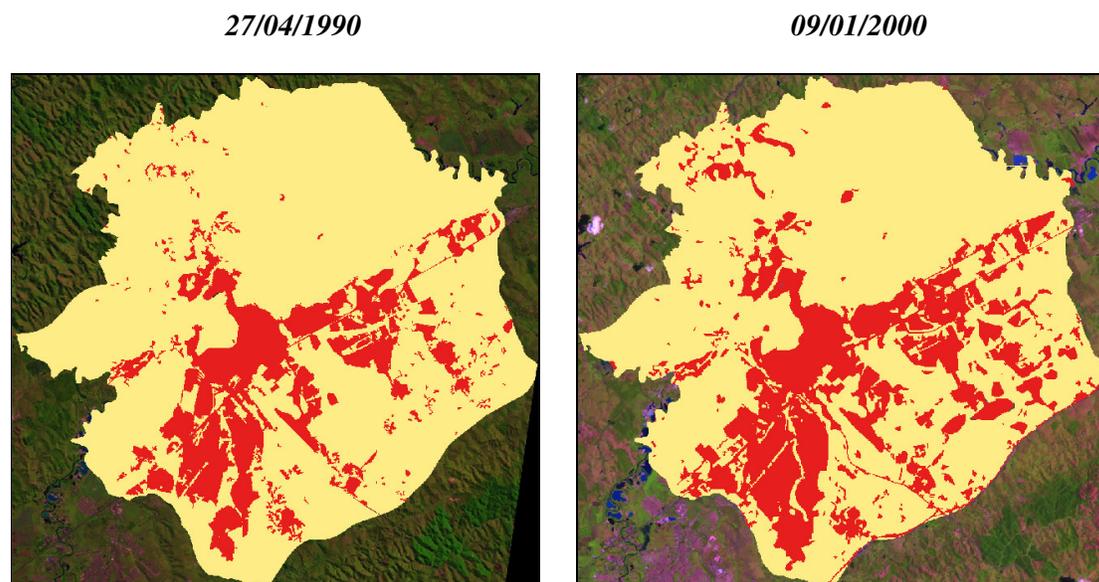


Figura 2 - Delimitação das manchas urbanas (em vermelho) sobre as imagens Landsat-5/TM (27/04/90) e Landsat-7/ETM+ (09/01/00).

Fonte: INPE (1990, 2000).

A classificação foi realizada com o auxílio dos mapas digitais do sistema viário e das quadras sobrepostos às imagens. Este procedimento permitiu uma delimitação mais precisa das áreas urbanas, dado que a diversidade dos materiais presentes nestas áreas por vezes dificulta sua identificação, mesmo quando realizada de maneira não-automática. A Figura 2 indica, em vermelho, as áreas de ocupação urbana em cada uma das imagens. Os procedimentos de registro e classificação foram realizados no software SPRING (Câmara et al., 1996).

2.2 Compatibilização das bases geográficas dos setores censitários de 1991 e 2000

Após o registro e classificação sobre as imagens Landsat, uma prévia compatibilização das bases geográficas dos setores censitários de 1991 e 2000 foi realizada. Este procedimento resultou em uma nova base, constituída por setores provenientes da base de 1991 e de 2000. Nas áreas urbanas já consolidadas em 1991, a nova base foi constituída pelos setores desta data, ao passo que as demais áreas foram subdivididas pela geometria dos setores criados em 2000. A Figura 3 ilustra o processo de elaboração desta base compatibilizada, indicando, em vermelho, os setores provenientes da base de 1991 e, em amarelo, os setores provenientes da base de 2000.

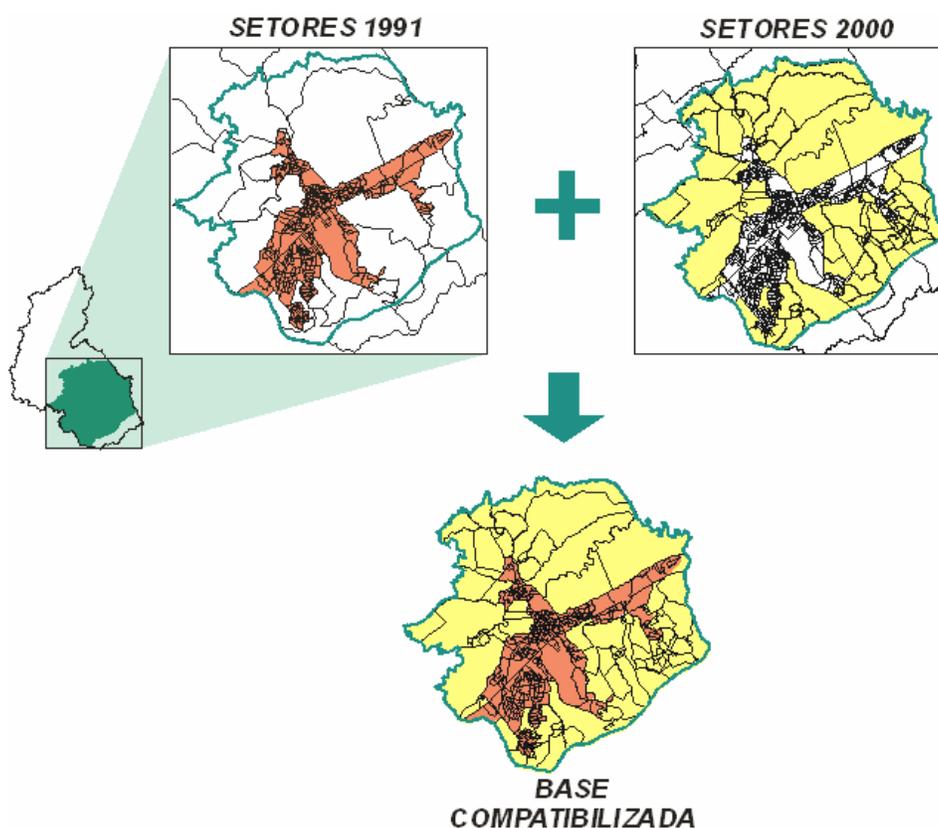


Figura 3 – Processo de elaboração da base geográfica compatibilizada.

Em virtude de erros inerentes às bases cartográficas originais, a sobreposição das mesmas gerou uma série de polígonos espúrios, ou seja, polígonos resultantes da intersecção de linhas que representam as mesmas feições, mas que têm representações digitais discrepantes (D'Alge, 2001). Nestes casos, é recomendável uma análise sobre os dados originais e a escolha da melhor representação como base para a digitalização (D'Alge, 2001). Comparando

com o mapa do sistema viário e as ortofotos da área, a geometria dos setores de 2000 foi considerada mais confiável do que a dos setores de 1991 e, por conseguinte, utilizada como referência na edição vetorial da base compatibilizada. Esta base, originalmente elaborada no software AutoCAD, foi importada para o software SPRING e a cada um de seus polígonos foi associado um código único.

2.3 Elaboração de tabelas de equivalência entre os polígonos da base compatibilizada e os setores originais

Após a compatibilização da base cartográfica, iniciou-se a etapa de elaboração de uma tabela de equivalência entre os polígonos desta nova base e os setores censitários de 1991 e 2000. Esta tabela foi elaborada com o auxílio das tabelas de comparabilidade dos setores 1991-1996 e 1996-2000 e das áreas urbanas existentes nos anos de 1990 e 2000, previamente delimitadas sobre as imagens Landsat (seção 2.1).

A tabela de equivalência elaborada apresenta os seguintes campos: (a) código dos polígonos da base compatibilizada (ID9100), (b) código do setor censitário de 1991 (ID1991), (c) peso do setor censitário de 1991 em relação ao polígono da base compatibilizada (PESO91), (d) código do setor censitário de 2000 (ID2000) e (e) peso do setor censitário de 2000 em relação ao polígono da base compatibilizada (PESO00).

A Figura 4 mostra alguns registros da tabela de equivalência que ilustram polígonos da base compatibilizada cuja equivalência em relação aos setores de 1991 e 2000 é composta de diferentes maneiras. São estes:

- (a) Polígonos cuja geometria equivale a de setores que não foram alterados no período 1991-2000. É o caso do polígono 9100001, conforme mostra a Figura 4.
- (b) Polígonos cuja geometria equivale à de um setor de 1991 e de um ou mais setores de 2000, ou vice versa. É o caso do polígono 9100003. Em situações como esta, os dados dos setores de 2000 correspondentes ao polígono da nova base precisam ser agregados.

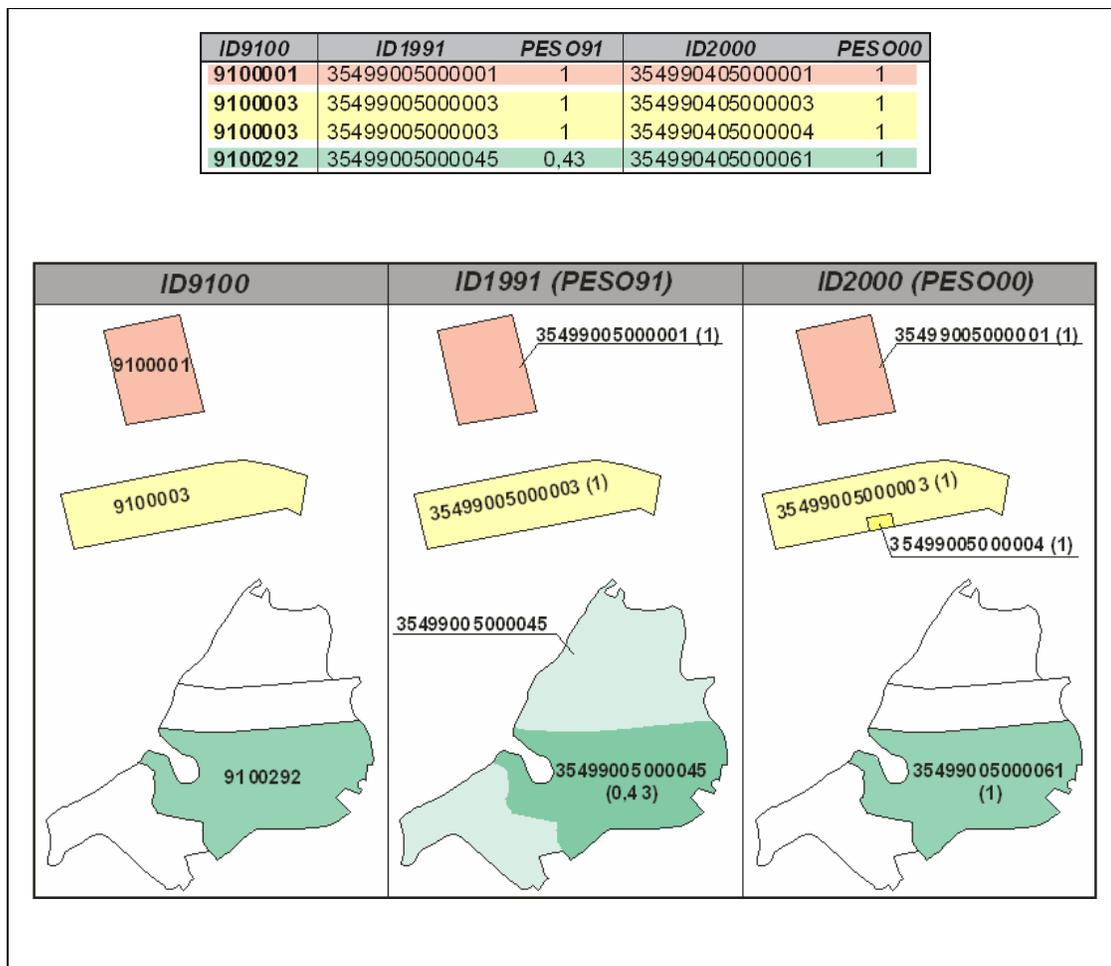


Figura 4 – Exemplos de registros da tabela de equivalência e geometria dos polígonos correspondentes.

- (c) Polígonos cuja geometria equivale a de um setor de 2000 e parte de um setor de 1991, ou vice versa. É o caso do polígono 9100292, para o qual os dados relativos ao setor de 1991 (35499005000045) precisam ser desagregados. Para esta desagregação é estabelecido um peso que equivale à proporção da área ocupada do setor 35499005000045 que está contida dentro dos limites do polígono 9100292. No caso, a área ocupada refere-se à realidade de 1990 e foi delimitada sobre a imagem Landsat-5/TM. A Figura 5 mostra o setor 35499005000045 (1991) sobre a mancha urbana de 1990. Nesta data, a área ocupada dentro do polígono 9100292 corresponde a 43% da área ocupada do setor 35499005000045.

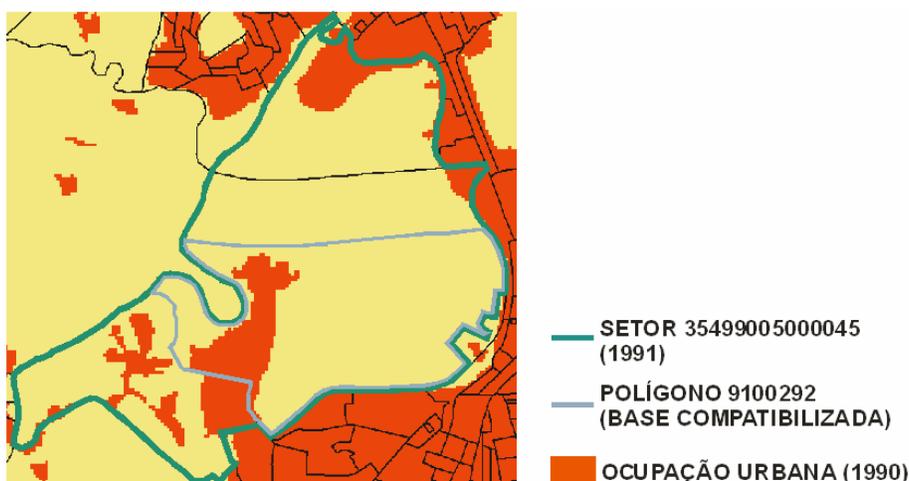


Figura 5 - Setor 35499005000045 (1991) sobre a mancha urbana de 1990.

- (d) Existem ainda polígonos resultantes de situações mistas, que envolvem tanto a agregação quanto a desagregação dos setores de 1991 e 2000.

No processo de elaboração da tabela de equivalência, alguns polígonos da base geográfica compatibilizada (seção 2.2) foram revistos e por vezes agregados. A versão final da base compatibilizada apresenta 421 polígonos.

Uma vez finalizada, a tabela de equivalência foi subdividida em duas: a primeira contendo dos campos relativos à equivalência entre a base compatibilizada e os setores de 1991 (ID9100, ID1991 e PESO91) e a segunda contendo os campos relativos à equivalência entre a base compatibilizada e os setores de 2000 (ID9100, ID2000 e PESO00). Sobre cada uma destas tabelas, foi efetuado o seguinte: (a) exclusão dos registros repetidos, (b) junção com as tabelas contendo os dados censitários do ano ao qual os setores correspondem, (c) ponderação dos dados censitários utilizando o peso do setor e (d) arredondamento dos dados censitários ponderados.

Como resultado, foram obtidas tabelas contendo os códigos dos polígonos da base compatibilizada e os dados censitários correspondentes a cada um deles nos anos de 1991 e 2000. Estas tabelas foram associadas à base geográfica compatibilizada no SPRING, gerando dois planos de informações cadastrais: um deles contendo a base compatibilizada associada aos dados censitários de 1991 e o outro contendo a mesma base compatibilizada, porém associada aos dados censitários de 2000.

3 Conclusões

Este artigo apresenta um procedimento para a compatibilização de dados censitários de datas distintas e agregados em setores com geometrias diferenciadas. Ao contrário da solução normalmente adotada nestes casos, a de áreas mínimas comparáveis, a alternativa proposta permite minimizar a perda de detalhes fornecidos pelos levantamentos originais. Para tanto, é necessária a integração de dados do meio físico, extraídos através de imagens de satélite, aos dados originais, de natureza sócio-demográfica.

O procedimento foi aplicado aos dados censitários da área urbana de São José dos Campos e mostrou-se de viável execução. Contudo, algumas limitações podem ser apontadas. A primeira delas diz respeito à desagregação dos dados ponderada pelas áreas ocupadas por usos urbanos em geral, embora os dados censitários sejam relativos somente às áreas providas de domicílios. Além disso, a desagregação é realizada apenas em função da área ocupada, desconsiderando a existência de densidades diferenciadas. Para minimizar estas limitações, a compatibilização das bases censitárias pode incorporar, quando disponíveis, dados provenientes de outras fontes, como mapas de uso do solo (identificação de áreas residenciais) ou cadastro de imóveis (identificação de domicílios).

Cabe salientar ainda, que a compatibilização entre os dados censitários não representa uma solução aos efeitos do MAUP, visto que este é um problema inerente a todos os dados agregados em áreas. Porém, o procedimento evita que inferências sejam realizadas sobre dados agregados em áreas de geometrias distintas, o que tende a provocar maiores distorções sobre os resultados obtidos.

Referências

- CÂMARA, G.; SOUZA, R.C.M.; FREITAS, U. M.; GARRIDO, J. C. P. SPRING: Integrating remote sensing and GIS with object-oriented data modelling. **Computers and Graphics**, v.15, n.6, p. 13-22, 1996.
- CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M.; FUCKS, S. D.; CARVALHO, M. S. **Análise Espacial e Geoprocessamento** [on-line], 2002. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap1-intro.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2004.
- D'ALGE, J. C. L. **Cartografia para Geoprocessamento** [on-line], 2001. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap6-cartografia.pdf>>. Acesso em: 21 fev. 2004.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 1991: São José dos Campos**. São Paulo, 1991.

- _____. **Censo Demográfico 2000: São José dos Campos.** São Paulo, 2000.
- _____. **Instruções para Revisão do Trabalho da Base Operacional Geográfica TR-23.** Rio de Janeiro: IBGE, 2000b. 33 p.
- _____. **Tabela de Comparabilidade: Setores Censitários 1991-1996.** São Paulo, 1996.
- _____. **Tabela de Comparabilidade: Setores Censitários 1996-2000.** São Paulo, 2000c.
- INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). [online]. **Dicionário de Conceitos.** Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/ipeaweb.dll/Dicionario.htm>>. Acesso em: 05 set. 2004.
- INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). **Landsat-5/TM satellite image – WRS 219/76 – Acquisition date 27-04-90.** [CD-ROM]. São José dos Campos: INPE, 1990.
- _____. **Landsat-7/ETM+ satellite image – WRS 219/76 – Acquisition date 09-01-00.** [CD-ROM]. São José dos Campos: INPE, 2000.
- MARTIN, D. An assessment of surface and zonal models of population. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, p. 973-989, 1996.
- OPENSHAW, S. Ecological fallacies and the analysis of areal census data. **Environment and Planning A**, v.16, p. 17-31, 1984.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS (PMSJC). **Cidade Viva.** [CD-ROM], 2003.

Classificação de Cobertura do Solo Utilizando Imagens de Alta Resolução Espacial

Carolina Moutinho Duque de Pinho¹
Cláudia Maria Almeida¹
Hermann Johann Heinrich Kux¹
Camilo Daleles Rennó¹
Leila Maria Garcia Fonseca¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{carolina, almeida hermann}@dsr.inpe.br; {camilo,leila}@dpi.inpe.br

1 - Introdução

A Constituição de 1988 foi um marco para gestão urbana brasileira na medida em que transferiu aos municípios a prestação de alguns serviços públicos como saúde, transporte público, saneamento básico e trânsito (Borges, 2000). Esta descentralização concedeu maior autonomia político-administrativa, mas ao mesmo tempo aumentou o volume de atribuições do poder público municipal. Este novo escopo de responsabilidades exigiu que o poder público municipal se munisse de um conjunto de informações que pudessem caracterizar quais são as demandas de serviços e onde se localizam estas demandas.

O reconhecimento de padrões de mudanças no uso e cobertura do solo pode fornecer elementos para responder a estas questões. Por exemplo, a partir da identificação de uma área que está sofrendo intensa verticalização, é possível planejar mudanças no padrão de atendimento do transporte público em função da previsão do aumento do número de passageiros. Este procedimento pode ser feito por meio da análise multitemporal de mapas de uso e cobertura do solo intra-urbano. A elaboração destes mapas exige dados detalhados, precisos e que possam ser atualizados continuamente.

Neste contexto a utilização de imagens orbitais de alta resolução espacial (proveniente dos satélites como o IKONOS II, Quickbird e Orbiview) para a criação destes mapas constitui-se em uma importante alternativa. Já que estas imagens reúnem alta resolução espacial (permitindo a identificação de feições submétricas oferecendo assim mapas de uso e cobertura detalhados), metadados que subsidiam a realização de

procedimentos de ortorretificação (possibilitando assim a obtenção de produtos cartograficamente mais precisos) alta resolução temporal (de 1,5 a 3 dias, o que permite uma atualização mais constante).

A extração de informações destas imagens para a geração de mapas de uso e cobertura do solo pode ser realizada por meio de procedimentos de interpretação visual ou por métodos de classificação automática de imagens. No contexto de mapeamento do uso e cobertura do solo de uma cidade inteira, a adoção da interpretação visual torna o procedimento demorado e caro, visto que mobiliza uma grande quantidade de mão-de-obra especializada. A utilização de técnicas automáticas para a extração de informações é, portanto, uma opção viável para a classificação de uso e cobertura do solo intra-urbano em larga escala.

Por um outro lado, a utilização deste tipo de imagens impõe novos desafios para a classificação automática de uso e cobertura do solo intra-urbano. As tradicionais classificações pixel-a-pixel tornam-se limitadas em imagens que captam detalhes de cenas muito heterogêneas (áreas urbanas) e com grande variação interna das classes (ex.: classes de tipos de telhados que respondem de forma diferenciada a variações no ângulo de incidência solar e na orientação de suas faces) (Neubert e Meinel, 2005; Schiewe e Tufte, 2005). Além disso, estas imagens possuem baixa resolução espectral (apenas quatro bandas: azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), o que dificulta a distinção de uma série de alvos urbanos que possuem comportamento semelhante nos comprimentos de onda do visível, como é o caso de ruas pavimentadas com asfalto e edificações com cobertura de amianto escuro (Pinho e Kux, 2004; Pinho et al., 2005a; Pinho 2005).

Surge, portanto, a necessidade de exploração de métodos alternativos que não se limitem apenas a atributos espectrais. Entre estes métodos, destaca-se a análise de imagens orientada a objetos, que permite a inserção do conhecimento do analista (características das feições a serem identificadas: cor, tamanho, forma, padrão, textura, contexto etc...) estruturado em forma de rede semântica. Nesta rede são modeladas relações espaciais e não espaciais entre as classes de uma determinada aplicação. Desta forma a metodologia de análise não se limita apenas a trabalhar com atributos espectrais. Neste contexto, este trabalho parte da seguinte hipótese:

A introdução do conhecimento no processo de classificação pode ajudar a suplantar as dificuldades na extração de informação de imagens alta resolução espacial.

O objetivo deste trabalho é explorar a análise de imagens orientada a objetos na classificação de cobertura do solo intra-urbano, a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial – Quickbird – do município de São José dos Campos – SP.

2. Análise de imagens orientada a objetos

Na abordagem orientada a objetos, um problema ou aplicação é representado por uma coleção de objetos que possuem características próprias e interagem entre si (Rumbaugh et al., 1994). Objetos são conceitos, abstrações definidas em um determinado domínio de uma aplicação (Rumbaugh et al., 1994). Assim, no domínio do espaço intra-urbano, na aplicação de classificação de cobertura do solo, telha cerâmica é um objeto. Outra característica importante dos objetos é que possuem identidade, sendo distinguíveis pela sua própria existência e não pelas propriedades que possuem. Desta forma, mesmo que dois objetos “prédios” tenham características idênticas, eles continuam sendo únicos, pois um pode ser demolido, enquanto o outro não.

Os objetos com características em comum são agrupados em classes, e estas são organizadas em forma de rede hierárquica, onde as classes de um nível inferior (subclasses) herdam as características da classe do nível superior (superclasse).

A utilização do conceito de objeto é peça chave neste tipo de análise de imagens, pois se parte do princípio de que a informação semântica necessária para a interpretação de uma imagem não está presente no pixel, e sim em objetos da imagem e nas relações existentes entre eles (Definiens, 2003). Estes objetos são os segmentos, os quais são gerados a partir de um procedimento de segmentação.

Há ainda outras premissas importantes na análise orientada a objetos (Definiens, 2003), a saber:

- Os objetos de imagem não devem ser caracterizados apenas por atributos espectrais, a utilização de outros atributos como: forma, tamanho, textura, padrão e contexto permite uma melhor distinção dos objetos. Em outras palavras, é necessário inserir o conhecimento do analista no sistema de interpretação da imagem.

- Os objetos de interesse de uma mesma classificação muitas vezes estão associados a diferentes níveis de escalas, e estes níveis devem estar representados no sistema de análise. Assim, em uma cena de um ambiente intra-urbano, existem pequenas residências familiares que se relacionam a um nível mais detalhado de escala, e áreas industriais com grandes construções, que se relacionam a uma escala mais grosseira.
- Os limites do espaço de atributos de uma determinada classe podem ser imprecisos, o que introduz incertezas na associação de um objeto a determinada classe. Esta incerteza precisa ser modelada, pois ela é parte do resultado da classificação (Benz et al., 2004).

Estas premissas se materializam pelos procedimentos de segmentação multiresolução e estruturação das classes em rede semântica. A segmentação multiresolução é responsável pela geração dos objetos da imagem em diferentes escalas de detalhamento. Na estruturação das classes em rede semântica, os objetos e seus relacionamentos são modelados por regras de classificação. Estas regras de classificação podem utilizar funções *fuzzy* de pertinência, que modelam a incerteza associada às classes.

A segmentação multiresolução aplica a abordagem de crescimento de regiões utilizando parâmetros de cor e forma, sempre ponderados pelo tamanho dos segmentos na construção do critério de similaridade. (Definiens, 2003). O usuário pode inserir pesos diferenciados para cor e forma de acordo com as características da imagem que está utilizando e também do objetivo final da classificação.

A principal característica deste tipo de segmentação é a possibilidade de particionar uma mesma imagem em níveis de escala diferenciados que se relacionam entre si, formando uma rede hierárquica de objetos (Baatz, M.; Schäpe, A., 2000). Desta forma, cria-se a concepção de superobjetos e subobjetos. Na rede hierárquica formada, cada objeto armazena relações de pertinência com superobjetos (objetos maiores em um nível de superior) e com subobjetos (objetos localizados em um nível inferior que juntos formam o objeto em questão) e também informações de vizinhança entre os objetos do mesmo nível (Benz et al., 2004). Outra importante especificidade desta segmentação é a

possibilidade de se utilizar informações temáticas (seja na forma de arquivos vetoriais ou raster) no procedimento de segmentação.

2.2 Rede Semântica

Nas redes semânticas o conhecimento é representado graficamente por meio de conexões entre arcos e nós. (Sowa, 2000 apud Antunes, 2003). Os nós são os conceitos ou categorias relativos a um determinado conhecimento (no caso da análise de imagens orientada a objetos são as classes) e os arcos explicitam as relações entre os nós. Neste sistema de representação as classes herdaram atributos e comportamentos das superclasses que as contém.

2.3 Classificação

Após a definição dos objetos (segmentação) e a rede semântica, o processo de classificação é efetuado por meio de regras de decisão. Estas podem utilizar o algoritmo vizinho mais próximo ou por regras de pertinência *fuzzy*. As regras adotadas neste trabalho são do tipo *fuzzy*. Utilizando regras *fuzzy*, um objeto pode estar associado a várias classes com diferentes graus de pertinência. O grau de pertinência varia de 0 (não pertence) a 1 (pertence) e a classe considerada é aquela cujo grau de pertinência é maior.

3. Material Utilizado

O trabalho foi realizado sobre uma área teste de aproximadamente 12 km² da área urbana do município de São José dos Campos (Figura 1) que reunia diferentes padrões de ocupação de uso do solo. Esta característica tornou possível observar diferentes tipos de cobertura do solo presentes em uma grande gama de tamanhos e padrões espaciais.

Utilizaram-se duas imagens Quickbird: uma pancromática, com 0,60 m de resolução espacial e outra, multiespectral, com 2,40 m de resolução e quatro bandas (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo). As imagens são do tipo ORStandard2A, obtidas em 17 de maio de 2004, com ângulo off-nadir de 7,0° e resolução radiométrica de 16 bits.

Os materiais utilizados para o processamento da imagem foram: Software e-Cognition 4.0 para a análise orientada a objetos; arquivo vetorial do tipo shapefile com as quadras e ruas da área urbana; arquivo vetorial do tipo shapefile com o limite dos bairros do município.

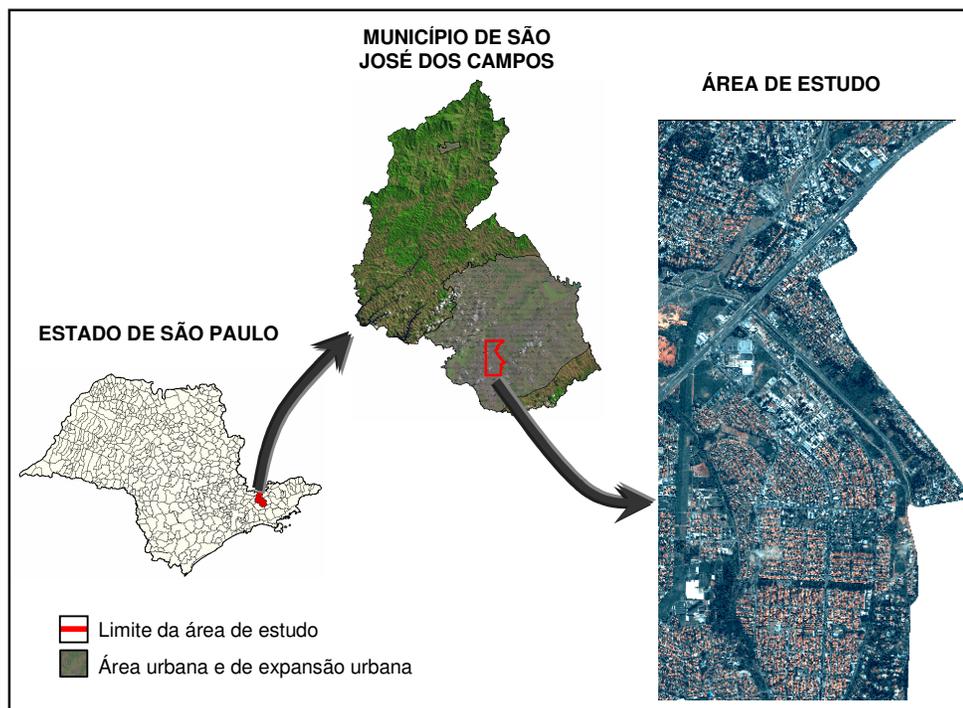


FIGURA 1 - Localização da área de estudo em relação à área urbana e de expansão urbana do município de São José dos Campos.
FONTE: Adaptada, PMSJC (2003).

4. Desenvolvimento do Experimento

A preparação e elaboração do experimento se deram nas seguintes etapas etapas: seleção da área de estudo, preparação dos dados, definição e caracterização das classes, segmentação, elaboração da rede semântica, classificação e avaliação da classificação.

4.1 Seleção da Área de Estudo

Os seguintes fatores foram levados em consideração na seleção da área de estudo:

- 1) O grande tamanho das imagens (imagem fusionada = 1,3Gb) que ao serem processadas, consumiam muitos recursos computacionais (espaço em disco, processador e memória RAM).
- 2) Evitou-se incluir áreas com densa cobertura de nuvens e/ou sombras de nuvens, mas apesar disso, restaram algumas nuvens e sombras que foram eliminadas das imagens.
- 3) Excluíram-se áreas com extensas coberturas de vegetação e pouca ocupação urbana. Isto, porque este tipo de padrão espacial não interessa para os objetivos deste trabalho.
- 4) Procurou-se incluir áreas com padrões de ocupação diferenciados (áreas residenciais horizontais com casas pequenas, áreas verticalizadas etc...), para que houvesse a inclusão de todos os tipos possíveis de classes de cobertura do solo, como também variações no tamanho e formas das feições.

4.1 Preparação dos Dados

Nesta etapa foram realizadas as seguintes operações: fusão de imagens; registro das bases vetoriais, recorte da área de estudo, supressão das áreas de nuvens e sombra de nuvens; e transformação IHS. Dentre estas operações destacam-se as operações de fusão e transformação IHS.

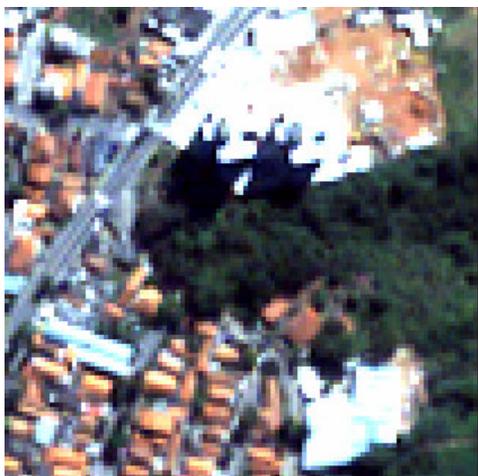
4.1.1 Fusão de Imagens

Diante da existência de várias técnicas de fusão disponíveis em programas de processamento digital de imagens, surgiu um questionamento importante: qual técnica de fusão teria o melhor desempenho quanto à transferência de detalhes e conservação do conteúdo espectral? Com o objetivo de responder a esta questão, Pinho et. al (2005b) avaliaram o desempenho de algumas técnicas de fusão (IHS, *Brovey*, Principais Componentes, *Gram-Schmidt* e *CN Spectral Sharpening*¹ sobre a mesma imagem Quickbird utilizada neste trabalho. A conclusão deste estudo apontou que a técnica de fusão Principais Componentes aplicada às quatro bandas multiespectrais produziu os

¹ Para maiores detalhes sobre as técnicas de fusão citadas vide Pinho et. al. (2005b) e Sulsoft (2004).

melhores resultados. Assim, o método de fusão utilizado neste trabalho foi o de Principais Componentes.

Na Figura 2, observa-se uma pequena seção da cidade de São José dos Campos. À esquerda, está a imagem multiespectral original Quickbird, e à direita, a imagem sintética fusionada.



(a) Imagem original.



(b) Imagem sintética gerada pelo método Principais Componentes.

FIGURA 2 – Comparação entre a imagem original e a imagem sintética fusionada.

4.2.2. Transformação IHS

IHS é um modelo de representação de cores que utiliza os conceitos de Matiz (H - *Hue*), Saturação (S - *Saturation*) e Intensidade (I - *Intensity*). A Matiz é o comprimento de onda médio definindo, portanto, a cor do objeto. A Saturação expressa o intervalo de comprimentos de onda ao redor do comprimento de onda predominante, ou seja, é uma medida do grau de mistura de uma cor com as outras. A Intensidade é o total de energia envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo responsável pela percepção do brilho (Fonseca et. al., 2000).

Como a informação espectral básica contida neste tipo de imagem é a cor (os dados possuem apenas três bandas no visível e uma no infravermelho próximo) e muitos alvos urbanos possuem cores muito similares, a utilização de informações de brilho, saturação e matiz dos objetos pode auxiliar na distinção dos mesmos. Para o Experimento em

questão foi realizada uma transformação IHS a partir de uma composição colorida cor verdadeira.

4.2 Definição e Caracterização das Classes

A seleção e caracterização das classes de interesse foram realizadas com base na interpretação visual da imagem Quickbird fusionada, procurando identificar os principais materiais aplicados nas vias pavimentadas, nas coberturas das construções e também os principais tipos de cobertura de feições naturais, como vegetação, por exemplo. A caracterização das classes foi auxiliada pela elaboração de chaves de interpretação² para cada uma das classes. Nestas chaves foram analisados os elementos de interpretação: cor, tamanho, forma, localização e textura. Na Tabela 1, são apresentadas as classes selecionadas e as suas chaves de interpretação:

TABELA 1 - Chaves de interpretação das classes de cobertura do solo

Classe	Cor (RGB-3,2,1)	Localização/ Contexto	Forma, Tamanho e Textura
Vegetação Arbórea	Verde (variando de verde escuro até verde médio)	Localiza-se dentro de quadras, mas suas copas cobrem parcialmente ou totalmente algumas ruas.	Possui textura rugosa, com variação no tamanho dos elementos texturais, dependendo do tipo de árvore.
Vegetação Rasteira	Variações diversas de verde	Localiza-se dentro de quadras.	Textura de pouco rugosa (áreas de capim) a lisa (grama cuidada).
Telha Cerâmica Clara	Variações de laranja	Localiza-se dentro de quadras.	Tamanhos variáveis, porém com forma preferencialmente retangular.
Telha Cerâmica Escura	Variações de marrom escuro	Localiza-se dentro de quadras.	Tamanhos variáveis, porém com forma preferencialmente retangular.
Concreto ou Amianto Escuro	Cinza escuro	Ocorre como cobertura de edificações. Localiza-se dentro das quadras.	Tamanhos variáveis, porém com forma preferencialmente retangular.

² Também conhecida como chave de identificação, serve para organizar todo o material utilizado no reconhecimento dos objetos e na interpretação de seus significados (NOVO, 1989).

Classe	Cor (RGB-3,2,1)	Localização/ Contexto	Forma, Tamanho e Textura
Concreto ou Amianto Médio	Cinza Médio	Ocorre em pontes, alguns tipos de pavimentação e coberturas.	Tamanhos variáveis, porém com forma preferencialmente retangular.
Concreto ou Amianto Claro	Branca	Ocorre em coberturas de edificações, portanto dentro das quadras.	Tamanhos variáveis, porém com forma preferencialmente retangular.
Asfalto	Cinza escuro	Ocorre em ruas pavimentadas e em estacionamentos	Forma retangular quase quadrada (estacionamentos) e retangular alongada (ruas).
Solo Exposto Escuro	Varia de laranja escuro até marrom.	Está localizado dentro de quadras em novos loteamentos; ou terrenos inutilizados.	Forma, textura e tamanhos variados.
Solo Exposto Claro	Varia de Laranja claro até amarelo	Está localizado dentro de quadras em novos loteamentos, em terrenos inutilizados; ou ainda em ruas não pavimentadas.	Forma, textura e tamanhos variados.
Sombra	Praticamente preta	Vizinha a edificações, árvores e pontes.	Textura lisa, forma e tamanhos variáveis.
Piscina	Cyan	Dentro das quadras, vizinhas a prédios e casas.	Tamanho variável, textura lisa e forma predominantemente retangular.
Cobertura Metálica	Azul claro	Dentro das quadras em área comerciais ou industriais.	Textura lisa, forma retangular e tamanho variável.

4.3 Segmentação

Nesta etapa, definiram-se os níveis e a estratégia de segmentação que seriam utilizados, assim como se conduziram os testes dos parâmetros de escala, cor e forma, apropriados a cada nível.

Criaram-se quatro níveis de segmentação. Para cada um deles definiram-se quais seriam os objetos de interesse, a quais objetivos devem atender, quais arquivos devem ser utilizados na segmentação e qual dos parâmetros (cor ou forma) têm maior peso na segmentação (Tabela 2).

TABELA 2 – Descrição dos níveis de segmentação do Experimento I.

Nível	Objetos de Interesse	Objetivo	Arquivos utilizados	Parâmetros
IV	Bairros	Gerar indicadores urbanos por bairros.	Base de bairros	Escala:50000 Forma:0,9

III	Quadras Ruas	Servir como base para regras restritivas para a ocorrência de determinadas classes.	Base de bairros Base de quadras	Escala:1000 Forma:0,9
II	Grandes classes de cobertura do solo: Vegetação Área Construída Solo Exposto Sombra	Gerar mapa de vegetação em escala mais grosseira e restringir a existência de algumas classes do Nível I.	Base de bairros Base de quadras Quatro canais multiespectrais da imagem fusionada	Escala:50 Forma:0,3
I	Classes de cobertura do solo: Vegetação Arbórea Vegetação Rasteira Piscina Asfalto Solo Exposto Telha Cerâmica Clara etc...	Mapear as Classes de cobertura do solo em escala detalhada.	Base de bairros Base de quadras Quatro canais multiespectrais da imagem fusionada	Escala:20 Forma:0,3

O Nível IV agregou todos os objetos dos níveis inferiores. Desta forma, é possível analisar uma série de dados agrupados pela unidade espacial bairro. Por exemplo, é possível mapear o grau de arborização dos bairros a partir da quantificação da área arborizada, dada pelos objetos da classe Vegetação Arbórea do Nível I. A definição deste nível teve como objetivo gerar dados para a criação de indicadores urbanos. A classificação dos outros níveis inferiores não foi influenciada pela sua existência.

O Nível III foi criado para restringir a existência de algumas classes, baseado no fato de que algumas classes só ocorrem dentro das quadras ou nas ruas. Um exemplo de restrição é o caso das classes de Telha Cerâmica, que se localizam apenas dentro das quadras. Este nível também pode ser utilizado para relacionar padrões de textura das quadras com a sua ocupação. Assim, uma quadra com edificações pequenas, formas irregulares, com pouca vegetação pode ser associada à ocupação de baixa renda.

O objetivo do Nível II era mapear a classe Vegetação em um nível um pouco mais grosseiro e servir como restrição para o Nível I. Assim, um objeto só poderia ser

classificado como Vegetação Arbórea se ele fosse subobjeto de algum superobjeto da classe Vegetação no Nível II.

O Nível I teve como objetivo identificar as classes de cobertura do solo em escala detalhada. A definição dos parâmetros de segmentação neste nível foi a tarefa mais delicada desta etapa do trabalho, pois era necessário construir objetos que representassem todos os tipos de cobertura mas deveria-se tomar cuidado para não gerar um número excessivo de objetos.

Quanto ao parâmetro priorizado na segmentação; nos Níveis IV e III, foi atribuído maior peso ao parâmetro forma. Isto foi devido ao fato de que os limites dos objetos destes níveis já estavam previamente definidos pelos vetores de bairros e quadras que foram utilizados no processo de segmentação. Já os Níveis I e II tiveram maior peso atribuído ao parâmetro cor, pois o conteúdo espectral é mais importante para distinguir classes de cobertura que o de forma.

A estratégia de segmentação adotada foi do tipo *bottom-up*, ou seja, os objetos do Nível I foram agregados sucessivamente até formarem os objetos do Nível IV. Esta estratégia foi adotada, pois, segundo Hofmann (2001a) o sentido do processo de segmentação (*bottom-up* ou *top-down*) afeta os limites dos objetos, sendo prudente começar a segmentação pelo nível onde estão os objetos de interesse.

Após a definição dos níveis de segmentação, testaram-se os parâmetros para cada nível, realizando-se várias segmentações para a área teste de cada imagem. Os resultados das segmentações passaram por uma inspeção visual, a fim de se verificar a coerência entre os objetos gerados e os objetos desejados. Foram escolhidos os parâmetros que produziram segmentos que melhor reconheceram os objetos de interesse.

Avaliando-se a qualidade das segmentações quanto à adequação do “desenho” dos segmentos em relação aos objetos de interesse desejados em cada nível, concluiu-se que os Níveis III (quadras) e IV (bairros) tiveram bons resultados. Isto porque a segmentação destes dois níveis foi baseada em arquivos vetoriais editados externamente, os quais definiam os limites das quadras e dos bairros.

Comparando-se os resultados das segmentações dos Níveis II e I, percebeu-se que o Nível II, que inicialmente foi planejado apenas para mapear vegetação em um

nível mais grosseiro, apresentou de maneira geral melhores resultados de delimitação das classes de cobertura do solo que o Nível I, o qual apresentou uma sobre-segmentação. Entretanto no nível II foram detectados objetos que misturavam diferentes classes de cobertura em um único segmento.

Da análise destes dois níveis de segmentação, surgiu um importante questionamento: deve-se optar por uma segmentação (Nível II) que represente melhor as formas, mas que tenha um grau de confusão razoável entre tipos de coberturas? Ou deve-se optar por uma segmentação mais detalhada, onde a confusão entre tipos de cobertura é mínima, mas que ao mesmo tempo não preserva as formas dos alvos do ambiente intra-urbano? A fim de se evitar o problema dos “segmentos misturados” optou-se pelo Nível I.

A escolha pelo Nível I implicou a priorização de atributos derivados de informação espectral (média, desvio padrão, brilho etc...) e contextual (proximidade a vizinhos, relação entre sub e super-objetos) em detrimento dos atributos de forma.

Este tipo de problema traz à tona a dificuldade de se estabelecer um padrão único de parâmetros de segmentação para aplicações de extração de informação em ambientes intra-urbanos, pois estes são muito complexos. O procedimento ideal seria trabalhar com parâmetros regionalizados de acordo com o padrão espacial de tipos de cobertura (forma, tamanho, arranjo e tipo de materiais). Estes padrões poderiam ser identificados de maneira manual (foto-interpretação), ou automaticamente por algum algoritmo de reconhecimento de padrões.

4.4 Elaboração da Rede semântica e Definição de atributos e regras de pertinência

Nesta etapa, o primeiro passo foi definir uma rede hierárquica semântica inicial a ser utilizada. A elaboração desta rede semântica seguiu a estratégia das chaves de eliminação para as classes mais facilmente distinguíveis pelos atributos espectrais: Vegetação (caracterizada por valores de ND altos nas bandas 3 e 4) e Sombra (baixo brilho). Na seqüência, as outras classes foram definidas por relações de especialização, baseadas nos atributos analisados das chaves de classificação.

Em seguida, esta rede foi testada através do comportamento das classes para os descritores selecionados. Como muitas classes apresentavam comportamento parecido

para um determinado atributo, elas foram agrupadas em superclasses. Por um outro lado, outras pertencentes a uma determinada superclasse não tinham nada em comum com a classe-mãe, e por isso, foram recolocadas em outra superclasse. Em outras palavras, durante o procedimento de análise do comportamento das classes, a rede hierárquica passou por diversas mudanças até chegar à estrutura final.

A definição de atributos e regras de pertinência realizou-se da seguinte maneira: inicialmente foram selecionadas algumas amostras de treinamento para cada uma das classes. Em seguida, o comportamento destas amostras em relação aos atributos foi analisado com o uso de histogramas, gráficos de dispersão, e espacialização de atributos. Como existe um grande número de descritores disponíveis no programa utilizado (mais de cem), foram priorizados os atributos identificados pela chave de interpretação elaborada na fase anterior.

Na figura 3 observa-se a rede semântica final. Cada retângulo representa uma classe e as linhas as relações de hereditariedade entre elas. Na parte superior de cada retângulo está o nome da classe e na parte inferior o atributo que foi selecionado para ela.

Na mesma figura observam-se classes abstratas como “Escuros” por exemplo, estas classes serviram apenas para agregar classes de cobertura com características comuns e diferenciá-las de outras classes. Assim na rede representada na figura abaixo as classes que estão em retângulos com contorno mais forte constituem-se nas classes de cobertura final.

4.5 Classificação

Após a classificação algumas classes foram reagrupadas. As classes de Solo Exposto Claro e Escuro Foram agrupadas na classe Solo Exposto. Cerâmica Clara e Escura juntaram-se na classe Cerâmica. Asfalto e Erro Asfalto foram fundidas em Asfalto.

Na Figura 4, observa-se o resultado da classificação. A partir de uma primeira análise visual, percebe-se que houve confusão entre as classes Cerâmica e Solo Exposto (a área assinalada com círculo vermelho é Solo Exposto, mas grande parte dela foi classificada como Cerâmica). O restante das classes aparenta ter um comportamento bem coerente quando se analisa o resultado da classificação de forma geral.

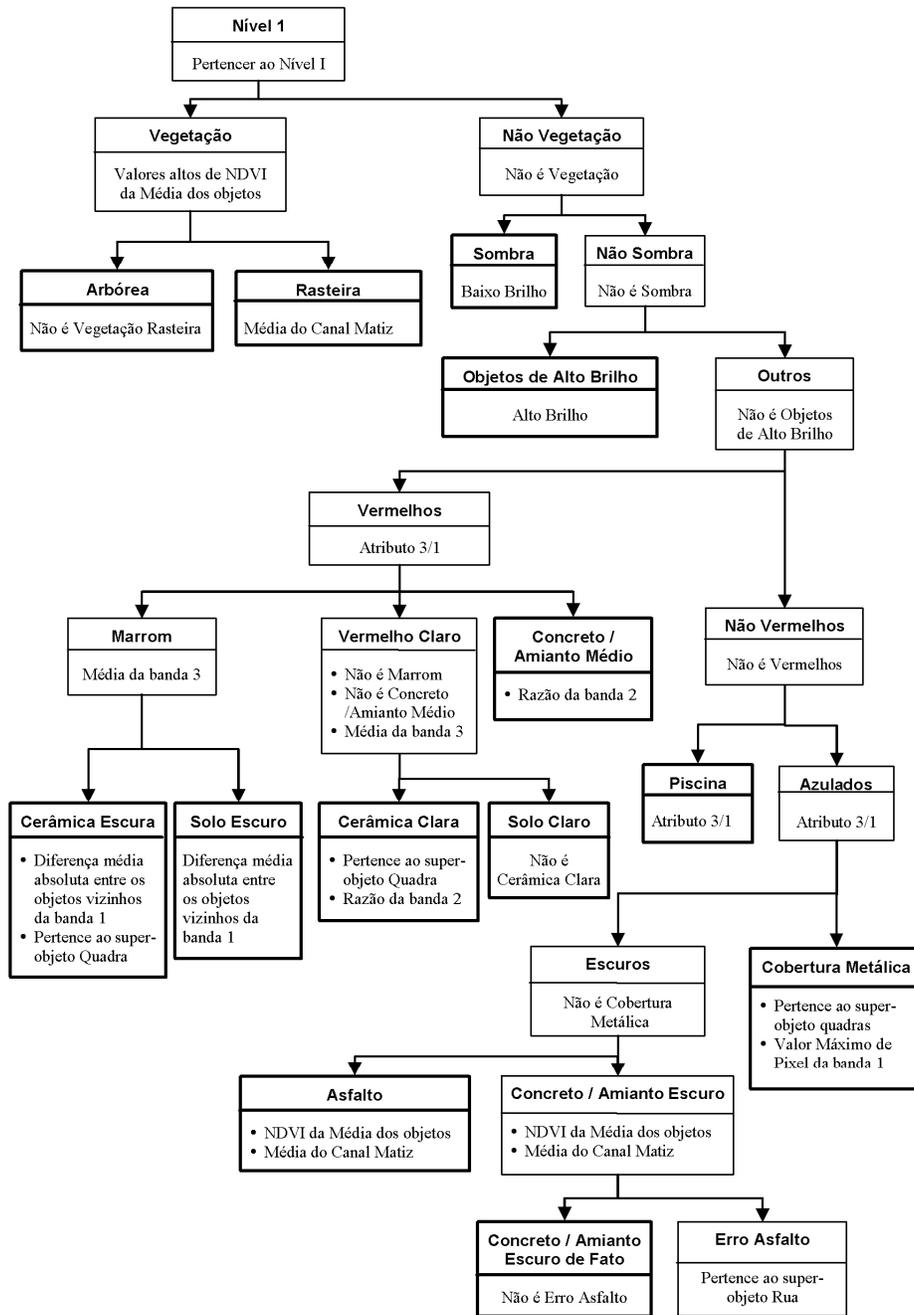


FIGURA 3: Rede Semântica utilizada na classificação.

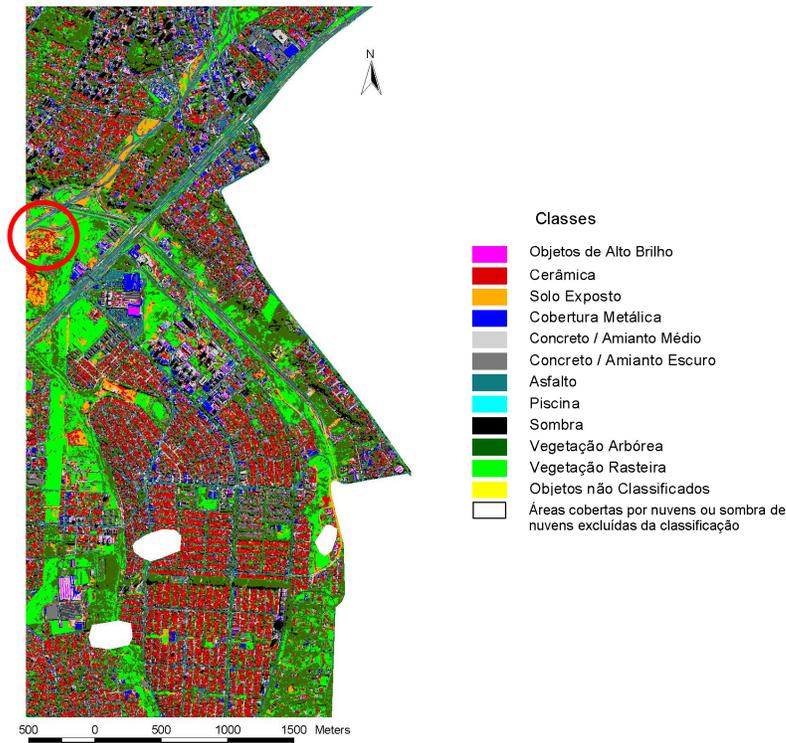


FIGURA 4 – Resultado da Classificação.

4.6 Avaliação da Classificação

Nesta etapa, foram utilizadas duas técnicas de avaliação: a matriz de confusão com o cálculo do coeficiente de concordância *Kappa*, e a análise de incertezas da classificação com o cálculo do índice de instabilidade.

Segundo Rennó et al. (1999), a matriz de confusão serve para avaliar os erros do resultado final da classificação (o mapa temático) em relação aos dados de referência (verdade de campo, amostras de teste ou outro mapa). Por um outro lado, a incerteza está relacionada às dúvidas surgidas durante o processo de classificação, no momento da atribuição do pixel ou objeto a uma determinada classe. Em outras palavras, a matriz de confusão serve para avaliar a qualidade do mapa, e a incerteza para avaliar a qualidade do processo de classificação.

Para elaboração da Matriz de confusão foram realizados os seguintes procedimentos:

- 1) Elaboração de uma amostra aleatória estratificada (com setenta amostras por classe), tomando como unidade amostral os polígonos do Nível I de segmentação.
- 2) Interpretação visual das amostras, descartando-se os polígonos que representaram dúvidas em suas classificações.
- 3) Elaboração da matriz de confusão.

4.6.1 Resultados da Matriz de Confusão

Analisando-se a matriz de confusão (Tabela 3), o desempenho da classe Piscina é o que mais chama atenção, com valores altos de *Kappa* (0,98) e exatidões do produtor e usuário (ambos também com 0,98). Este comportamento é devido a sua caracterização única em relação aos outros alvos no ambiente intra-urbano: a cor *cyan* de alto brilho que não se repete em outros alvos. Herold et al. (2003) já haviam observado este fato quando realizaram classificação de cobertura do solo em ambiente intra-urbano utilizando imagens AVIRIS.

As classes Objetos de Alto Brilho, Cobertura Metálica e Vegetação Rasteira também se destacam por seus bons resultados, todas elas possuem *Kappa* por classe maior que 0,70. A classe Objetos de Alto Brilho apresenta alguma confusão com as classes Concreto / Amianto Médio e Cobertura Metálica. A mistura com estas duas últimas classes é justificada pelo atributo que foi escolhido para caracterizar a classe Objetos de Alto Brilho, o alto brilho (brilho = média aritmética de todas as bandas multiespectrais), que em alguns objetos das referidas classes pode atingir valores bem elevados.

TABELA 3 – Matriz de Confusão

Polígonos de Referência / Polígonos Classificados	Objetos de Alto Brilho	Cerâmica	Solo Exp.	Cob. Metálica	Conc. Médio	Conc./ Amianto Esc.	Asfalto	Piscina	Sombra	Veg. Arbórea	Veg. Rasteira	Total
Objetos de Alto Brilho	49	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50
Cerâmica	0	42	6	0	6	1	0	0	6	0	0	61
Solo Exp.	0	26	30	0	5	1	3	0	0	0	1	66
Cob. Metálica	3	1	0	16	13	4	1	0	6	0	0	44
Conc. Médio	14	3	2	0	23	1	6	0	3	0	0	52
Conc./ Amianto Esc.	0	5	3	0	6	16	9	0	11	1	1	52
Asfalto	0	0	0	1	11	3	36	0	3	1	0	55
Piscina	0	0	0	4	0	0	0	54	2	0	0	60
Sombra	0	1	0	0	0	4	0	0	52	5	0	62
Veg. Arbórea	0	0	2	0	0	0	1	0	17	38	6	64
Veg. Rasteira	1	2	7	0	4	0	0	0	9	15	27	65
Total	67	81	50	21	68	30	56	54	109	60	35	631
Exatidão do Produtor	0,73	0,52	0,60	0,76	0,34	0,53	0,64	1,00	0,48	0,63	0,77	
Exatidão do Usuário	0,98	0,69	0,45	0,36	0,44	0,31	0,65	0,90	0,84	0,59	0,42	
Kappa por Classe	0,71	0,47	0,55	0,74	0,28	0,49	0,61	1,00	0,42	0,59	0,75	

As duas classes de vegetação apresentam confusões entre si e com a classe Sombra. A confusão entre as duas classes de vegetação é justificada pela dificuldade de se identificar um atributo de natureza espectral que as diferencie. No caso da classificação em questão, foi utilizado o atributo “média dos objetos do canal matiz” (*Hue* - H da transformação RGB → IHS) que apresentou alguma sobreposição entre as classes. Uma possibilidade para suplantar esta dificuldade é a utilização de atributos texturais, já que as duas classes em questão apresentam texturas bem diferenciadas. As medidas texturais de Haralick³ estão implementadas no programa e-Cognition e poderiam ser utilizadas na caracterização destas classes. Entretanto, o cálculo destas medidas se mostrou inviável no contexto deste experimento, pois exigia muitos recursos computacionais (memória e processador)

A superclasse Vegetação foi caracterizada a partir de uma função de pertinência que utilizava o atributo customizado “NDVI da média dos objetos” (NDVI calculado a partir dos atributos “média dos objetos das bandas 3 e 4”). Como a imagem utilizada tem resolução radiométrica de 11 bits, algumas áreas que visualmente são identificadas como sombra, possuíam valores altos de NDVI, pois eram áreas com cobertura vegetal sombreadas. Desta forma, polígonos de referência que foram classificados como Sombra na interpretação visual, foram classificados como Vegetação, devido aos valores altos de NDVI, na classificação automática.

A classe Sombra, que possui o menor *Kappa* (0,42), com exatidão do produtor de 0,48 e exatidão do usuário de 0,84. O valor obtido para a exatidão do produtor é em parte explicado pela já mencionada confusão com as classes de Vegetação. Devido ao grande número de polígonos de referência (109) e a distribuição dos erros de omissão por todas as classes, com exceção para Cerâmica e Objetos de Alto Brilho, é possível que as amostras de referência tenham sido interpretadas de maneira errônea, já que visualmente é difícil determinar o quanto deve ser “escuro” um objeto para ser classificado como sombra.

A classe Cerâmica possui valores de *Kappa* (0,47) e exatidões do produtor (0,52) e usuário (0,69), sendo que o principal destaque para esta classe é a confusão com a classe Solo Exposto. Este mesmo tipo de mistura também foi encontrado no trabalho

³ Maiores detalhes sobre as medidas texturais de Haralick, vide Haralick et al. (1973) e Definiens (2003).

de Thomas et al. (2003). Esta dificuldade de distinção entre as duas classes é em virtude da predominância de argila na composição tanto das telhas cerâmicas quanto do solo exposto, o que produz uma resposta espectral muito semelhante por parte desses alvos. Uma alternativa para superar esta dificuldade é utilizar a informação de altura das edificações para diferenciar objetos de coberturas cerâmicas daqueles de solo exposto. Esta informação pode ser obtida a partir de Modelos Digitais de Superfície (DSM – *Digital Surface Model*) que são muito utilizados em extração de informação em áreas intra-urbanas (Hofmann, 2001b; Hoffmann e Vegt, 2001; Schiewe et al., 2003; Schiewe, 2002; Centeno e Miqueles, 2004; Miqueles e Centeno, 2005; Möller, 2005; Walter, 2005).

A classe Asfalto apresenta valores de exatidão bastante coerentes entre si ($Kappa= 0,61$; exatidões do produtor e do consumidor iguais a respectivamente 0,64 e 0,55). Observando esta classe, conclui-se que esta é confundida, principalmente, com a classe Concreto / Amianto Escuro. A confusão entre estas classes também poderia ser resolvida com a introdução do DSM, já que Concreto / Amianto Escuro é um material de cobertura de edificações e, portanto, possui o atributo altura diferente da Pavimentação Asfáltica. Outro fator que chama atenção é a inclusão de elementos da classe Concreto / Amianto Médio nesta classe. Nas áreas asfaltadas, existem feições como faixas de divisão de pista e faixas de pedestres, as quais possuem a cor similar aos objetos da classe Concreto / Amianto Médio. Dependendo da composição dos segmentos que representam estas feições, ora elas são classificadas como Concreto / Amianto Médio, ora como Asfalto.

Na classe Cobertura Metálica ($Kappa=0,74$; exatidões do produtor e usuário respectivamente a 0,76 e 0,36) A principal característica desta classe é a baixíssima exatidão do usuário devida à grande inclusão de objetos de várias classes, principalmente da Concreto / Amianto Médio. Este tipo de comportamento ocorre, pois apesar da cor predominante desta classe ser o azul, há ainda uma variação de cores dentro desta classe (azul, cinza e branco). Esta variação se dá pela conjugação da geometria de alguns telhados, que é arredondada (como em ginásios esportivos e alguns galpões), com o fato deste tipo de material não ser uma superfície lambertiana. Assim,

dependendo da forma e da posição do telhado, este apresentará uma cor diferente na imagem.

A classe Concreto / Amianto Médio foi a que produziu o pior resultado ($Kappa = 0,28$), confundindo-se com as classes Cobertura Metálica, Concreto / Amianto Escuro e Asfalto (estas classes têm em comum com Concreto Amianto / Médio a cor cinza, e o que as diferencia é a quantidade de brilho em cada uma delas).

A classe Solo Exposto ($kappa = 0,55$), confunde-se principalmente com Cerâmica e Vegetação Rasteira.

Na classe Concreto / Amianto Escuro ($Kappa = 0,49$), há misturas com Asfalto e Sombra (devido à similaridade de cor); Cerâmica (em função da existência de alguns telhados velhos de telha cerâmica que apresentam cor muito escura) e Vegetação Arbórea (por causa da cobertura de musgo acumulada em alguns telhados de amianto, que possui valores de NDVI compatíveis com a superclasse Vegetação).

4.6.2 Análise de Incertezas

Quando se utiliza lógica *fuzzy* em procedimentos de classificação, um mesmo objeto pode estar associado a várias classes ao mesmo tempo com graus distintos de pertinência, o que implica afirmar que o resultado da classificação pode não ser único (Laba et. al., 2002). Desta forma, há incerteza na classificação, e o grau desta, não pode ser avaliado por procedimentos padrões como a matriz de confusão (Foody, 2002). Alguns autores já propuseram avaliações alternativas, como Woodcock e Gopal, (2000) e Antunes (2003).

Neste trabalho, foi utilizado o grau de instabilidade proposto por Antunes (2003). A construção deste parâmetro parte do princípio de que um objeto O_i qualquer está associado à classe de maior pertinência. Entretanto, é possível que este mesmo objeto também possua uma pertinência alta para uma outra classe, indicando um alto grau de instabilidade para este objeto. Desta forma, o índice de instabilidade (i_a) é descrito razão da diferença dos dois maiores graus de pertinência pelo maior grau de pertinência. O i_a é expresso por:

$$i_a = (b_{c1} - b_{c2}) / b_{c1},$$

onde:

b_{c_1} = maior grau de pertinência para uma classe c_i qualquer;

b_{c_2} = segundo maior grau de pertinência para uma classe c_j qualquer;

$c_i \neq c_j$

Os valores de I_a variam de 0 a 1. O valor 1 indica que não há incerteza na associação de um objeto a determinada categoria, e o valor nulo indica total incerteza.

A qualidade da classificação pode ser avaliada a partir dos intervalos de ocorrência dos graus de instabilidade (Tabela 4).

TABELA 4 – Qualidade da classificação segundo o grau de instabilidade.

i_a - Grau de Instabilidade	Qualidade
$i_a=0$	Inaceitável
$0,01 \leq i_a \leq 0,30$	Ambígua
$0,31 \leq i_a \leq 0,50$	Acceptável
$0,51 \leq i_a \leq 0,80$	Boa
$0,81 \leq i_a \leq 1,00$	Muito Boa

FONTE: Adaptado de Antunes (2003).

A qualidade dos procedimentos de classificação foi avaliada quanto ao grau de incerteza associado aos objetos e às classes. Esta incerteza foi medida pelo índice de instabilidade. Foram calculados i_a para todos os objetos de uma determinada classificação e em seguida os objetos foram divididos em cada uma das faixas de categorização do grau de instabilidade. Se mais de 20% dos objetos de uma determinada classe possuem grau de instabilidade inaceitável ou ambíguo esta classe é denominada instável.

4.6.3 Resultados do Grau de Instabilidade

Analisando-se a Tabela 5 destaca-se o comportamento da classe Concreto / Amianto Médio, pois a mesma é categorizada como uma classe instável e apresenta o pior coeficiente de concordância *Kappa*. Assim, identifica-se a necessidade de uma possível redefinição do escopo desta classe e/ou refinamento das regras de decisão utilizadas na sua caracterização.

As classes Objetos de Alto Brilho, Sombra e Piscina apresentam a maior porcentagem de objetos (entorno de 100%) categorizados com grau de instabilidade muito bom. No caso das classes Objetos de Alto Brilho e Sombra, este comportamento é

explicado por estas serem modeladas por regras de classificação booleanas, o que elimina a ambigüidade da classificação destas classes. Entretanto, estas classes possuem características distintas quanto ao coeficiente *Kappa*. A classe Objetos de Alto Brilho possui valores altos, indicando seu bom desempenho, e a Sombra, valores baixos (está entre os mais baixos nas), o que materializa a sua confusão com as classes de Vegetação, Concreto / Amianto Escuro e Cerâmica.

TABELA 5 – Porcentagem de objetos, segundo classes de cobertura do solo por faixas de Grau de Instabilidade e coeficiente de concordância *Kappa*.

Classes de Cobertura do solo	Grau de Instabilidade					Nº de objetos por classe	Tipo de Classe	<i>Kappa</i> por classe
	Inaceitável 0,00	Ambíguo 0,01 a 0,30	Aceitável 0,31 a 0,50	Bom 0,51 a 0,80	Muito Bom 0,81 a 1,00			
Objetos de Alto Brilho	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	9.480	Estável	0,71
Cerâmica	4,16%	8,61%	5,47%	12,53%	69,23%	88.850	Estável	0,47
Solo Exposto	30,43%	14,33%	8,16%	16,79%	30,29%	7.950	Instável	0,55
Cob. Metálica	0,33%	4,75%	4,73%	9,64%	80,55%	14.989	Estável	0,74
Conc./ Amianto Médio	3,55%	16,83%	9,39%	14,96%	55,27%	42.487	Instável	0,28
Conc./ Amianto Escuro	9,69%	3,10%	2,83%	8,51%	75,88%	46.478	Estável	0,49
Asfalto	14,73%	6,79%	6,23%	21,45%	50,80%	30.915	Instável	0,61
Piscina	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	547	Estável	1,00
Sombra	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	36.926	Estável	0,42
Vegetação Arbórea	0,14%	2,31%	2,32%	21,72%	73,51%	100.646	Estável	0,59
Vegetação Rasteira	0,30%	5,23%	4,92%	10,27%	79,28%	44.855	Estável	0,75

A classe Piscina, que também possui o maior valor de *Kappa*, diferencia-se neste grupo, pois sua regra de classificação é *fuzzy*. Assim, a alta estabilidade e o alto valor de *Kappa* desta classe são explicados pela sua grande distinção com todas as outras classes, como já foi mencionado anteriormente.

A classe Solo Exposto destaca-se na classificação por ser instável e, ao mesmo tempo, possuir valores de *Kappa* baixos. Estas características refletem a dificuldade em se distinguir Solo Exposto das classes Cerâmica (composição química semelhante, e portanto, comportamento espectral parecido para os sensores utilizados) e Vegetação Rasteira (dificuldade em estabelecer o limiar que diferencia vegetação rala de solo nu).

Outra importante constatação deste experimento é que não há uma relação direta entre estabilidade e exatidão temática de uma determinada classe. Isto porque a instabilidade de uma determinada classe não depende apenas das confusões que esta possa estabelecer com as demais classes. A instabilidade é influenciada, sobretudo, pelo tipo de função de pertinência *fuzzy* que é utilizado.

5. Conclusões

O objetivo principal deste trabalho foi explorar a análise de imagens orientada a objetos na classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial (entre 1 e 4 m). A partir da análise dos resultados das classificações, verifica-se que este tipo de abordagem apresenta um bom potencial na classificação de cobertura do solo urbano a partir de imagens orbitais de alta resolução espacial. A utilização da segmentação multiresolução é uma nova abordagem, possibilitando utilizar informações a respeito do relacionamento entre objetos de diferentes escalas. A utilização da representação do conhecimento em redes semânticas permite o estabelecimento de relações de hereditariedade entre as classes e também o agrupamento de classes com aspectos físicos distintos, mas com semântica coerente (por exemplo, classes de cobertura de edificações podem ser agrupadas em uma única classe área de construída).

A partir da análise das limitações observadas neste trabalho, sugerem-se as seguintes recomendações:

- As classes Concreto / Amianto Médio e Cobertura Metálica precisam ter seus escopos redefinidos. A primeira, por ter apresentado os piores resultados de exatidão temática e de instabilidade. A segunda, por não englobar todos os tipos de cobertura metálica existentes no espaço intra-urbano. Esta classe foi elaborada a partir das características das telhas de alumínio, muito embora existam outros tipos de cobertura metálica, como o aço, por exemplo, que não foram descritas por esta classe, e por esse motivo, foram classificadas erroneamente.
- A opção por detalhamento no momento da segmentação implicou a perda de atributos de forma que são importantes na distinção de muitos alvos urbanos. Em trabalhos futuros, seria interessante trabalhar com objetos mais representativos da forma dos alvos urbanos (no caso do Experimento I, a título de exemplo, uma opção seria a de se trabalhar com o Nível II de segmentação). Para tanto, deve-se aprofundar mais a exploração dos recursos da ferramenta de segmentação baseada em classificação, a fim de se melhorar os limites dos objetos. Com a introdução de

atributos de forma e tamanho, é possível que se alcancem melhores resultados de exatidão temática.

- A diferenciação das classes de Vegetação Arbórea e Rasteira não foi muito eficiente a partir de atributos espectrais. Entretanto, estas classes possuem texturas bem distintas e definidas. Em face disso, deve-se prever a utilização de atributos provenientes da matriz de co-ocorrência de ND, proposta por Haralick et al. (1973) e implementada no programa *e-Cognition*.
- No transcorrer da fase de definição de atributos e regras de pertinência *fuzzy*, observou-se que várias classes possuem comportamento espectral semelhante (ex: Concreto / Amianto Escuro e Pavimentação Asfáltica) para as bandas existentes nas imagens dos dois sensores utilizados. Todavia, não se pode afirmar que esta semelhança é constante em todo o espectro eletromagnético, pois não existe ainda uma biblioteca espectral de alvos urbanos a partir de materiais de construção utilizados nas áreas urbanas brasileiras. Assim, seria necessária a elaboração desta biblioteca espectral para um melhor conhecimento das características de “nossos alvos urbanos”. Apenas uma iniciativa neste sentido foi realizada com o trabalho de Sousa e Kux (2005), onde são coletadas amostras de curvas espectrais de alguns tipos de telhados presentes em São José dos Campos – SP.
- A integração de dados de altura dos objetos às imagens multiespectrais utilizadas neste trabalho poderia ajudar na distinção das classes de cobertura das edificações (Cerâmica e Concreto / Amianto Escuro), as quais possuem altura média maior que as classes que se localizam ao nível do terreno (Solo Exposto e Pavimentação Asfáltica). Esses dados de altura seriam gerados a partir de Modelos Digitais de Superfície (*Digital Surface Models - DSM*) com alta resolução espacial. Estes modelos são obtidos a partir de três tipos de sensores aerotransportados: *Laser scanning*, RADAR e sensores ópticos multiespectrais com visada multiangular.

6. Agradecimentos

À Empresa Imagem que gentilmente cedeu às cenas *Quickbird* utilizadas neste experimento.

7. Bibliografia

- Antunes, A. F. B. **Classificação de ambiente ciliar baseada em orientação a objeto em imagens de alta resolução espacial**. 2003. 146p. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2003.
- Baatz, M.; Schäpe, A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: STROBL, J., BLASCHKE, T. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg 2000*. Karlsruhe. Herbert Wichmann Verlag, 2000. p. 12 – 23. Disponível em: <http://www.definiens.com/pdf/publications/baatz_FP_12.pdf>. Acesso em: 23 maio 2003.
- Benz, U.; Hofmann, P.; Willhauck, G.; Lingenfelder, I.; Heynen, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 58, n. 3-4, p. 239-258, Jan. 2003.
- Borges, K. A. V. A gestão urbana e as tecnologias de informação e comunicação. **Informática Pública**, v. 2, n. 2, p. 17-24, dez. 2000.
- Centeno, J.; Miqueles, A. Extraction of buildings in Brazilian urban environments using high resolution remote sensing imagery and laser scanner data. In: ISPRS Congress, 20., 2004, Istanbul, Turkey. **Proceedings...** Istanbul: ISPRS, 2004. p. 589 - 692.
- Definiens. **eCognition: User Guide 3**. Germany, 2003, 480 p. Disponível em: <<http://www.definiens-imaging.com/down/ecognition>>. Acesso em: 15 out. 2003.
- Fonseca, L. G. M. et al. **Apostila de Processamento Digital de Imagens**. INPE. Junho, 2000.
- Foody, G. Status of land cover classification accuracy assessment. **Remote Sensing of Environment**, v. 80, n. 1, p.185-201, Apr. 2002.
- Haralick, R. M., Shanmugan, K. and Dinstein, I., “Textural Features for Image Classification”, **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 3, n. 6, p. 610-621. Nov. 1973.
- Herold, M., Liu X. & Clarke, K. C., Spatial metrics and image texture for mapping urban land use. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 69, n. 9, p. 991-1001. Sept. 2003.
- Hoffmann, A.; Vegt, J. W. V. New sensor systems and new classification methods: laser and digital camera-data meet object-oriented strategies. **GeoBIT/GIS**, n. 6, p. 18-23, June, 2001.
- Hofmann, P; Detecting informal settlements from IKONOS image data using methods of object oriented image analysis - an example from Cape Town (South Africa). In: International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, 2., 2001, Regensburg, Germany. **Proceedings...** Regensburg, Germany: Institut für Geographie an der Universität Regensburg, 2001(a). p. 107 - 118.
- Hofmann, P. Detecting buildings and roads from IKONOS data using additional elevation information. **GeoBIT/GIS**, n. 6, p. 28-33, June 2001(b).
- Laba, M. et al. Conventional and fuzzy accuracy assessment of New York gap analysis project land cover map. **Remote Sensing of Environment**. v.81, n. 2-3, p.443-455. Aug. 2002.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. **Remote sensing and image interpretation**. New York: John Wiley and Sons, 1994. 117 p.
- Miqueles, N.; Centeno, J. Extração de edificações em ambientes urbanos utilizando imagem de alta resolução e dados do laser scanner In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4155 - 4162. CD-ROM.
- Möller, M. Estudo de qualidade e aplicações práticas de dados de scanner de altíssima resolução. In: Blaschke, T. e Kux, H. (ed.) **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. Cap. 2, p. 211 - 224.
- Neubert, M.; Meinel, G. Análise de dados do satélite IKONOS baseada em segmentação - Utilização do software de análise de dados e-Cognition para diferentes áreas-testes. In: Blaschke, T. e Kux, H. (ed.) **Sensoriamento Remoto e SIG Avançados**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. Cap. 11, p. 115 - 124.
- Novo, E. M. L. M. **Sensoriamento remoto princípios e aplicações**. São Paulo: Edgard Blücher, 1989. 306 p.

- Pinho, C.M., Kux, H. Dados do Quickbird para subsidiar o planejamento urbano: uma proposta metodológica, município de São José dos Campos, SP, Brasil. In: Simposio Latinoamericano sobre Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial, 11., 2004, Santiago. **Anais...** Santiago: SELPER, 2004. CD-ROM.
- Pinho, C. M. D, Feitosa, F. F. e Kux, H. Classificação automática de cobertura do solo urbano em imagem IKONOS: Comparação entre a abordagem pixel-a-pixel e orientada a objetos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 12, 2005a, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005a. p. 4217 - 4224. CD-ROM.
- Pinho, C. M. D.; Rennó, C. D., Kux, H. Avaliação de técnicas de fusão aplicadas à imagem Quickbird. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 12, 2005b, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005b. p. 4225 – 4232. CD-ROM.
- Pinho, C. M. D. **Análise orientada a objetos de imagens de satélite de alta resolução espacial aplicada à classificação de cobertura do solo no espaço intra-urbano: o caso de São José dos Campos – SP.** 2005. 179p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.
- PMSJC - Prefeitura Municipal de São José dos Campos. **Cidade Viva.** [CD-ROM], São José dos Campos, 2003.
- Rennó, C. D.; Sant'anna, S. J. S. ; Freitas, C. C . Avaliação das incertezas nas classificações de máxima verossimilhança e contextual de modas condicionais iterativas. In: GISBRASIL'99, 1999, Salvador. **Anais...**1999.
- Rumbaugh, J., Blaha, M., Permerlani, W., Eddy, F. and Lorensen, W. (1994) "Modelagem e Projetos Baseados em Objetos". Rio de Janeiro, Campus.
- Schiewe, J., Segmentation of high-resolution remotely sensed data - Concepts, applications and problems. In: Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, 2002, Ottawa. **Proceedings...**Canada, 2002.
- Schiewe, J., Tufté, L. Ehlers, M., Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. **GeoBIT/GIS** n. 6, p. 34-39, June 2001.
- Sousa, R. C. A.; Kux, H.: Comportamento Espectral e Alvos Urbanos: simulação com as bandas espectrais do satélite CBERS In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 12., 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 1099- 1006. CD-ROM.
- Thomas, N.; Hendrix, C.; Congalton, R. G. A comparison of urban mapping methods using high-resolution digital imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 69, n. 9, p. 963-972, Feb. 2003.
- Walter, V. Object-based classification of integrated multispectral and Lidar data for change detection and quality control in urban areas. In: International Symposium Remote Sensing of Urban Areas, 5., 2005, Tempe. **Proceedings...**United States: ISPRS, 2005.
- Woodcock, C.E.; Gopal, S. Fuzzy set theory and thematic maps: Accuracy assessment and area estimation, **International Journal of GIS**, v.14, n. 2, p. 53-172. 2000.

LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO NO ESTUDO DE ÁREAS URBANAS

Jorge Antonio Silva Centeno , Edson Aparecido Mitishita
Universidade Federal do Paraná - UFPR, Departamento de Geomática
Curitiba/PR – {centeno} {mitishita} @ufpr.br

1 INTRODUÇÃO

a varredura a laser é um avanço no campo dos levantamentos geométricos que, junto com as imagens de alta resolução espacial, introduziu uma revolução no campo de aerolevantamentos e sensoriamento remoto no mundo e, por consequência, no Brasil. A comunidade técnica e científica tem dedicado estudos visando avaliar a qualidade destes levantamentos e analisar seu potencial para o levantamento de informações espaciais da superfície da terra. Devido a sua capacidade de obter dados com alta resolução espacial, grande atenção foi dada ao uso da varredura a laser em áreas urbanas, onde poderia contribuir para superar as limitações dos levantamentos até então disponíveis. No Brasil, o grupo de pesquisadores de fotogrametria e sensoriamento remoto do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da UFPR canalizou esforços para este tema, através de pesquisas desenvolvidas com firmas proprietárias deste tipo de equipamentos em Curitiba, principalmente o LACTEC. Este artigo apresenta um resumo dos resultados das principais pesquisas desenvolvidas no laboratório de fotogrametria e sensoriamento remoto da Universidade Federal do Paraná no uso de dados altimétricos obtidos com laser scanner em ambientes urbanos.

O texto é organizado de maneira que em sua primeira parte, conceitos básicos do funcionamento da varredura a laser são apresentados. Logo, são descritas algumas aplicações em áreas urbanas.

2 O LASER SCANNER AEROTRANSPORTADO

Os princípios de funcionamento de um varredor a laser (*laser scanner*) aerotransportado, bem como as equações básicas que descrevem este método de coleta de dados se encontram descritos em artigos publicados em uma edição especial, volume 54, da revista ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. Artigos, como as contribuições de Baltsavias (1999a), Baltsavias (1999b), Ackermann (1999) ou Wehr e Lohr (1999), são recomendados para que deseja aprofundar conhecimentos no tema.

A varredura a laser aerotransportada (*airborne laser scanning*) consiste de um conjunto de equipamentos e métodos desenvolvidos para a determinação de coordenadas de pontos na superfície da terra desde uma aeronave. Internacionalmente, o nome mais encontrado para este tipo de equipamentos é *airborne laser scanning*, LIDAR (*Light Detection And Ranging*) ou LADAR (*Laser Detection And Ranging*).

Seu funcionamento baseia-se na utilização de um pulso de laser que é disparado na direção da superfície. O sistema usa um feixe óptico de alta potência com baixa divergência para determinar a distância entre o sensor e a superfície dos objetos. Ao atingir a superfície, parte do sinal emitido é refletida na direção do sensor. O sensor mede tanto a intensidade do sinal de retorno, como também o tempo decorrido entre a emissão e a captação do retorno (Δt), que é usado para calcular a distância (R) sensor-objeto, com base na velocidade de propagação da luz ($c = 300 \times 10^3$ km/s), como mostra a equação 1. Como o pulso deve se propagar do sensor à superfície e voltar ao sensor, é necessário dividir a distância por dois (Baltsavias, 1999b).

$$R = 0,5 * c * (\Delta t) \tag{1}$$

Para o cálculo da posição de cada ponto, o instrumento registra, além do tempo, os parâmetros de atitude do feixe, ou seja, sua orientação no instante da emissão/registo do pulso, e a posição exata da aeronave que carrega o sensor. Por este motivo, o laser scanner aerotransportado necessita de unidades auxiliares para obter estes dados complementares. O sistema de varredura laser pode ser então dividido em quatro componentes principais: a unidade de medição a laser, encarregada de emitir e receber o sinal laser, um sistema de varredura e duas unidades de registro de medições de apoio: uma inercial, encarregada de medir os ângulos da atitude da plataforma (IMU) e outra de posicionamento (GPS). O conjunto de medições de apoio são medidos e armazenados simultânea e paralelamente à medição da distância pelo sistema laser. Numa etapa posterior, as séries de dados coletados são sincronizadas e a posição de cada ponto na superfície calculada com base na posição da aeronave (sensor), sua atitude e o ângulo de emissão do pulso, conforme mostra a figura 1.

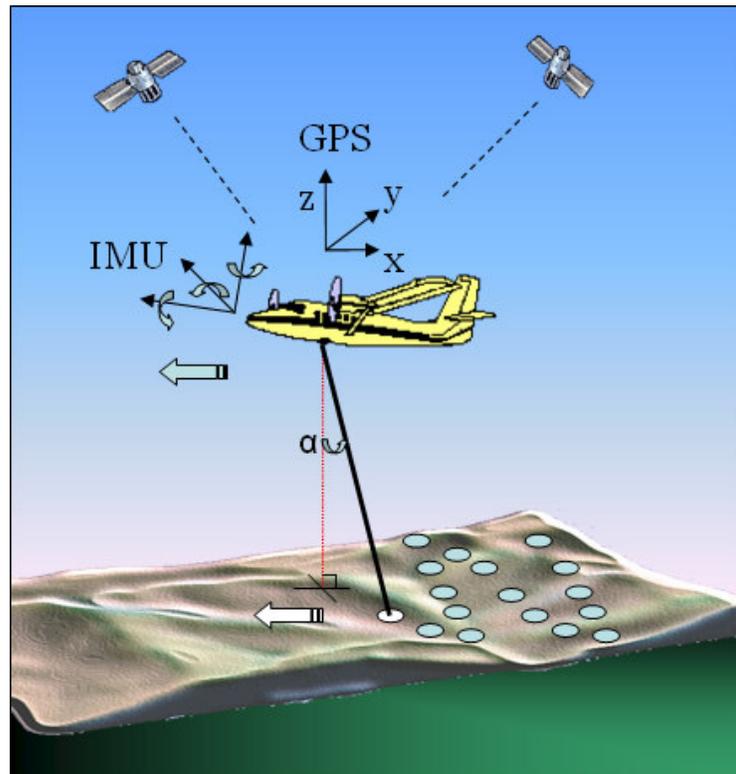
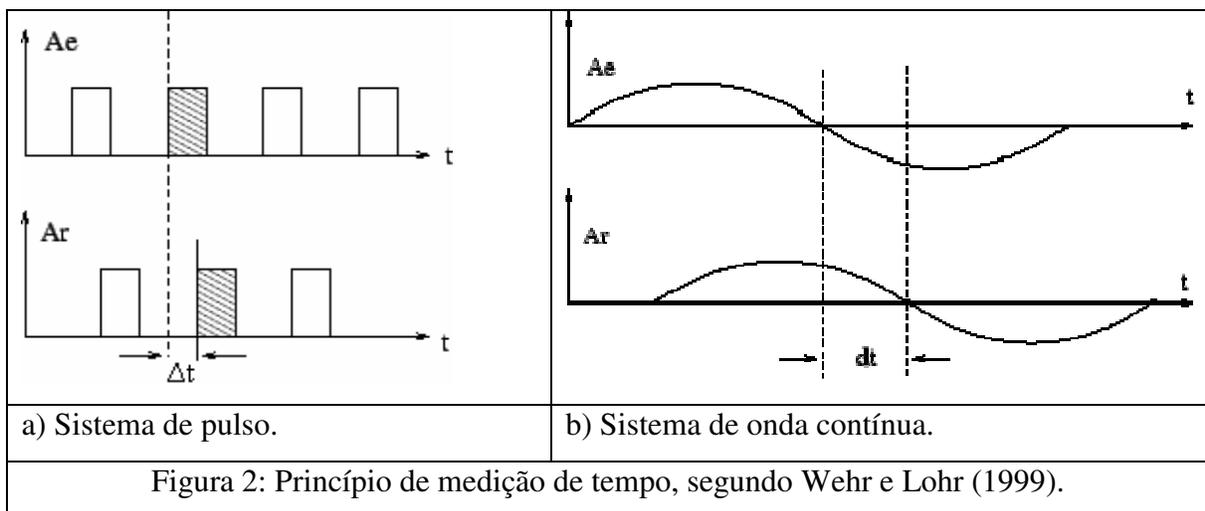


Figura 1 – esquema de funcionamento do laser scanner

A determinação da distância pode se efetuada com precisão menor a 10 centímetros, mas a precisão da determinação da posição do ponto depende do desempenho dos sistemas de apoio. Tipicamente, precisão planimétrica da ordem de 50 centímetros é encontrada, enquanto a precisão altimétrica está na ordem de 10 a 15 centímetros.

A unidade medição laser é responsável pela determinação da distância entre o sensor e a superfície. Para isto existem duas alternativas: o sistema de pulsos e o sistema de onda contínua. O sistema de pulso é o mais usado e se baseia na emissão e recepção de curtos pulsos de energia. A distância é determinada em função do tempo necessário para que o sinal emitido percorra o trecho entre o sensor e o objeto de ida e de volta. No sistema de pulso, o tempo de retardo (Δt) é medido em relação a um ponto determinado do pulso, por exemplo seu início, como é mostrado na figura 2a. A resolução do sistema de pulso em termos de distância é determinada pelo afastamento e a duração do pulso, ou seja a resolução da medida do intervalo de tempo:



No sistema de ondas contínuas, o intervalo entre a emissão e registro do retorno é determinado calculando a defasagem da onda de retorno em relação à onda emitida, como mostra a figura 2b. O intervalo entre a emissão e o registro do retorno é diretamente proporcional à diferença de fase (φ) entre a onda emitida e a recebida. Sendo conhecido o

período (P) da onda, o intervalo entre os dois eventos (emissão e recepção) pode ser calculado segundo a equação 3, de acordo com Wehr e Lohr (1999):

$$\Delta t = \varphi * (2 * \pi) * (P + n * P) \quad (3)$$

Onde n representa o número de ciclos inteiros completos. Na estimativa da diferença de fase, os ciclos completos podem ser negligenciados. Conhecendo-se a diferença de fase, a distância (R *range*) pode ser determinada em função da frequência, como:

$$R = \varphi * c / (4 * \pi * f) \quad (4)$$

Na varredura a laser, os pulsos são emitidos na direção transversal ao deslocamento da plataforma. Para efetuar esta varredura, diferentes mecanismos podem ser empregados, como espelhos móveis, que produzem linhas paralelas ou em zig-zag, o Palmer Scanner, que utiliza um espelho que gira em torno de seu centro e produz um padrão elíptico, e o espelho em forma de polígono rotatório, que produz linhas paralelas. Uma alternativa é o uso de fibras ópticas. Este dispositivo, conhecido como "*fiber scanner*" e utilizado no varredor Toposys, consiste de um arranjo de fibras ópticas que é usado tanto para emitir como para captar o sinal de retorno. Neste caso, o redirecionamento do feixe é feito usando um espelho rotativo que possibilita registrar a energia proveniente de uma linha inteira com o arranjo de fibras ópticas montadas no plano focal da emissão ou recepção (Wehr e Lohr, 1999).

Combinando o movimento da plataforma com o movimento do dispositivo de varredura, uma faixa do terreno é varrida. A altura de vôo (H) e o campo de visão (θ), também chamado de *field of View – FOV* ou ângulo de abertura, definem a largura da faixa a ser recoberta pelo levantamento, como ilustra a figura 3. Segundo Baltsavias (1999b), a largura da faixa (L) é dada pela equação 5:

$$L = 2 * H \tan(\theta/2) \quad (5)$$

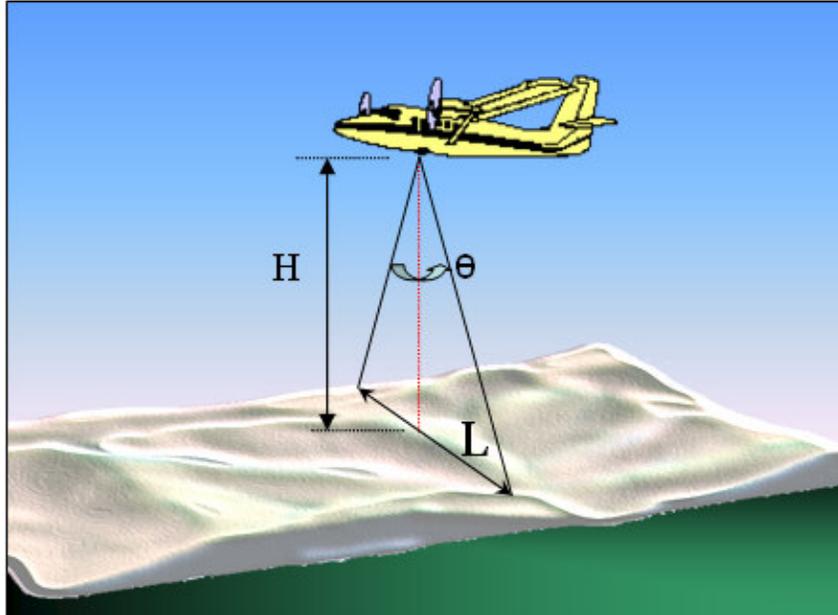


Figura 3 – Faixa transversal do levantamento

O principal conjunto de dados resultante da varredura é uma densa nuvem de pontos, com coordenadas tridimensionais, porém o sensor registra também a intensidade do pulso refletido pela superfície para cada ponto da superfície. Com os dados pontuais de intensidade, imagens podem ser interpoladas. Estas imagens têm baixa resolução espectral, pois envolvem uma estreita faixa do espectro, porém são dados complementares que podem ser utilizados na classificação de pontos segundo a natureza da superfície do objeto. A figura 4 mostra um exemplo de uma imagem de intensidade obtida na região do centro politécnico da UFPR, em Curitiba, com o sensor ALTM 2050 (Optech). Nela, algumas superfícies podem ser discriminadas em função do valor da intensidade ou da textura na imagem. Por exemplo, ao asfalto correspondem tonalidades escuras, enquanto a estradas de chão tonalidades claras. Os telhados são visíveis com tonalidade cinza escura, sendo evidenciado por uma região de sombra em suas bordas.



Figura 4 - Recorte de uma imagem de intensidade obtida na região do Centro Politécnico UFPR, Curitiba por Esteio Levantamentos (<http://www.esteio.com.br/>).

2.1 Geração de modelos do terreno

Os pontos com coordenadas tridimensionais medidos se encontram distribuídos de forma irregular no terreno. Sua distribuição acompanha o padrão de varredura projetado no terreno. Este conjunto pode ser tratado de duas formas: como dados vetoriais, ou transformados ao formato raster. Para a produção de um modelo digital da superfície, os pontos medidos podem ser interligados por triângulos, formando uma grade TIN, ou servir de entrada no processo de interpolação para a geração de uma grade regular. A última opção é geralmente adotada, pois reduz significativamente a quantidade de dados a serem processados em afses posteriores. Experimentos (Botelho et al., 2005) comprovam que a escolha do interpolador é, neste caso, determinante. A grande maioria dos algoritmos de interpolação utilizados para obter modelos digitais do terreno foi concebida para o uso com dados esparsos e pouco densos, o que estava tradicionalmente disponível após o levantamento de campo ou pela digitalização de curvas de nível obtidas por fotogrametria.

Como o conjunto de dados laser scanner, a nuvem de pontos, é caracterizado por sua alta densidade, existe pouca necessidade de interpolar valores. A interpolação, por outro lado, pode degradar os dados, suavizando as bordas dos objetos presentes no modelo. Existem duas situações nas quais é necessário interpolar dados: Em regiões de “sombra” e em áreas de oclusão, causadas pelo ângulo de visada do sensor e a altura dos objetos. Isto geralmente ocorre devido à baixa altura de vôo e a presença de objetos altos, algo muito comum em áreas urbanas. A outra situação é quando o levantamento foi efetuado com espaçamento muito maior do que a resolução da grade pretendida.

Como a densidade de pontos é alta, uma grade vazia pode ser preenchida projetando os pontos do levantamento no plano definido pela grade, armazenando valores de altimetria nas células onde pelo menos um pulso é encontrado, como mostra Araki (2005). Esta prática oferece como vantagem a preservação dos valores originais de altimetria. Frequentemente ocorre que mais de um ponto se localiza dentro da área definida para uma mesma célula. Neste caso, quando se deseja obter uma descrição da superfície do terreno, o ponto com menor valor altimétrico deve ser adotado. Finalmente, os espaços vazios devem ser preenchidos. Para isto, Araki (2005) propõe o uso da morfologia matemática de níveis de cinza. O produto obtido final é uma grade que apresenta bordas bem definidas. A figura 5 mostra um resultado deste processo. Nesta figura, pixels escuros correspondem a pontos mais baixos e pixels claros a pontos mais elevados. Na figura 5a, o resultado do preenchimento da grade com os valores originais é mostrado. Nota-se, nesta figura, a ocorrência de células sem cola, que aparecem como pontos pretos. No centro desta figura, existe um lago, que aparece sob forma de uma região preta, sem dados, pois corpos de água absorvem o pulso incidente, resultando em perda de informação. À direita, são visíveis alguns prédios, com a correspondente área de oclusão. Esta grade bruta foi processada, com morfologia matemática, para o preenchimento das lacunas. O resultado é mostrado na figura 5b. Nota-se que não apenas os pontos isolados foram preenchidos, mas também as áreas de oclusão. Especial cuidado deve ser tomado no caso do lago, pois esta região não constitui uma falha e não deve ser preenchida por interpolação.

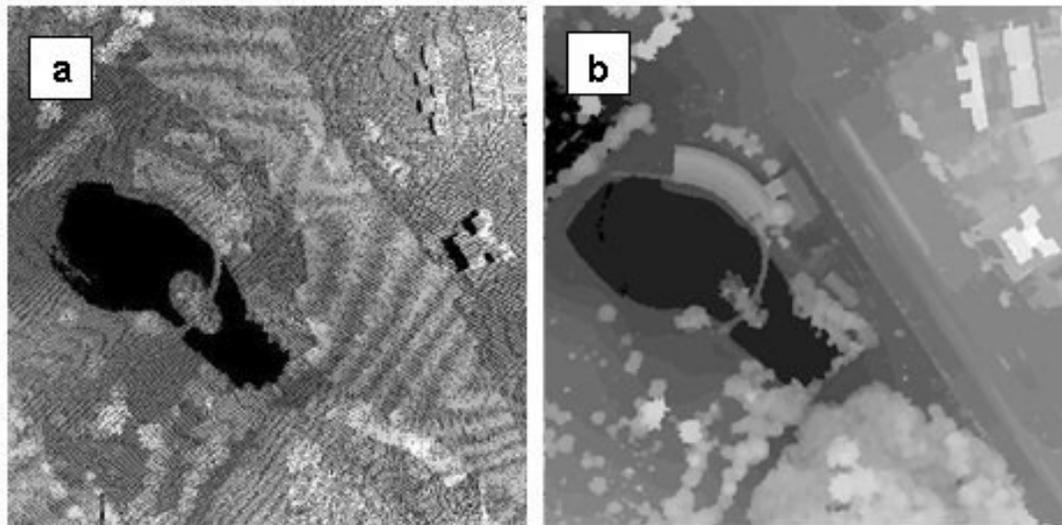


Figura 5 – Grade altimétrica: a) bruta; b) após preenchimento de lacunas (Araki, 2005).

Embora o pulso emitido seja caracterizado por uma alta coerência espacial, ele sofre uma pequena divergência e não atinge a superfície do terreno em apenas um ponto, se não sob forma de uma pequena superfície, conhecida como *footprint*. Por este motivo, ele pode atingir mais de um objeto, como terreno, prédios ou árvores, e ser refletido por pontos localizados a diferentes distâncias do sensor. Sendo assim, o ponto mais próximo ocasiona um retorno que é medido mais rapidamente. Já o ponto mais distante origina um retorno mais demorado (Figura 6). Alguns sistemas podem medir diferentes retornos do sinal emitido, refletido por diferentes objetos dentro da projeção do feixe no terreno. É possível medir o primeiro e o último retorno do pulso (*first/last pulse*), ou até pode-se medir toda a variação do retorno.

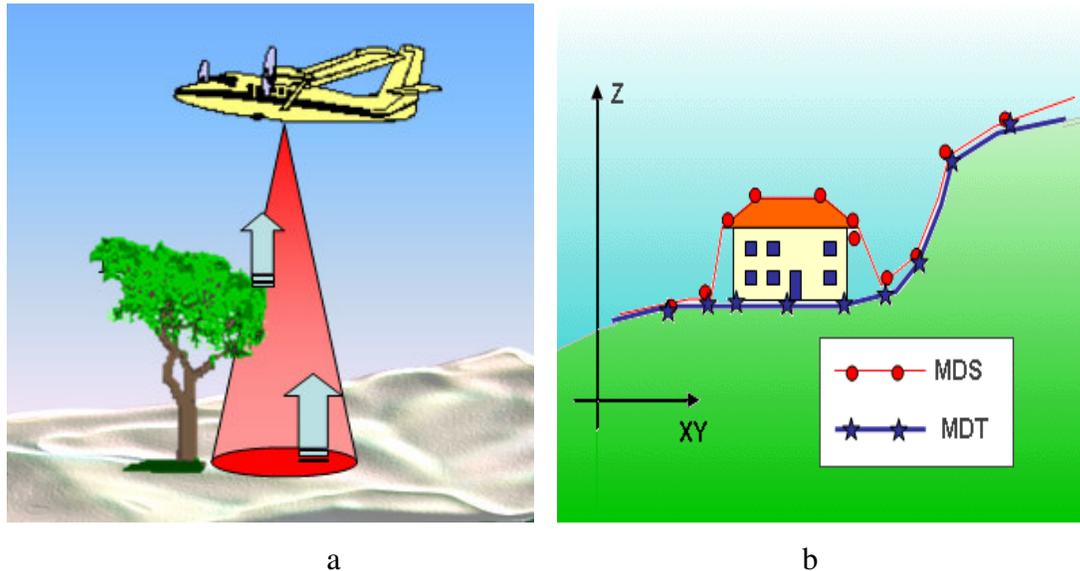
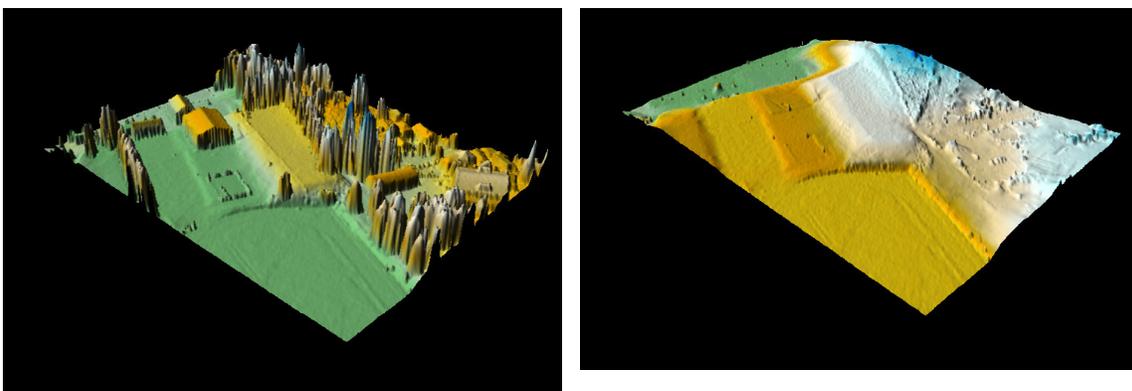


Figura 6 - a) Exemplo de registro de primeiro e último retorno. b) diferença entre MDT e MDS.

A separação de primeiro e último retorno permite classificar dois tipos de pontos num mesmo pulso. O primeiro pulso corresponde aos pontos mais elevados como árvores ou telhados. Em áreas ocupadas por árvores, o último pulso resulta da penetração do pulso na vegetação e atingem o solo, facilitando a interpolação de um modelo digital do terreno. Em áreas urbanas é também comum encontrar múltiplos retornos nos cantos dos telhados, pois parte do pulso pode ser refletido pelo telhado e o restante pode atingir o solo ou a parede, dependendo do ângulo de incidência. Este fato permite classificar os pontos em dois conjuntos, separando os pontos que incidem no terreno daqueles incidentes em outros objetos acima dele. A classificação torna-se relevante na produção de modelos digitais considerando apenas os pontos incidentes no terreno.

Porém, a princípio é desconhecido quais pontos não atingiram o terreno. Por isso, é necessário fazer a identificação e eliminação dos pontos incidentes em objetos acima do terreno. Após sua remoção, um modelo digital do terreno mais fiel é obtido. Uma revisão de possíveis soluções para este problema encontra-se em Sithole e Vosselman (2003) ou Crosilla et al. (2004). A maior parte desses métodos se baseia na identificação de pontos

afastados do terreno em função da declividade local ou da distância do ponto a um plano de referência que corresponderia ao terreno. Por exemplo, o método conhecido como do “bloco mínimo” classifica como pontos não pertencentes ao terreno aqueles pontos que, dentro de uma região pré-definida, se afastam significativamente do valor mínimo da região. Pontos com distâncias muito elevadas são considerados árvores ou prédios e são removidos. A figura 7 mostra um exemplo da remoção de pontos, numa região do Centro Politécnico da UFPR, usando este método (Assunção et al., 2007). Na figura 7a, uma vista em perspectiva do modelo original é mostrada. Nota-se a ocorrência de árvores e construções. Após a filtragem, estes objetos foram eliminados, dando origem a um modelo mais próximo da superfície do terreno.



a) modelo digital original

b) modelo digital filtrado

Figura 7 – Exemplo de Eliminação de vegetação e construções (Assunção et al., 2007).

Esta particularidade da varredura a laser, originou a introdução de dois conceitos quando se fala no modelo digital que pode ser produzido. Quando os dados se referem aos pontos que atingiram o terreno, fala-se em modelo digital do terreno (MDT). Já quando o modelo inclui, além do terreno, os objetos a ele superpostos, fala-se em Modelo Digital da Superfície (MDS). A diferença é ilustrada na figura 6b. Uma terceira grade pode ser derivada calculando a diferença entre o modelo digital de superfície (MDS) e o modelo digital do terreno (MDT). A nova grade contém apenas a altura dos objetos em relação ao

terreno. Na literatura, este modelo é chamado de modelo digital de superfície normalizado ou MDSn (Weidner e Förstner, 1995). Após a normalização, o efeito do terreno é eliminado. A vantagem do uso do modelo normalizado no estudo de áreas urbanas é que o mesmo permite obter diretamente a altura das construções. A figura 8 mostra um exemplo de um modelo normalizado em perspectiva.

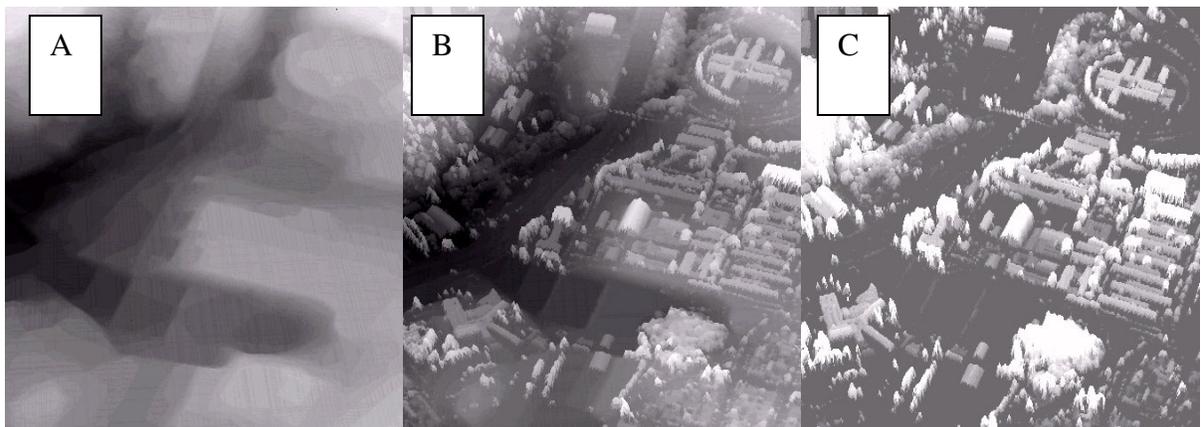


Figura 8 – Modelos digitais: a) do terreno; b) de superfície; c) de superfície normalizado (Araki, 2005).

3 4. INTEGRAÇÃO LASER SCANNER E SENSORES ÓPTICOS

A classificação de pontos apenas considerando sua altura não é suficiente para identificar prédios, pois existem, num ambiente urbano, outros objetos com altura igual ou superior, como árvores. A principal dificuldade na identificação de construções reside em excluir a vegetação. Usando somente os dados do laser scanner, esta tarefa é difícil e muitas vezes impossível, sem ajuda de dados auxiliares. A solução mais interessante, e a tendência verificada no uso de laser scanner em áreas urbanas, é a integração de dados altimétricos com informações espectrais derivadas de fotografias aéreas ou imagens de satélites de alta resolução espacial, como IKONOS II ou Quickbird. Deve se levar em consideração, neste contexto, a resolução espacial dos sensores e as características das imagens. Os levantamentos laser scanner apresentam alta densidade de pontos, com uma resolução

espacial em torno de 50 cm. As imagens orbitais têm resolução espacial superior e cobrem a região do visível e do infra-vermelho próximo do espectro eletromagnético. No caso da imagem Quickbird, a resolução espacial é quase compatível. Já o Ikonos II pode chegar ao dobro. As fotografias aéreas, por outro lado, oferecem resolução espacial superior, na ordem de 20cm, porém geralmente com dados que cobrem apenas a faixa do espectro visível.

Exemplos do uso integrado de dados espectrais e informação altimétrica podem ser encontrados em Miqueles e Centeno (2004), Botelho e Centeno (2005), Karsenty (2005). Estes trabalhos comprovam que os dados se complementam, possibilitando uma melhor descrição de uma cena urbana, onde coexistem objetos com mesmas características espectrais. Os resultados mostrados em Botelho e Centeno (2005) atestam que os dados associados à altura dos objetos melhoraram a qualidade da classificação quando comparada ao resultado da classificação puramente espectral. O uso dos dados altimétricos propiciou ainda a obtenção de uma imagem temática com qualidade superior àquela obtida usando apenas informação espectral e forma, contornando o problema da similaridade das feições espaciais quando se considera apenas o espaço bidimensional.

3.1 A questão geométrica

Uma grande diferença entre estes dois conjuntos de dados se refere à questão geométrica. Os dados do laser scanner se encontram representados em projeção ortogonal, enquanto as imagens sofrem o efeito da projeção central resultante da coleta dos dados. Para a eficiente integração dos dois conjuntos, é necessário efetuar a correção geométrica da imagem que leve em consideração a altura dos prédios e a vegetação, além do efeito do relevo. Trata-se, neste caso, da produção de uma *true-ortofoto*. Este produto pode ser obtido com ajuda da grade altimétrica derivada do levantamento laser scanner. Quando são utilizadas fotografias aéreas, os dados da orientação interior do sensor permitem efetuar uma correção mais rigorosa. Já quando se usam imagens orbitais e a orientação interior do sensor é desconhecida, soluções baseadas em pontos de apoio, inclusive altimétricos, são

aplicados. A transformação, neste último caso, é menos rigorosa e não envolve a exata determinação dos parâmetros de orientação interior. Por exemplo, polinômios, ou razões de polinômios, que levam em consideração as três coordenadas, podem ser aplicados. Exemplos são a transformação projetiva e a transformação conhecida como DTL (*Direct Linear Transform*). Um exemplo de correção geométrica com ajuda de dados da varredura laser é mostrado na figura 9 (Araki, 2005). Na figura 9b é apresentado o resultado da correção da imagem Quickbird mostrada na figura 9a, com base na transformação projetiva. Nota-se que o processo elimina o rebatimento das construções em função de sua altura. A correção da posição das construções, porém, produz um segundo problema, pois nas áreas antes ocupadas por construções elevadas podem ocorrer espaços sem dados, novas lacunas, resultantes da oclusão.



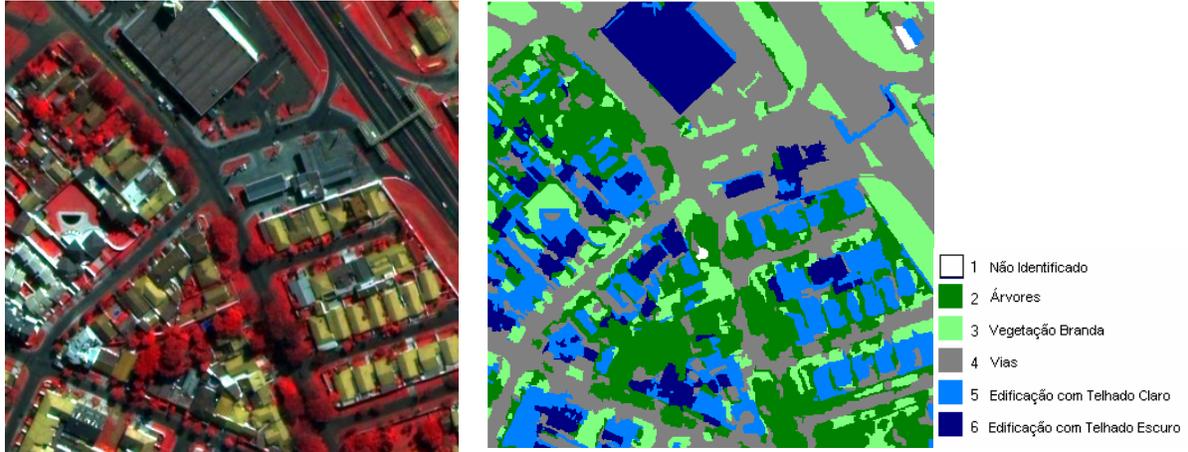
Figura 9 - Correção geométrica de imagem Quickbird com a transformação projetiva e dados laser scanner: a) original; b) ortofoto (Araki et al., 2005).

3.2 Análise de cenas urbanas

A análise do conjunto de dados pode ser efetuada utilizando o pixel como unidade ou na base de segmentos. A primeira opção é mais simples, pois segue a linha dos classificadores

tradicionais. Porém existem restrições quanto à aplicabilidade de métodos estatísticos, pois deve ser sempre verificado se a altura dos prédios segue uma distribuição normal para, por exemplo, aplicar o método da máxima verossimilhança Gaussiana. O uso de um sistema de classificação por segmentos se popularizou através do programa comercial eCognition da firma Definiens (Baatz e Schäpe, 2000). Neste caso, a imagem é inicialmente segmentada, levando em consideração aspectos espectrais e espaciais, e posteriormente os segmentos obtidos são classificados.

A classificação pode ser efetuada aplicando métodos estatísticos ou alternativas como redes neurais artificiais (Botelho e Centeno, 2004) lógica fuzzy (Karsenty, 2005) ou usando uma classificação baseada em sistemas de regras (Araki, 2005). Estes são exemplos de métodos de inteligência artificial aplicados à análise de imagens. A diferença fundamental entre estes métodos é a maneira de representação do conhecimento. No sistema de regras e na lógica fuzzy, o conhecimento é representado de maneira explícita, sob forma de regras que são avaliadas em cada situação. Já nas redes neurais, o conhecimento é representado de forma implícita através da apresentação de amostras de treinamento para cada classe. O algoritmo de treinamento das redes neurais se encarrega de propor a estratégia de separação dos elementos. Os experimentos relatados em Botelho e Centeno (2004) mostram a viabilidade da aplicação da classificação baseada em redes neurais para a identificação de construções em áreas urbanas. Um recorte do resultado de um destes experimentos é mostrado na figura 10. A abordagem baseada em segmentos apresenta a desvantagem de que os erros de segmentação não podem ser corrigidos na fase de classificação. Ou seja, o sucesso da identificação de construções é altamente dependente da correta delimitação de seus contornos.

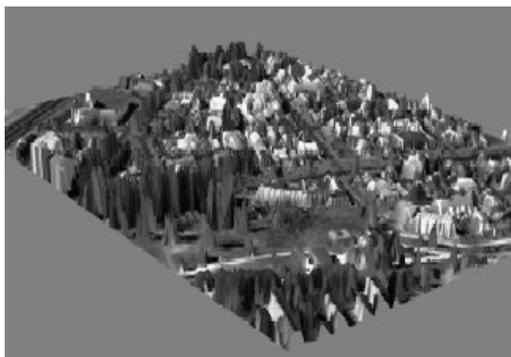


(a) Imagem Original

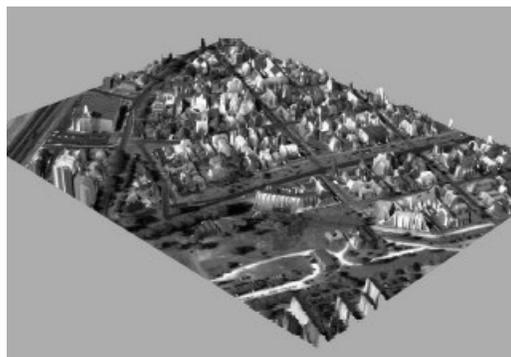
(a) Imagem classificada

Figura 10 – Classificação de imagem Quickbird e laser scanner usando redes neurais artificiais (Botelho e Centeno, 2005)

Com base na classificação dos objetos presentes na cena, o mapa temático pode ser utilizado para, utilizando novamente a informação a respeito da altura dos objetos, produzir uma nova representação onde alguns elementos podem ser eliminados. No exemplo da figura 11 (Miqueles e Centeno, 2004), a presença de vegetação, escondendo as construções, foi eliminada após a classificação. Para isto, uma imagem binária contendo apenas as áreas de vegetação foi multiplicada com a grade de alturas. Finalmente, a textura derivada da imagem orbital foi superposta. A figura da esquerda (11.a) mostra o modelo tridimensional original, a figura 11b mostra o mesmo modelo sem a presença das árvores.



(a)



(b)

Figura 11 - Modelo tridimensional com textura derivada de imagens Quickbird (a) original. (b) após a exclusão da vegetação (Miqueles e Centeno, 2004).

Os experimentos de integração de dados altimétricos obtidos pela varredura laser e imagens orbitais também mostram a limitação imposta pela ainda baixa resolução espacial das imagens orbitais e do levantamento a laser, em comparação com o tamanho dos objetos. A identificação e delimitação de construções de grande porte, como prédios industriais ou os blocos do Campus da UFPR, são obtidas com sucesso, porém prédios menores, como residências, são difíceis de serem identificados e separados. Dois fatores contribuem para esta deficiência. Por um lado, a resolução do laser scanner, o espaçamento dos pontos medidos no terreno e o tamanho do *footprint* dificultam a correta delimitação dos contornos dos telhados. A varredura a laser é feita de forma sistemática, não são procurados pontos ou feições de interesse no telhado e no solo. Assim, dificilmente todos os pulsos atingem exatamente a borda de um telhado. O segundo fator é a ocorrência de construções formando blocos, o que dificulta a identificação de cada residência. Quando a construção ocorre de forma isolada, sua detecção e delimitação são possíveis. Já quando ocorrem agrupamentos, como construções adjacentes, torna-se difícil separar cada unidade, por elas frequentemente apresentam a mesma altura e forma de telhado em áreas urbanas de baixa densidade.

Utilizando fotografias aéreas em lugar de imagens orbitais, o grau de detalhe espacial pode ser aumentado, o que contribui para a melhor definição das bordas dos telhados. No estudo de Machado (2005), fotografias aéreas obtidas com uma câmara de pequeno formato foram utilizadas conjuntamente com dados de laser scanner aerotransportado visando a atualização cartográfica em áreas urbanas. Neste caso, a correção das fotografias aéreas pode ser efetuada com base nos parâmetros da orientação interior do equipamento e com ajuda de pontos de apoio fotogramétricos distribuídos na área de estudo. O método apresentado por Machado (2005) se baseia na segmentação da fotografia, onde os telhados são melhor definidos, com a finalidade de detectar regiões uniformes. Estas regiões são depois analisadas quanto a as cor e altura, utilizando os dados do laser scanner. Na última etapa, os contornos dos segmentos são suavizados para representar as construções.



a) Segmentação



b) polígonos após a vetorização

Figura 12 – Delimitação de prédios usando laser scanner e fotografias aéreas (Machado, 2005).

A informação altimétrica também contribui de maneira significativa na monorrestituição digital de fotografias ou dados orbitais em áreas urbanas. Uma das principais restrições para a aplicação da monorrestituição em áreas urbanas é a carência de

um modelo digital contendo os prédios a serem restituídos, limitação superada com a varredura a laser. O procedimento semi-automático de restituição monocular, empregado para a obtenção vetorial de edificações em regiões urbanas a partir da integração de imagens aerofotogramétricas e dados laser scanner pode ser visto em Mitishita et al (2005). O processo consiste numa primeira fase a seleção de pontos laser, definidores das bordas das edificações, conforme apresentado na figura 13a. Na segunda fase as bordas das edificações são restituídas manualmente com um sistema CAD (figura 13b) e na terceira fase, a arquivo vetorial referente das edificações (figura 13c) e obtido com base nos dados laser, a digitalização e transformações matemáticas.



a) Pontos laser nas de bordas das edificações b) Digitalização manual das edificações c) Base vetorial obtida na restituição

Figura 7 – Monorrestituição digital, de Mitishita et al (2005).

Abordagens que utilizam os dados no seu formato original, vetorial, também são pesquisadas. Métodos que procuram identificar os telhados com base na detecção de planos no espaço tridimensional. O maior problema, neste caso, é a grande quantidade de pontos a serem analisados, o que pode ser contornado aplicando métodos para a redução da redundância espacial. Por exemplo, em Maas e Vosselmann (1999) o conjunto de dados tridimensionais é analisado com base na análise da declividade dos planos formados pelos pontos medidos no espaço tridimensional. Maas e Vosselmann (1999) propõem a pesquisa destes planos para a detecção dos planos formados pelos telhados, analisando o gradiente

dos triângulos resultantes. Em uma abordagem similar, Kersting et al (2005) utilizam a triangulação de Delaunay para reduzir a redundância espacial no modelo tridimensional. A redução é especialmente eficiente nos telhados, áreas planas, facilitando sua identificação.

5. Comentários finais

A utilização da varredura a laser em ambientes urbanos abriu novos horizontes para o estudo de cenas urbanas, servindo para a obtenção de informações a respeito da geometria dos objetos nela presentes, como as construções, que são complementares às imagens de fotogrametria e sensoriamento remoto já disponíveis.

As experiências apresentadas, como outras descritas na literatura especializada, apontam para a tendência do uso integrado de dados da varredura a laser e dados espectrais para a classificação de objetos acima do terreno, especialmente construções e vegetação. Neste particular, o uso da altura dos pontos medidos pela varredura a laser, sua distância ao terreno, é de grande utilidade, pois traz uma informação que dificilmente é obtida com imagens monoculares. Uma vez detectadas e classificadas as construções, o seguinte passo consiste na sua modelagem tridimensional, para o que a solução mais apropriada é o uso de uma nuvem de pontos tridimensionais com elevada densidade. A distribuição dos pontos no espaço tridimensional serve para a estimativa dos planos que conformam os telhados e assim definem sua forma. Por outro lado, quando apenas a altura da construção é desejada, esta última fase pode ser omitida. Porém, deve-se levar em consideração que uma construção pode ter telhados com diferentes alturas e inclinações, na estimativa de uma altura média representativa.

A plena utilização de laser scanner ainda esbarra em fatores limitantes, como a resolução espacial da varredura. Existe a expectativa, porém, de que este fator seja superado com o desenvolvimento de varredores mais eficientes, munidos de sistemas de varredura multiespectral que capturem imagens simultaneamente, bem como a disponibilidade de imagens orbitais com maior resolução espacial.

5- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, F. (1999). **Airborne laser scanning—present status and future expectations**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, No. 2-3, 1999, p. 64-67.

ARAKI, H. (2005). **Fusão de informações espectrais, altimétrica e de dados auxiliares na classificação de imagens de alta resolução espacial**. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. 210p.

ASSUNÇÃO, M.G.T., BOTELHO, M.F., CENTENO.J.A.S. e PACHECO, A.P. (2007). **Filtragem e classificação de pontos lidar para a geração de modelo digital do terreno**. XIII SBSR - Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis.

BAATZ, M. & SCHÄPE, A. (2000). **Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation**; In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung XII, Edition Herbert Wichmann, Karlsruhe, p 12-23. 2000.

BALTSAVIAS E.P. (1999a). **A comparison between photogrammetry and laser scanning**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, No. 2-3, 1999, p. 83-94.

BALTSAVIAS E.P. (1999b). **Airborne laser scanning: basic relations and formulas**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, No. 2-3, 1999, p. 199-214.

BOTELHO, M.F.; CENTENO, J.A.S. (2004). **Identificação de edificações presentes em imagem de alta resolução utilizando redes neurais e dados do laser scanner**. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - SIMGEO, 2004, Recife. Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação - SIMGEO. Recife: 2004. v. 1, p. 1-9.

BOTELHO, M.F. e CENTENO. J.A.S. (2005). **Uso integrado de imagem de alta resolução espacial e altura derivada do laser scanner na escolha do classificador orientado a região**. Boletim de Ciências Geodésicas, Vol. 11, No 1 (2005). Boletim de Ciências Geodésicas, Vol. 11, No 1.

BOTELHO, M.F.; SCHOENINGER, E.R.; CENTENO, J.A.S. (2005). **Comparação dos resultados de interpoladores vizinho mais próximo e inverso de uma distância no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner**. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), XII., 2005, Goiânia. Anais... São José dos Campos: INPE, p. 731-736.

CROSILLA F., VISINTINI D., PREARO G. (2004) **A robust method for filtering non-ground measurements from airborne LIDAR data**, in: Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXV, B3, Istanbul, p. 196-201.

KARSENTY, A. (2005). **Classification orientee objet de la permeabilite des sols en zones urbaines a l'aide d'imagerie tres haute resolution et donnees Laser Scanner a Curitiba**. XYZ magazine. Editée par l'association Française de Topographie. Vol.102.

KERSTING, J.; CENTENO, J.A.S.; MACHADO A.M.L. e PEDRO, P.C. (2005). **Filtragem de modelos digitais de superfície derivados da varredura a laser usando a triangulação de Delaunay**. In: Krueger, C.P.; Centeno, J.A.S. (Org.). Série em Ciências Geodésicas. Curitiba, , v. 4, 2005, p. 145-160.

MAAS, H.-G., VOSSELMAN, G. (1999). **Two algorithms for extracting building models from raw laser altimetry data.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Vol. 54, No. 2-3, p. 153-163.

MACHADO, A.M.L. (2005). **Extração automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR.** Tese de doutorado. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR. 206p.

MIQUELES, M.A. e CENTENO, J.A.S. (2004). **Extraction of buildings in Brazilian urban environments using high resolution remote sensing imagery and laser scanner data.** In: XXth Congress of the international society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS), 2004 Istanbul. The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2004. v. XXXV.

MITISHITA, E. A.; MACHADO, A. M. L.; HABIB, A.F.; GONÇALVES., G. A. (2004). **3D Monocular Restitution Applied to Small Format Digital Airphoto and Laser Scanner Data.** In: XXth. Congress of the international society for photogrammetry and remote sensing (ISPRS), 2004, Istanbul. the international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. 2004. v. XXXV.

SITHOLE, G. e VOSSELMAN, G. (2004). **Experimental Comparison of Filter Algorithms for Bare Earth Extraction From Airborne Laser Scanning Point Clouds.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing Volume 59, No. 1-2, p. 85-101.

WEHR A. e LOHR, U. (1999) **Airborne laser scanning—an introduction and overview.** ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, No. 2-3, 1999, p. 68-82.

WEIDNER, U. e FÖRSTNER, W., (1995). **Towards automatic building extraction from high resolution digital elevation models**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing vol. 50 iss. 4, pp. 38–49. Elsevier Science.

GEOINFORMAÇÃO E DESASTRES NATURAIS EM ÁREAS URBANAS: O CASO DO FURACÃO CATARINA

*Emerson Vieira Marcelino*¹
*Isabela Pena Viana de Oliveira Marcelino*¹
*Frederico de Moraes Rudorff*²
*Roberto Fabris Goerl*²

ABSTRACT

The southern region of Santa Catarina State, Brazil, experienced an unusual climatic phenomenon - known as Hurricane Catarina - that reached its coast at the night of 27 March 2004, causing severe damages over several coastal municipalities. In this context, this work has as objective to accomplish an inventory of the damages and to analyze the vulnerability of the affected areas by the Hurricane Catarina, particularly the urban areas, on the basis of field survey. Moreover, in this work is presented the Damage Intensity Map caused by Catarina. Both damage assessment and intensity map were carried out based on a field survey in 22 affected municipalities, covering a route of more than 3,000 km. The intensity map was performed interpolating 260 visited points that were classified according to the overall damage scenario. An interdisciplinary survey team of geoscientists applied a total of 160 questionnaires. Photographs were also taken at the most affected areas in order to assist the vulnerability assessment. It was realized that the most affected municipalities were Passo de Torres, Balneário Gaivota, and Balneário Arroio do Silva, all located along the coast, where a great number of edifications were not only damaged but also fully destroyed. However, these edifications were mainly non-engineering wood-framed and brick houses with concrete-asbestos tile roofs, presenting a fragile structure and low wind resistance. The most affected communities within the urban areas were of low income. In rural areas, most part of the damage was produced in crop fields of banana, rice, corn, and eucalyptus plantation. As the hurricane displaced towards the inland, its intensity decreased, showing a radial destruction pattern. According to the Saffir-Simpson scale and the observed damage level, the Hurricane Catarina presented class 2 hurricane winds.

Keywords: Hurricane Catarina, damage, vulnerability assessment.

RESUMO

A região sul do Estado de Santa Catarina foi surpreendida por um fenômeno climático atípico na noite de 27 de março de 2004 - o Furacão Catarina, que atingiu a sua costa causando sérios danos e prejuízos. Assim, este trabalho tem como objetivo realizar o inventário dos danos e analisar a vulnerabilidade das áreas atingidas pelo Furacão Catarina, particularmente as urbanas, com base em levantamento de campo. Além disso, também é apresentado o Mapa de Intensidade dos Danos causados pelo Catarina. Tanto o inventário quanto o mapa de intensidade dos danos foram executados com base levantamento de campo, onde foram visitados 22 municípios afetados, cobrindo uma área com mais de 3.000 km de extensão. O mapa de intensidade foi obtido através da interpolação de 260 pontos visitados, que foram classificados de acordo com o cenário geral de danos. Da mesma forma, uma equipe interdisciplinar de geocientistas aplicou um total de 160 questionários em meio à população atingida pela catástrofe. Fotografias das áreas mais afetadas foram obtidas visando ao diagnóstico de vulnerabilidade. Constatou-se que os municípios mais afetados foram Passo de Torres, Balneário Gaivota e Balneário Arroio do Silva, todos localizados ao longo da costa, onde um grande número de edificações foram danificadas e destruídas. Vale salientar, contudo, que essas edificações consistiam basicamente de casas de madeira e de tijolos, com telhas de cimento amianto, apresentando uma estrutura frágil e pouco resistente à ação dos ventos. As comunidades mais atingidas nas áreas urbanas eram de baixa renda e nível escolar. Nas áreas rurais, a maior parte dos danos foi produzida em lavouras de banana, arroz, milho e plantações de eucalipto. Conforme o furacão deslocou-se para o interior do Estado, sua intensidade diminuiu sensivelmente, apresentando um padrão de destruição radial. De acordo com a escala de Saffir-Simpson e o nível de danos observado em campo, o Furacão Catarina foi classificado como um furacão de classe 2.

Palavras-chave: Furacão Catarina, danos, vulnerabilidade.

¹ Geodesastres-Sul, Centro Regional Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Santa Maria - RS, Brasil. {emerson, isabela}@dsr.inpe.br

² Grupo de Estudos de Desastres Naturais (GEDN), Departamento de Geociências, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis - SC, Brasil. {fmrudorf, rofabris}@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas tem havido um incremento na frequência e na intensidade dos desastres naturais em todo o globo. Conforme OFDA (*US Office of Foreign Disaster Assistance*) e do CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disaster*), que mantém um grande banco de dados sobre desastres naturais (EM-DAT, 2005), nota-se um aumento significativo de ocorrências desses eventos a partir da década de 70 (Figura 1). Ressalta-se que para serem computados neste banco, os desastres têm que apresentar pelos menos uma das seguintes características: causar 10 ou mais vítimas fatais; deixar 100 ou mais pessoas afetadas; declaração de situação de emergência; e/ou chamada de ajuda internacional. Ou seja, todos os eventos registrados são significativos e impactantes.

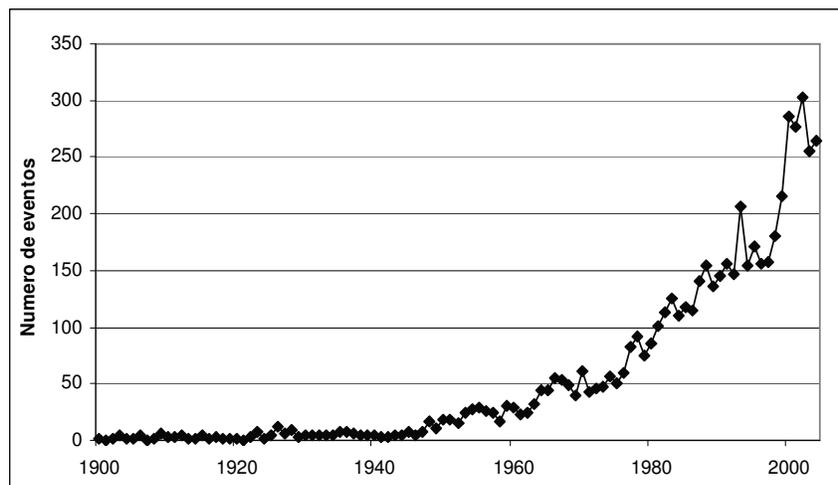


Figura 1 – Total anual de tempestades severas ocorridas no globo (período 1900-2004).
Fonte: EM-DAT (2005).

Alexander (1995) e McBean (2004) comentam que este aumento deu-se em função do crescimento populacional, do processo de segregação sócioespacial, da acumulação de capital fixo em zonas perigosas (*hazard zones*) e das mudanças climáticas globais. Destes fatores, o que mais tem se destacado na comunidade científica internacional são as mudanças climáticas desencadeada pelo aquecimento global. Como consequência destas mudanças, tem-se o aumento do nível do mar em função do derretimento das calotas polares, a extinção de espécies vegetais e animais, a diminuição da produtividade agrícola e o aumento da frequência e da intensidade das adversidades climáticas, como tempestades e secas severas em todo o globo (Boucher, 1999; Easterling et al., 2000; Houghton et al., 2001; McBean, 2004).

Apesar de não haver ainda um consenso sobre a relação direta entre as tempestades severas e as mudanças climáticas globais no século XX (Lighthill, 1994; McBean, 2004), entende-se que o aumento das tempestades nas últimas décadas também foi significativo. Além do que, Easterling et al. (2000) e Nicholls (2001) afirmam que em algumas partes do globo (escala regional) já existem indícios suficientes que podem comprovar tal hipótese.

Um dos eventos que mais chamou a atenção da comunidade científica em todo o mundo foi o Furacão Catarina, que ocorreu na costa sul do Estado de Santa Catarina nos dias 27 e 28 de março de 2004. Os fortes ventos produziram destruição generalizada, sobretudo nas comunidades situadas à beira-mar. Os tipos de danos mais comuns foram

relacionados às edificações (casas, galpões, estufas, postos de gasolina, etc.), infra-estruturas urbanas (rede elétrica, telefonia, estradas, etc.), agricultura (milho, arroz, banana, etc.), flora e fauna, além de afetar dezenas de milhares de pessoas.

Além dos intensos danos, este fenômeno também ganhou notoriedade por ter sido único no Oceano Atlântico Sul e por ter ocorrido em uma região do globo onde se havia previsto um aumento das tempestades severas para as próximas décadas (Figura 2). O modelo climático global utilizado nesta previsão foi o HadCM3 elaborado pela instituição *The Hadley Centre for Climate Prediction and Research*, subordinado ao Serviço Meteorológico da Grã-Bretanha, *Meteorological Office*, cujo objetivo foi simular a formação de tempestades severas para concentrações dobradas de CO₂ na atmosfera (Met. Office, 2004). É interessante destacar que o Catarina desenvolveu-se exatamente sobre uma das áreas que apresenta um dos maiores índices de tempestades (assinalado em tons de avermelhados na Figura 2) na América do Sul, ou seja, a costa catarinense.

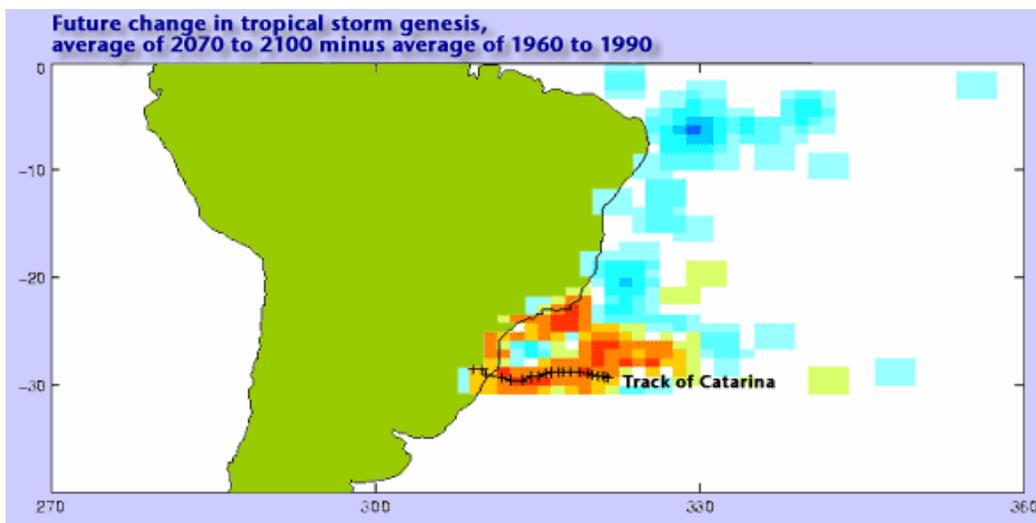


Figura 2 – Resultado do modelo HadCM3 do Met. Office que prevê o aumento de tempestades severas para algumas regiões da América do Sul, associado a trajetória do Furacão Catarina.

Fonte: Met. Office (2004).

Centros nacionais e internacionais de previsão meteorológica foram unânimes ao afirmar que este tipo de fenômeno jamais fora registrado antes na América do Sul. Tanto que sua classificação gerou grande controvérsia em meio à comunidade científica, dada a sua complexidade e raridade. Muitos pesquisadores defendem que o Catarina foi um ciclone tropical (furacão), outros classificam-no como um ciclone extratropical ou mesmo um fenômeno híbrido.

Para resolver tal impasse, foi realizado nos dias 28 e 29 de junho de 2005, no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em São José dos Campos (SP), um Workshop sobre o Catarina, que contou com a participação de pesquisadores brasileiros e de instituições internacionais especializadas no estudo e previsão de furacões. Conforme publicado no *Jornal da Ciência* n°. 2802, de 01 de julho de 2005, os pesquisadores concluíram que o Catarina foi classificado como um furacão, apesar de não ter apresentado características típicas durante o seu processo de formação. Iniciou como um ciclone extratropical, a aproximadamente 1.000 km da costa brasileira, e gradualmente

adquiriu características de um furacão, apresentando um formato circular em seu núcleo, com um “olho” bem definido, atingindo a costa catarinense e gaúcha com ventos extremamente severos.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo realizar o inventário dos danos e analisar a vulnerabilidade das áreas atingidas pelo Furacão Catarina, particularmente as urbanas, com base em levantamento de campo. Além disso, também será apresentado o Mapa de Intensidade dos Danos causados pelo Catarina.

2. A GEOINFORMAÇÃO NA PREVENÇÃO DE DESASTRES NATURAIS

As tempestades severas (*severe storms*) são eventos atmosféricos intensos que podem causar grandes danos sócio-econômicos principalmente nas áreas densamente urbanizadas, com destaque para ciclones tropicais (furacões) e extratropicais, tornados e vendavais. Associado a estes eventos, geralmente ocorrem intensas precipitações pluviométricas que podem desencadear outros tipos de desastres, como as inundações e os escorregamentos (Easterling et al., 2000; Smith, 2000; Berz et al., 2001; McBean, 2004).

As cidades são particularmente mais vulneráveis a estes tipos de perigos naturais (*natural hazards*) devido à elevada densidade populacional, a presença de atividades econômicas e de infra-estrutura urbana e a grande quantidade de bens e propriedades (Montoya, 2003). Dentre estes, o aumento da densidade populacional destaca-se como o principal fator que tem contribuído para elevar o risco de desastres naturais nas áreas urbanas. As populações mais pobres, marginalizadas socialmente, por falta de melhores oportunidades tendem a migrar para as áreas de risco (*risk areas*), como as planícies de inundação e as encostas íngremes, sujeitas às inundações e escorregamentos. Além disso, nos bolsões de pobreza as edificações geralmente são de baixa qualidade tornando-se excessivamente frágeis, o que aumenta ainda mais a vulnerabilidade (Degg, 1992; Uitto, 1998; Chardon, 1999; Mitchell, 1999).

Segundo Uitto (1998), a vulnerabilidade (*vulnerability*) pode ser definida como sendo a capacidade de um sistema social em antecipar, enfrentar, resistir e recuperar-se dos impactos de um perigo natural (*natural hazard*). Cross (2001) afirma que a vulnerabilidade é diretamente influenciada pela exposição física e social de uma comunidade, pelo seu grau de preparo e pela sua capacidade de resposta frente ao desastre. O autor também ressalta que pequenas comunidades são geralmente mais vulneráveis aos desastres do que as mega-cidades. Quando as pequenas comunidades são impactadas pelos perigos naturais (tempestades, terremotos, inundações, etc.), proporcionalmente há um maior número de pessoas afetadas e edificações destruídas do que nas mega-cidades. Além disso, pequenas comunidades apresentam uma baixa capacidade de resposta pós-evento, sendo também mais dependentes de ajuda externa.

Atualmente há um consenso de que a maioria dos eventos calamitosos não pode ser evitada. Mas, podem-se identificar padrões comportamentais com o intuito de elaborar métodos preventivos (Alcântara-Ayala, 2002; UNDP, 2004). Alexander (1995) comenta que é necessário obter-se um conhecimento detalhado da frequência (tempo), características (tipologia), magnitude (abrangência) e intensidade (impacto) dos fenômenos. Além disso, através da definição da vulnerabilidade local e da resposta do sistema social sob impacto, é possível gerenciar o risco com o intuito de minimizar as conseqüências adversas de um desastre natural (UNDP, 2004).

Numa análise de risco é possível elaborar medidas preventivas, planificar as situações de emergência e estabelecer ações conjuntas entre comunidade e o poder público, com o intuito de promover a defesa permanente contra os desastres naturais.

Coppock (1995) comenta que para este tipo de análise pode-se contar atualmente com os avanços da geoinformação, que trazem uma série de facilidades na geração e produção de dados para o estudo de fenômenos geográficos. Dentre as tecnologias existentes destaca-se o Sistema de Posicionamento Global (GPS), o Sensoriamento Remoto e, principalmente, o Sistema de Informação Geográfica (SIG). O autor comenta que os desastres naturais apresentam características e dimensões múltiplas, além de uma forte componente espacial, que seriam praticamente impossíveis de serem corretamente avaliadas sem o auxílio de um SIG.

Segundo Camara e Medeiros (1998) esta tecnologia utiliza operações matemáticas e métodos computacionais para tratamento das informações, através de correlações espaciais, temáticas, temporais e topológicas. Dentre as principais utilizações de um SIG, destacam-se: a produção de mapas; ferramenta suporte para análise espacial; e banco de dados geográficos, com funções de armazenamento, cruzamento e recuperação de dados.

Bonham-Carter (1996) comenta que o propósito final da maioria dos projetos de SIG é a combinação de dados espaciais multi-fontes, a fim de analisar e descrever as interações existentes, elaborar modelos preventivos e fornecer suporte às decisões tomadas por especialistas. Além disso, esta integração contribui para a redução da ambigüidade das interpretações que ocorrem nas análises individuais dos dados.

Segundo Balaji et al. (2005), num ambiente SIG os principais dados de desastres naturais requeridos para uma análise de risco são:

- Dados sobre o fenômeno potencialmente danoso (escorregamentos, inundações, vendavais, terremotos, etc.), local de ocorrência, frequência, magnitude, etc.;
- Dados sobre o ambiente no quais os eventos danosos podem ocorrer: topografia, geologia, geomorfologia, hidrologia, uso da terra, etc.;
- Dados sobre os elementos expostos que podem ser destruídos se o evento acontecer: infra-estrutura urbana, edificações, população, dados socioeconômicos e agropecuários, etc.

Entretanto, uma estratégia completa para a prevenção e mitigação de desastres, também conhecida como ciclo de gerenciamento de desastre (*disaster management cycle*), envolve basicamente três fases distintas (Smith, 2000; Pearson et al., 1991; Castro, 2003, Kobiyama et al, 2004):

- Primeira Fase (antes): é conhecida como a fase de prevenção e preparação (*prevention and preparedness disaster*);
- Segunda Fase (durante): envolve a realização de ações emergenciais que visam a ajuda e a reabilitação (*relief and rehabilitation*) da comunidade afetada;
- Terceira Fase (após): ocorre a reconstrução (*reconstruction*) e o restabelecimento das atividades visando sempre à funcionalidade.

Na prevenção os SIGs são utilizados para gerar e administrar o grande volume de dados necessários para a avaliação do risco, principalmente na modelagem dos processos utilizados nas previsões meteorológicas e hidrológicas, no estudo das vulnerabilidades locais e no mapeamento das áreas de risco. Enquanto que na preparação é uma ferramenta fundamental para a definição de rotas de evacuação, identificação de abrigos e centros de operações de emergência e criação e gerenciamento de sistemas de alerta.

Nas ações emergenciais esta ferramenta permite gerenciar, dos centros de operações, de maneira eficiente e rápida, as situações mais problemáticas, como as ações de combate a

sinistros (conter efeitos adversos) e de socorro às populações afetadas (busca e salvamento). Por exemplo, em combinação com o Sistema de Posicionamento Global (GPS), o SIG é extremamente útil nas operações de busca e salvamento em áreas que foram devastadas e onde a orientação é extremamente difícil. Na reconstrução, estas duas ferramentas também são usadas na realização do inventário e avaliação dos danos e na identificação de áreas seguras para a relocação e reconstrução das comunidades afetadas (Pearson et al., 1991; Smith, 2000; Balaji et al., 2005).

3. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está situada sobre a planície costeira, localizada entre o Oceano Atlântico Sul e as encostas íngremes da Serra Geral, na porção sul do Estado de Santa Catarina (Figura 3). Esta planície é composta por sedimentos quaternários continentais e marinhos, apresentando uma largura que varia de 40 km a 70 km e altitudes que oscilam entre 0 e 20 m. O contato entre a planície e a Serra Geral apresenta variações topográficas abruptas, que vão de 400 m a 1100 m, com gradientes de declividade superiores a 45° (Santa Catarina, 1991). Os rios mais importantes que atravessam a área de estudo são Mampituba, Urussanga, Araranguá e Tubarão.

A população de 505.690 habitantes é distribuída em uma área de 5.538 km², correspondendo a uma densidade demográfica de 91,31 hab/km² (IBGE, 2004). A região é de baixa relevância econômica em relação a outras regiões de Santa Catarina. Em relação à agricultura, as lavouras sazonais de maior importância são arroz, tabaco, milho, feijão e as lavouras perenes, compostas de banana, maracujá e laranja. As atividades do setor secundário compreendem basicamente as indústrias de carvão, cerâmica, têxtil, de calçados e alimentos, enquanto que o turismo prevalece no setor terciário (Santa Catarina, 1991; IBGE, 1999).

Esta região é freqüentemente afetada por sistemas atmosféricos distintos ao longo do ano. Durante o verão, as elevadas temperaturas diurnas favorecem as evaporações intensas que contribui para a formação de sistemas convectivos isolados (SCIs), os quais produzem normalmente chuvas torrenciais, ventos fortes e até mesmo tempestades de granizo no período da tarde (Marcelino, 2003). Um outro sistema atmosférico que atua, sobretudo na primavera (setembro-outubro), é o complexo convectivo de mesoescala (CCM), que pode causar chuvas e ventos fortes, granizo, tornados, etc. na costa sul catarinense (Silva Dias, 1996; Marcelino, 2003).

Os sistemas frontais transientes atuam durante o ano inteiro. Contudo, no inverno eles se tornam mais freqüentes e intensos, causando tempestades que podem desencadear inundações, precipitações de granizo e tornados. No período de primavera, as frentes frias podem ser associadas aos SCIs e CCMs, intensificando os fenômenos adversos que causam os desastres naturais (Marcelino, 2003).

Os ciclones extratropicais (CE) são distúrbios que se propagam através de frentes polares, principalmente durante o inverno, e são comuns no Oceano Atlântico Sul (Satyamurty et al., 1990; Gan, 1992; Varejão-Silva, 2000). Quando ocorrem próximo à costa de Santa Catarina, costumam gerar ventos fortíssimos, chuvas torrenciais, inundações bruscas e avanço do mar nas regiões costeiras.

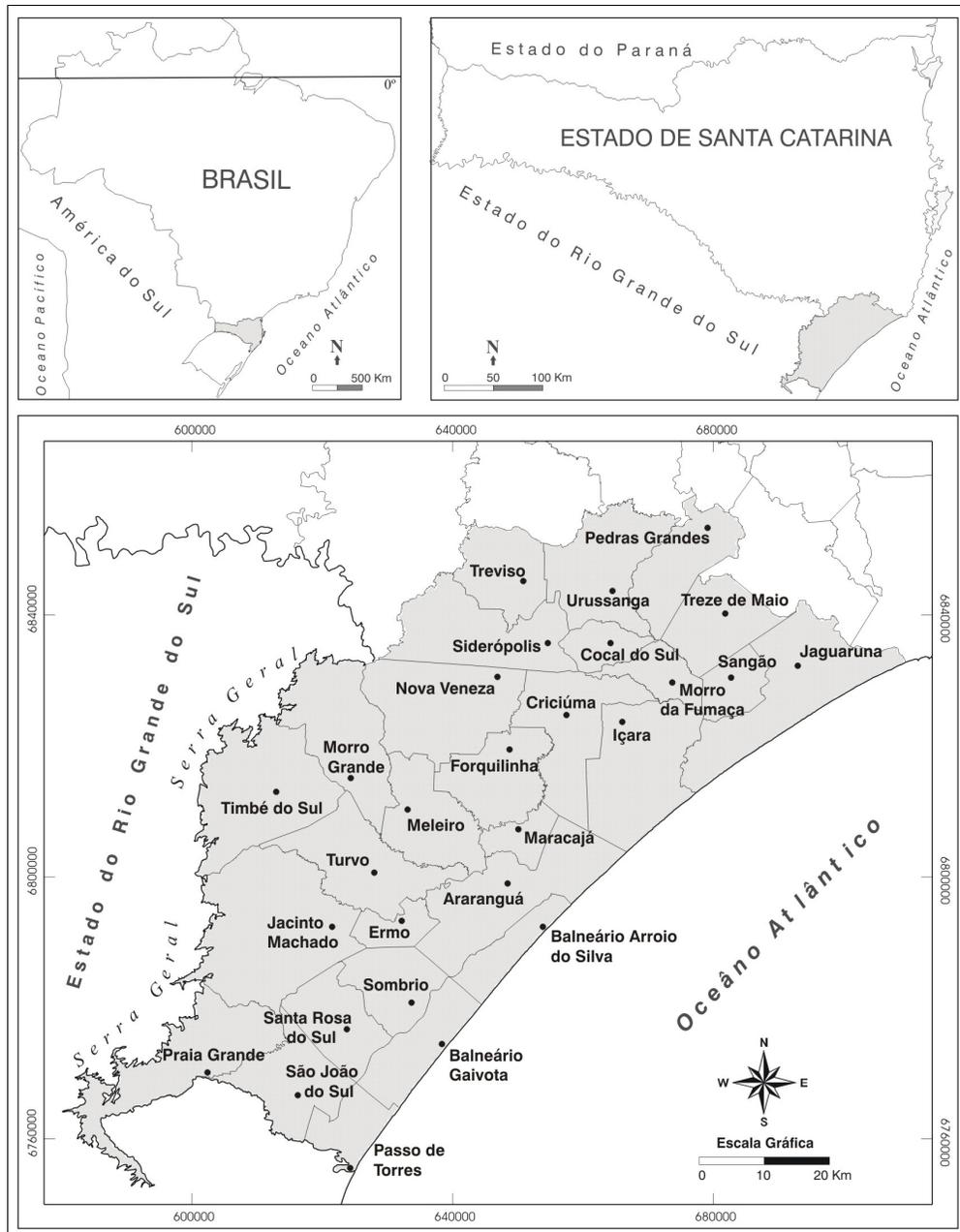


Figura 3 – Localização da área de estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

O primeiro levantamento de campo foi executado no domingo (28/03/2004), logo após a passagem do Catarina. Os municípios mais afetados foram visitados, obtendo-se registros fotográficos dos danos, bem como entrevistas junto às autoridades locais para aquisição de informações a respeito da real situação.

Quatro dias após, foi realizada outra avaliação dos danos e aplicadas entrevistas em toda a área afetada. Foram visitados 22 municípios em Santa Catarina, cobrindo um percurso de mais de 3.000 km.

No total, foram aplicados 161 questionários e tiradas dezenas de fotografias das áreas mais atingidas. Este questionário foi composto de perguntas objetivas e subjetivas,

visando identificar as características sócioeconômicas dos entrevistados, a percepção sobre o fenômeno e os danos sofridos pelos mesmos.

Um total de 260 pontos de GPS também foram coletados e classificados de acordo com a intensidade dos danos materiais. Em cada ponto fazia-se a seguinte pergunta: o dano é de pequena ou grande intensidade? Caso nenhum destes critérios houvesse sido atendido, o ponto era classificado como de intensidade média. Entretanto, caso fosse verificado que o dano era alto, fazia-se outra pergunta: o dano é alto ou muito alto? Desta forma, a classe “Alta” foi subdividida com o intuito de identificar as áreas mais impactadas, que estavam associadas à passagem do olho do furacão.

Para elaborar o Mapa de Intensidade do Furacão Catarina, gerou-se uma grade a partir dos pontos classificados, utilizando-se a técnica de interpolação disponível no programa Surfer 8. Inicialmente, o mapa foi construído usando-se a posição espacial de um determinado ponto e o valor correspondente à variável medida, representados pelos valores X, Y e Z. Assim, as coordenadas são os valores X, posição do ponto no eixo da ordenada leste-oeste, e Y, posição na abscissa norte-sul, e Z é o valor observado da variável nesse ponto. O valor Z foi obtido através da determinação de pesos, isto é, o ponto classificado como classe Muito Alta recebeu o peso 4 e para a classe Baixa deu-se o peso 1. Com a planilha elaborada a partir destes dados foi utilizado o método Krigagem de interpolação no software Surfer 8. Este interpolador apresenta propriedades não tendenciosas e procura minimizar os erros inferenciais (Camargo et al., 2004). Ao final, tem-se um arquivo grid contendo as isolinhas (mapa de contornos).

Os danos sócioeconômicos dos municípios foram obtidos a partir do relatório de Avaliação de Danos (AVADAN), submetido por cada município ao Departamento Estadual de Defesa Civil de Santa Catarina (DEDC-SC) após ter decretado Situação de Emergência (SE) e Estado de Calamidade Pública (ECP), visando à aquisição de auxílio dos governos estadual e federal.

Ressalta-se que utilizou-se somente os AVADANs homologados pelo Governo do Estado de Santa Catarina, através do Decreto n. 1.691 de 26 de abril de 2004, que atesta SE e ECP para os municípios mais afetados pelo Furacão Catarina. A SE é uma situação anormal provocada por um desastre que gera *prejuízos vultosos*, ou seja, danos suportáveis (ou superáveis) pela comunidade afetada. Já o ECP é uma situação anormal provocada por desastre, gerando *prejuízos muito vultosos*, isto é, danos dificilmente suportáveis (ou superáveis) pela comunidade afetada (Castro, 2003). Ressalta-se que os prejuízos vultosos representam de 10 a 30% do Produto Interno Bruto Municipal, na qual a situação de anormalidade pode ser superada com recursos do município, reforçada ou suplementada por meios estaduais e/ou federais. Os prejuízos muito vultosos representam mais de 30% do PIB-M, cujo retorno a situação de normalidade depende de substancial ajuda externa, principalmente da União (Castro, 2003).

Com os dados sócio-econômicos e as observações de campo foi possível classificar a intensidade do furacão, utilizando como base a escala de Saffir-Simpson (Coch, 1994; FEMA, 2000). Através desta escala, na ausência de medidas oficiais, pode-se estimar a intensidade dos furacões com base nos efeitos causados pelos ventos (Simpson, 1974).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Mapa de Intensidade do Furacão Catarina

A avaliação pós-desastre realizada no dia 28/03/04 foi fundamental para a definição e caracterização das classes de intensidade dos danos, visto que estes ainda estavam bem visíveis. É válido salientar que o objetivo do levantamento de campo foi o de relacionar

os danos com a intensidade dos ventos. Na Tabela 1, são descritas as classes de intensidade adotadas para a classificação dos pontos amostrados, que correspondem aos danos mais comuns de cada classe.

Tabela 1 – Classes de intensidade dos danos.

Classe	Características
Muito Alta	Danos generalizados, com destruição de muitas casas de madeira e de tijolos. Grandes árvores tombadas e quebradas. Perda total na agricultura.
Alta	Destruição de telhados, danos estruturais nas edificações. Muitas árvores tombadas e quebradas.
Média	Destelhamentos freqüentes e destruição de algumas estufas e galpões. Poucas árvores tombadas. Grandes perdas na agricultura.
Baixa	Perdas de algumas telhas (destelhamento leve). Muitos galhos de árvores quebrados. As maiores perdas foram na agricultura.

A Figura 4 mostra os tipos de danos nas edificações que foram mais comuns em cada classe. Na classe “Muito Alta”, a pressão dos fortes ventos causou a destruição de muitas casas de tijolos e madeira, como se pode ver na Figura 4a. As casas de tijolos mostraram-se bem frágeis do que as casas de alvenaria em virtude da ausência da argamassa (reboco). Além disso, para agravar a situação, a maioria não apresentava vigas e colunas, ficando praticamente sem qualquer tipo de amarração mais eficiente. Já na classe de intensidade “Alta”, ocorreram vários casos de perda total de telhados, conforme ilustrado na Figura 4b. Na classe “Média”, houve igualmente perdas de telhados e destruição das estufas de fumo (Figura 4c). Por fim, na classe “Baixa”, muitas lavouras foram afetadas, conforme se observa na Figura 4d. Entretanto, pode-se observar que os ventos não eram ta intensos, visto que só houve destelhamentos leves na estufa de fumo, que é considerada uma edificação frágil similar as casas de tijolos.

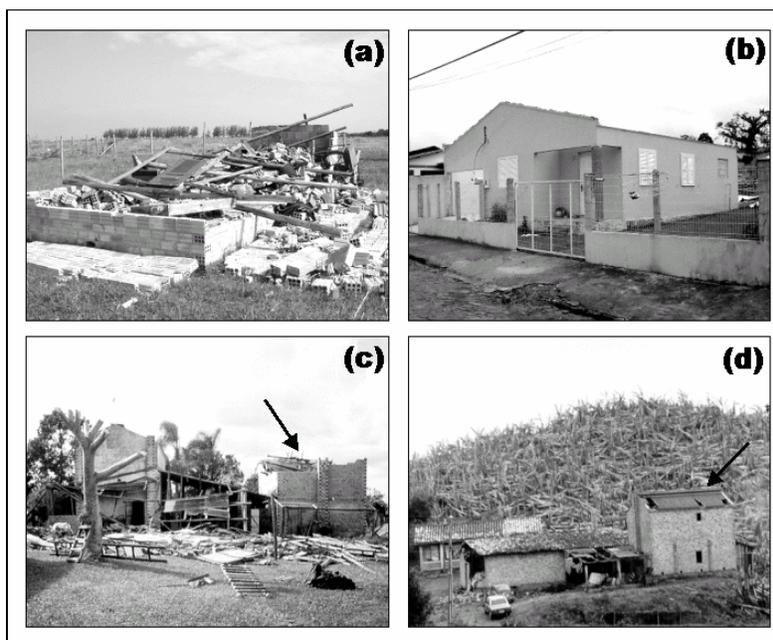


Figura 4 – Exemplos das classes de intensidade dos danos: (a) Muito Alta; (b) Alta; (c) Média; e (d) Baixa.

A Figura 5 apresenta o Mapa de Intensidade do Furacão Catarina, o qual se relaciona diretamente às classes de intensidade, estabelecidas na Tabela 1. As áreas com tons mais avermelhados foram aquelas que sofreram maiores impactos pelos ventos do furacão, abarcando quase que inteiramente os municípios de Passo de Torres, Balneário Gaivota e Balneário Arroio do Silva. Neste último município, de acordo com Marcelino et al. (2005), os ventos alcançaram cerca de 120 km/h próximo à parede do olho, e por volta de 180 km/h logo após a passagem do mesmo. A intensidade do furacão diminuiu conforme se deslocava em direção às encostas íngremes da Serra Geral, apresentando um padrão de destruição radial. Na planície costeira, próxima a Serra Geral, observaram-se pontos com uma destruição maior do que a área circundante, devido aos efeitos de intensificação da velocidade dos ventos produzidos pelas elevações do terreno, principalmente onde houve uma canalização do vento.

Davenport et al. (1985), analisando o comportamento dos furacões, comenta que o vento aumenta consideravelmente quando atinge uma encosta de uma montanha, alcançando seu pico máximo de velocidade próximo a crista da mesma (barlavento). Além disso, este comportamento pode ser ainda mais intenso quando associado a vales, causando a canalização dos ventos. Assim, a sotavento, após vencer a barreira topográfica (sob a forma de “garganta”), o poder de destruição aumenta severamente, conforme verificado no Hawaii, durante a passagem do Furacão Iniki em 1992 (Coch, 1994).

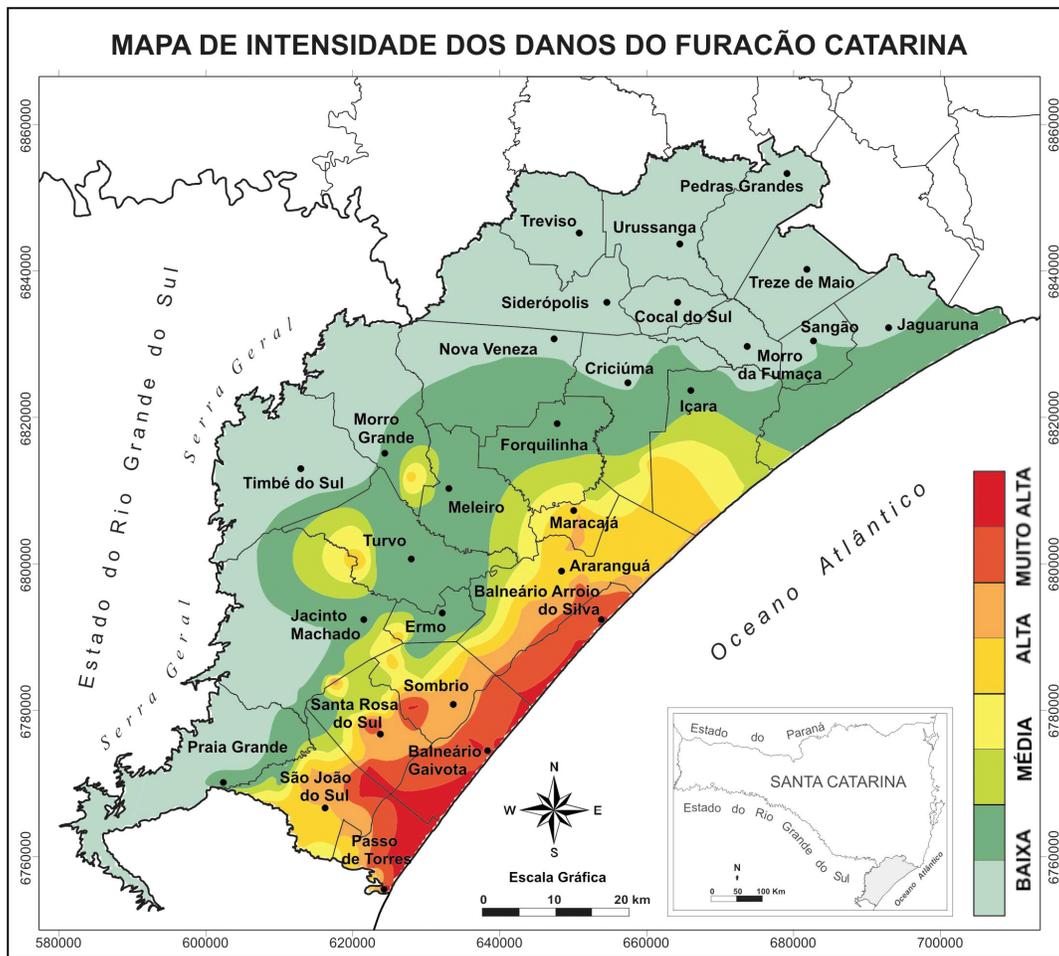


Figura 5 – Mapa de Intensidade do Furacão Catarina.

5.2 Análise dos Danos

A área atingida pela passagem do Catarina foi severamente afetada, e os danos foram mais intensos nas comunidades próximas à costa. Os danos observados foram diversos, variando desde pequenas avarias até o colapso total de telhados e casas (Figura 6). Muitos galpões também sofreram destruição parcial ou total (Figuras 7a e 7b). Na área rural, as estufas de fumo, que apresentam uma estrutura similar às casas de tijolos, como já citado, foram às estruturas mais afetadas (Figura 7c). Em Passo de Torres, muitos estaleiros foram destruídos, devido as paredes elevadas (6 m a 8 m) e baixa qualidade das suas estruturas (madeira), extremamente vulneráveis à ação dos ventos (Figura 7d). Neste município foram observados danos generalizados em 90% das edificações (Figura 8a e 8b), com destaque para a destruição de uma casa de madeira (Figura 8c), as margens do rio Mampituba que separa os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Esta casa foi arrancada pelos ventos da margem gaúcha e lançada para o lado catarinense por cima do rio, o que equivale a um trecho de 50 m, destruindo-a totalmente.

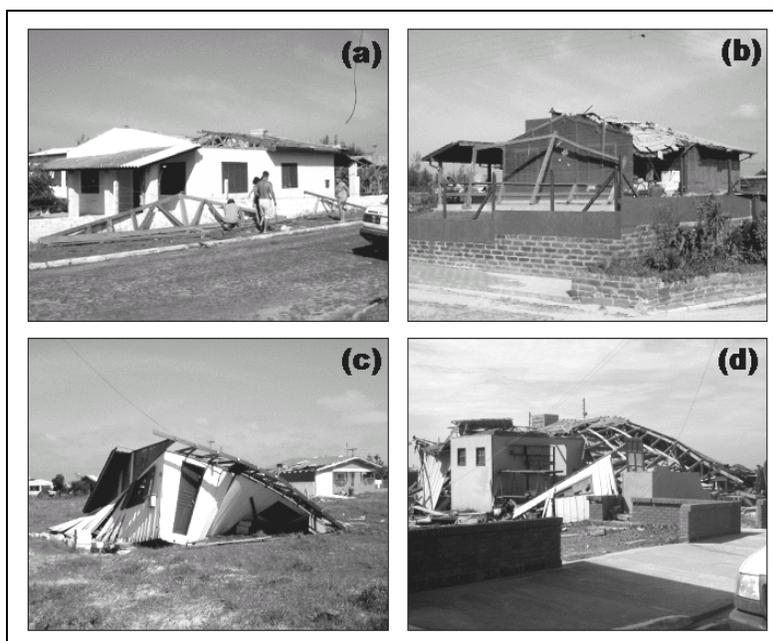


Figura 6 – Tipos de danos causados nas residências pela ação dos ventos: (a) destruição total de telhado; (b) destruição parcial de telhado; (c) destruição total de uma casa de madeira; e (d) destruição total de uma casa de alvenaria.



Figura 7 – Tipos de danos causados em galpões pela ação dos ventos: (a e b) destruição total e parcial de galpões metálicos; (c) destruição parcial de estufa de fumo; e (d) destruição total de um estaleiro.

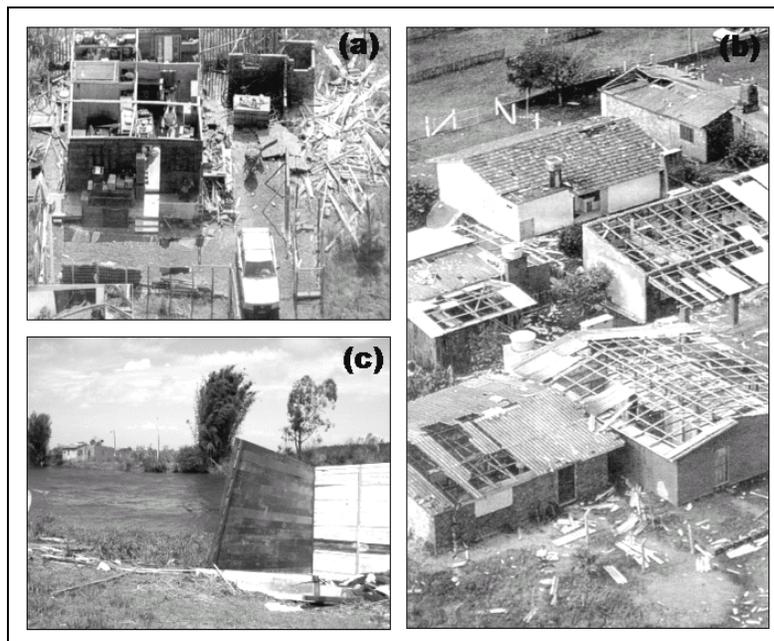


Figura 8 – Tipos de danos causados nas edificações pela ação dos ventos: (a e b) destelhamentos e destruição generalizada de telhados; e (c) restos de casa de madeira lançada sobre o rio Mampituba, divisor que separa os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

Outros danos significativos foram verificados na flora, onde diversas árvores foram derrubadas, quebradas e desganhadas. Plantações inteiras de eucaliptos foram fortemente danificadas nos municípios litorâneos (Figura 9a). Centenas de árvores caíram sobre a BR-101 deixando os municípios catarinenses isolados em relação a demais áreas do

estado. Linhas de transmissão de energia elétrica foram igualmente afetadas. Uma seqüência de aproximadamente 40 postes de iluminação tombaram na estrada que conecta o município de Balneário Gaivota ao de Sombrio (Figuras 9b e 9c), causando cortes no fornecimento de energia, problemas de comunicação e interrupção no abastecimento de água.



Figura 9 – Quedas de árvores (a) e de linhas de transmissão de energia (b e c).

O Catarina também produziu impactos na fauna. Aves das regiões litorâneas foram lançadas contra os vales e as serras situadas a 40 km da costa. Muitos pássaros morreram, enquanto outros adoeceram devido a infecções virais e a alimentação inadequada. Observou-se também um aumento no número e na agressividade de mosquitos, além de ter sido relatado que animais de criação de propriedades rurais da região apresentaram alterações de comportamento uma hora antes da passagem do furacão.

Na Tabela 2, de acordo com os danos oficiais obtidos através dos AVADANs, 44.815 residências foram danificadas e 653 destruídas; 8.451 edificações comerciais foram danificadas e 1.535 destruídas; 492 edificações públicas foram avariadas, sendo que 6 foram totalmente destruídas. Estas edificações (55.922) correspondem a 36,4% do número total de edificações existentes na área afetada.

Tabela 2 – Danos nas edificações causados pelo Catarina.

Tipo	Unidade	%
Residências danificadas	44.815	80,1
Residências destruídas	653	1,2
Comerciais danificadas	8.451	15,1
Comerciais destruídas	1.535	2,7
Públicas danificadas	492	0,9
Públicas destruídas	6	---
Edificações danificadas	53.728	35,0
Edificações destruídas	2.194	1,4
Total edificações afetadas	55.922	36,4

Os custos diretos resultantes dessas perdas com infra-estrutura de edificações foram de US\$ 25.627.616,94, correspondentes a 38% das perdas totais causadas pelo desastre, avaliadas em US\$ 67.337.773,38 (cotação de 16/06/2004 – R\$ 3,1405). Com relação ao número de pessoas afetadas, foram 24.181 desalojadas, 2.262 desabrigadas, 1.174 deslocadas, 435 feridas e 2 vítimas fatais.

5.3 Diagnóstico da Vulnerabilidade Sócio-Ambiental

a) Vulnerabilidade das Edificações

O efeito do vento sobre as residências é condicionado sobretudo pela capacidade de resistência estrutural das paredes e telhados à pressão do vento. De fato, a maior parte dos danos graves está associada à baixa qualidade das construções, devido ao emprego de técnicas construtivas inadequadas e à utilização de material de baixa resistência.

Outros danos também estão relacionados ao rompimento de portas e janelas, produzidos pela pressão do vento, bem como pelo impacto de detritos (projéteis). Essas aberturas permitem que o vento penetre na edificação, gerando pressões que podem ser até duas vezes superiores àquelas que seriam produzidas no caso da edificação ser hermeticamente fechada (FEMA, 2000).

De acordo com FEMA (2000), outras variáveis também podem contribuir para o aumento ou diminuição dos danos causados pelo vento. As cargas de ação do vento são influenciadas pelos seguintes fatores:

- Localização do sítio da construção: a rugosidade do terreno no entorno, incluindo a existência de áreas livres, construídas e florestas, pode afetar a velocidade do vento;
- Altura da construção: pressões do vento aumentam com a altura, ou ainda, edificações mais altas do que a vegetação e construções do entorno podem estar mais expostas à ação do vento;
- Topografia das áreas circundantes: elevações na superfície do solo podem aumentar a velocidade do vento;
- Volumetria da edificação.

A maior parte dos danos verificados na área atingida ocorreu em casas de madeira e alvenaria (*non-engineered and marginally engineering wood/brick house*). Estes danos foram considerados graves, apesar das edificações terem sido construídas com estruturas e materiais de baixa resistência. As casas de tijolos normalmente não possuíam argamassa, vigas e colunas, o que resultou em estruturas frágeis, com uma amarração precária entre o telhado e as paredes. Já a casa de madeira pré-fabricada (*wood-framed house*), com parede dupla, foi mais resistente, perdendo somente para as casas de alvenaria (*masonry house*).

Os destelhamentos e a destruição dos telhados verificados em campo estão diretamente associados aos tipos de telhas, ao formato dos telhados e a sua disposição em relação à direção predominante do vento. Os telhados mais vulneráveis mostraram ser aqueles cobertos por telhas de cimento amianto com 6 mm de espessura. Além disso, quando arrancadas pelos ventos, estas telhas partiram-se em diversos pedaços menores gerando uma grande quantidade de projéteis. Estes projéteis podem causar lesões e ferimentos (podendo ser fatais) nas pessoas e animais, como também causar danos nas residências próximas. A vulnerabilidade diminuiu para telhados cobertos por este mesmo tipo de

telha com espessura de 8 mm, chamado de “Calhão” ou “Canaletão”. Constatou-se, contudo, que os danos foram significativamente menores nas casas cobertas com telhas de cerâmicas, independentemente da disposição e estrutura dos telhados.

A forma dos telhados também condiciona os tipos de danos, isto é, a parte que serve de barreira ao vento é a que também sofre as maiores pressões. Por exemplo, na Figura 10, o tipo de formato de telhado mais vulnerável está representado no Exemplo I, com uma varanda frontal de 2 a 4 m de largura. O vento, conforme ele atinge a parede frontal da edificação, exerce tamanha pressão, de modo a produzir forças ascendentes na estrutura do telhado causando sua destruição. O tipo de telhado menos vulnerável está representado no Exemplo V, que dispõe de beirado lateral (70 a 80 cm), o qual enfrenta pressões de vento mais suaves.

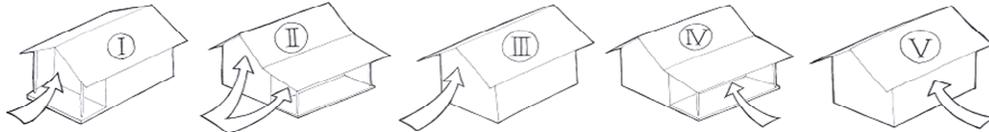


Figura 10 – Vulnerabilidade associada ao formato dos telhados.

Isto pode ser melhor explicado através do exemplo da Figura 11. Ambas as casas possuem o mesmo tipo de telha (cimento amianto com 6 mm de espessura), porém com distintas disposições em relação à direção do vento. Na casa demarcada com o círculo preto, que corresponde ao Exemplo V, houve apenas algumas perdas de telhas do beirado. Entretanto, na casa ao lado (cor branca), representando o Exemplo I, devido à presença da varanda frontal, toda a estrutura do telhado foi arrancada e lançada a cerca de 15 m de distância.

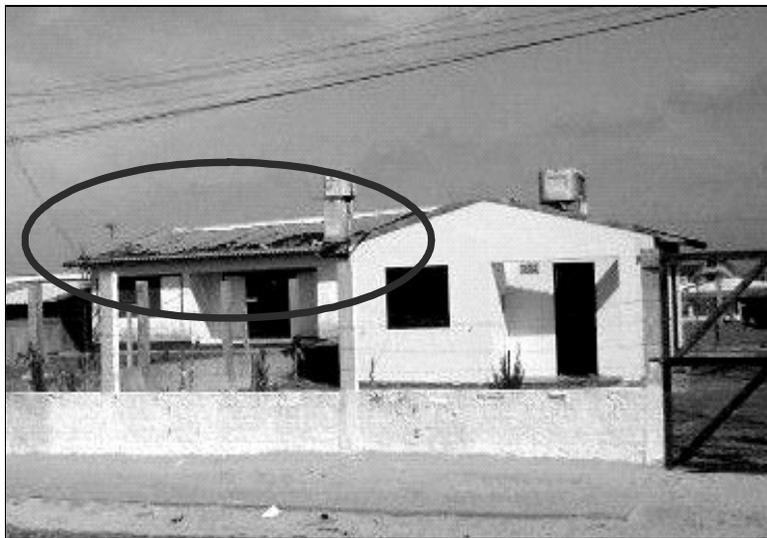


Figura 11 – Exemplo de vulnerabilidade associada ao formato dos telhados.

b) Vulnerabilidade Social

Com base nos dados coletados com os questionários, as áreas mais afetadas estavam ocupadas por população de baixa renda, onde, em 50% dos casos, a renda familiar era inferior ou igual a dois salários mínimos. Com relação às moradias afetadas, a maior parte das residências possuíam entre 4 e 6 cômodos, compondo-se de cozinha, banheiro,

sala de estar e dois dormitórios. A grande maioria das residências (94%) possuía somente um pavimento, e mais da metade (54%) apresentavam estruturas híbridas (alvenaria/ madeira).

Durante a passagem do fenômeno, cerca de 79% dos entrevistados protegeram-se dentro de suas próprias casas, principalmente no banheiro ou em um cômodo seguro, seguindo orientações fornecidas pela Defesa Civil. Os moradores que possuíam casas frágeis abrigaram-se na casa de amigos (33%) ou de parentes (52%).

Os danos que predominaram na área afetada foram destruição parcial ou total de telhados. Cerca de 81% dos entrevistados sofreram algum tipo de avaria no telhado, sendo 30% dos casos referentes à destruição total e 51%, dano parcial.

Na área rural, a maior parte dos danos atingiu as lavouras de milho (38%), banana (14%) e arroz (10%), comumente cultivadas na região. Alguns produtores de arroz puderam minimizar as suas perdas, uma vez que já haviam concluído a colheita. Entretanto, em alguns municípios, as culturas de banana e arroz foram totalmente perdidas.

Em relação às estimativas de danos materiais, observou-se que um grande número de entrevistados (31%) não sabia como avaliá-los e 22% deles calcularam suas perdas em mais de US\$ 600,00. A dificuldade na avaliação das perdas pode ser atribuída ao fato de que os danos não atingiram somente a estrutura física das residências, como também mobiliário e equipamentos eletrodomésticos. Na área rural, as estimativas dos entrevistados também apresentaram valores significativos, em vista das perdas parciais ou totais de cultivos e/ou estufas e galpões. Todos os municípios sofreram cortes no fornecimento de energia, falta de comunicação e interrupção no abastecimento de água. Embora nenhum residente tenha contraído doenças de ordem física, muitos entrevistados afirmaram estar tomando algum tipo de medicamento, sobretudo sedativos, para superar o grande choque emocional advindo da ocorrência do desastre.

Aproximadamente 96% dos entrevistados haviam sido advertidos a respeito da ocorrência do furacão, e as estações retransmissoras de rádio atuaram como a principal fonte de informação para a população. É válido destacar o trabalho das estações de rádio locais na transmissão de alertas e recomendações emitidos pela Diretoria Estadual de Defesa Civil antes, durante e depois da passagem do fenômeno. No entanto, muitos moradores narraram que ficaram confusos devido à falta de uniformidade sobre as previsões de tempo transmitidas por diferentes canais de televisão.

Os entrevistados também foram indagados se já haviam presenciado e/ou ouvido da ocorrência de um fenômeno similar ao Furacão Catarina. As respostas foram negativas por unanimidade, isto é, nenhum deles havia testemunhado um fenômeno semelhante e de tal proporção. Contudo, 59% dos entrevistados acreditam que outro fenômeno com características e poder de destruição similares pode vir a acontecer nos próximos anos.

5.4. Discussão

A vulnerabilidade pode ser diagnosticada pela análise da relação entre as comunidades atingidas e a sua capacidade de antecipação, enfrentamento, resistência e recuperação dos impactos de um perigo natural. Desta forma, as comunidades mais afetadas foram aquelas relativamente menos desenvolvidas (pequenos balneários e comunidades costeiras), onde uma grande proporção de moradores sofreu perdas consideráveis.

Nas áreas centrais dos grandes balneários, os danos não foram tão intensos, porque uma grande quantidade de residências era constituída de alvenaria, com laje de concreto. Entretanto, na periferia, muitos bairros pobres foram bem afetados devido à baixa

qualidade e resistência das casas de tijolos e madeira, que se mostraram altamente vulneráveis à ação dos ventos.

Com relação à chegada do fenômeno, tanto a população local quanto os centros de previsão meteorológica, a Defesa Civil e as autoridades locais demonstraram não possuir ainda experiência suficiente para lidar com este tipo de evento. Por exemplo, acredita-se que a população local não saiu de suas casas devida à extrema escuridão que intimidava os mais desesperados. Ou seja, apesar do envio dos alertas, a falta de conhecimento sobre as causas e o comportamento do fenômeno gerou uma situação de pânico. Tanto que durante a passagem do olho no Balneário Arroio do Silva, onde os ventos cessaram, os moradores saíram desesperados procurando ajuda, crendo que o evento já tinha acabado (Marcelino et al., 2005). Desta forma, o número de pessoas mortas e feridas poderia ter sido ainda maior, caso o furacão tivesse ocorrido durante o dia. Supõe-se que seria muito grande a probabilidade dos moradores serem atingidos por projéteis, árvores, placas, etc., ao deslocarem-se procurando ajuda. Torna-se assim, necessário continuar investindo maciçamente em campanhas educacionais, visando principalmente às crianças e os idosos que são as faixas etárias que costumam sofrer as consequências mais sérias. Além disso, para a população em geral, é recomendável fornecer material educativo (panfletos e cartilhas) que também possa orientar no processo de construção das residências e abrigos como já realizado em outras partes do globo (FEMA, 1998; 2000; 2004).

Em relação aos centros de previsão, a falta de estações meteorológicas e de bóias oceanográficas na região, tornou extremamente difícil à tarefa de prognosticar onde e quando o furacão atingiria o continente. Houve também grande confusão em vista das disparidades de informações entre os centros meteorológicos locais e nacionais.

A Diretoria Estadual de Defesa Civil (DEDC-SC) trabalhou com a possibilidade de que o Catarina atingisse a costa com ventos de intensidade de furacão. Apesar do fato de que não havia protocolo prévio sobre como lidar com este tipo de situação, o pequeno número de incidentes e ferimentos atestou o bom desempenho da DEDC-SC. De fato, eles haviam treinado 3.000 líderes comunitários e autoridades de segurança pública na Prevenção e Redução de Desastres e em Sistemas de Comando em Operações (SCO) entre os anos de 2003 e 2004 para todo o Estado de Santa Catarina. Além disso, a população foi orientada pela Defesa Civil a permanecer dentro de um cômodo seguro, ou então, no caso de possuírem casas muito frágeis, a procurar abrigo na casa de um amigo ou parente próximo, e até mesmo visitar os que moravam em cidades localizadas no interior do Estado.

Apesar dos esforços da Defesa Civil, ainda não existem planos preventivos e de evacuação e sistemas de alerta para eventos como o Catarina. A resposta (pós-evento) tampouco esteve a contento, visto que inúmeras famílias não receberam qualquer forma de auxílio para a reconstrução de suas casas ou mesmo receberam após meses vivendo em barracas de lona. Ademais, verificou-se em campo que muitas famílias foram privilegiadas no recebimento de materiais de construção devido às suas ligações com os partidos políticos das administrações locais.

Por um outro lado, constatou-se igualmente que não há uma cultura de desastres naturais em Santa Catarina, apesar de o mesmo ser um dos mais afetados por tais eventos no Brasil. Soma-se a isto o fato de que há uma enorme carência de iniciativas com relação à redução da vulnerabilidade nos interstícios das reincidências de desastres naturais. A alta vulnerabilidade do Estado a furacões estende-se também a outros tipos de perigos naturais, uma vez que os investimentos direcionados para a previsão, prevenção e mitigação dos efeitos de tais eventos são ainda escassos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os municípios mais afetados, localizados na costa sul do Estado de Santa Catarina, apresentaram um grande número de desabrigados, muitos dos quais perderam suas casas por completo. Conforme o furacão deslocou-se em direção ao interior do Estado, sua intensidade diminuiu, evidenciando um padrão de destruição radial. Com base no padrão de danos verificados na área atingida, pode-se afirmar que a intensidade do fenômeno pode ser classificada como um furacão de Classe 2, segundo a escala de Saffir-Simpson.

Embora tenha havido poucos danos pessoais (feridos e mortes), a população afetada sofreu grandes perdas materiais. Os tipos de edificações mais vulneráveis ao fenômeno demonstraram ser as casas de madeira e de tijolos. As casas de tijolos apresentam uma estrutura frágil, devido à ausência de argamassa, vigas e colunas, ao passo que as casas de madeira apresentam uma amarração precária entre o telhado e as paredes. Quanto à vulnerabilidade dos telhados, os que possuíam varandas frontais, recobertos por telhas de cimento amianto, apresentaram o pior desempenho com relação à resistência aos ventos. Nas áreas rurais, a maior parte dos danos ocorreu nas lavouras de banana, milho e arroz.

A vulnerabilidade da região foi grandemente influenciada pelo tamanho e grau de desenvolvimento das cidades afetadas. As comunidades mais atingidas foram as de baixo poder aquisitivo e nível educacional.

Ainda que a prevenção e a capacidade de preparo da população para enfrentar fenômenos naturais ameaçadores possam contribuir em muito para a redução das perdas humanas e materiais, existe uma ausência generalizada de cultura de desastres naturais no Estado de Santa Catarina. Consta-se, assim, que é crucial o investimento massivo de recursos na previsão, prevenção e mitigação desses eventos, como forma de se reduzir a vulnerabilidade das populações em risco.

Além disso, também é fundamental que tais recursos sejam gerenciados de maneira eficiente. Também sugere-se a elaboração de planos de gerenciamento de desastre detalhados, para cada tipo de fenômeno, e que reflita as três fases de um evento calamitoso (antes, durante e depois). Para tanto, é imprescindível utilizar-se da geoinformação para que se produza uma boa relação custo/benefício. A precisão, a rapidez e a eficiência fornecida pela geoinformação, na área de desastre naturais, sempre resultarão em vidas salvas. E este é o grande objetivo.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar o seu agradecimento pelo auxílio e apoio prestados pela Diretoria Estadual de Defesa Civil de Santa Catarina (DEDC-SC) e pelo Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC/CEPED). Os autores também gostariam de agradecer à equipe do Grupo de Estudos de Desastres Naturais (UFSC/GEDN), que forneceu valiosa assistência nos trabalhos de campo.

8. REFERÊNCIAS

Alcántara-Ayala, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention natural disaster in development countries. *Geomorphology*, v. 47, n. 2-4, 2002, p. 107-124.

Alexander, D. E. A survey of the field of natural hazards and disaster studies. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. (Ed.) *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. p. 1-19.

Balaji, D; Sankar, R; Karthi, S. *GIS approach for disaster management through awareness - an overview*. [on line] <http://www.gisdevelopment.net/application/natural_hazards/overview/nho0012.htm>. Visitado em 27 ago. 2005.

Berz, W.; Kron, G.; Loster, T.; Rauch, E.; Schimetschek, J.; Schmieder, J.; Siebert, A.; Smolka, A.; Wirtz, A. World map of natural hazards – a global view of the distribution and intensity of significant exposures. *Natural Hazards*, v. 23, p. 443–465, 2001.

Bonham-Carter, G. F. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Ottawa: Pergamon, 1996. 398 p.

Boucher, K. Global warning. In: Pacione, M. *Applied geography: principles and practice*. London, UK: Routledge, 1999. p. 21-35.

Camara, G.; Medeiros, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. (Ed.) *Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura*. Brasília: Embrapa, 1998. p. 03-11.

Camargo, E. C. G.; Fucks, S. D.; Camara, G. Análise espacial de superfícies. In: Druck, S.; Carvalho, M. S.; Camara, G.; Monteiro, A.V. M. (Ed.) *Análise espacial de dados geográficos*. Brasília: EMBRAPA, 2004.

Castro, A. L. C. *Manual de desastres: desastres naturais*. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174 p.

Chardon, A. A geographic approach of the global vulnerability in urban area: case of Manizales, Colombian Andes. *GeoJournal*, v. 49, p. 197-212, 1999.

Coch, N. K. Geologic effects of hurricanes. *Geomorphology*, v. 10, 1994. p. 37-63.

Coppock, J. T. GIS and natural hazards: an overview form a GIS perspective. In: Carrara, A.; Guzzetti, F. *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995. p. 21-34.

Cross, J. A. Megacities and small towns: different perspectives on hazard vulnerability. *Environmental Hazards*, 3, p. 63-80, 2001.

Davenport, A. G.; Georgiou, P. N.; Surry, D. *A Hurricane Wind Risk Study for the Eastern Caribbean, Jamaica and Belize with special consideration to the influence of topography*. London: Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, University of Western Ontario, 1985.

Degg, M. Natural disasters: recent trends and future prospects. *Geography*, v. 77, n. 336, p. 198-209, 1992.

Easterling, D. R.; Meehl, G. A.; Parmesan, C.; Changnon, S. A.; Karl, T. R.; Mearns, L. O. Climate extremes: observations, modeling, and impacts. *Science*, v. 289, p. 2068-2074, 2000.

EM-DAT. *The OFDA/CRED International Disaster Database*. [on line] <<http://www.em-dat.net/>>. Visitado em 29 ago. 2005.

FEMA - Federal Emergency Management Agency. *Design and construction guidance for community shelters*. Washington: FEMA, 2000. (FEMA 361).

FEMA - Federal Emergency Management Agency. *Design and construction guidance for community shelters*. Washington: FEMA, 2000. (FEMA 361).

FEMA - Federal Emergency Management Agency. *Homeowner's guide to retrofitting: six ways to protect your house from*. Washington: FEMA, 1998. (FEMA 312).

FEMA - Federal Emergency Management Agency. *Taking shelter from the storm: building a safe room inside your house*. Washington: FEMA, 2004. (FEMA 320).

Gan, M. A. *Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul*. São José dos Campos. 195 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1992. (INPE/5400-TDI/479).

Houghton, J. T.; Ding, Y.; Griggs, D. J.; Noguera, M.; Van der Linden, P. J.; Dai, X.; Maskell, K.; Johnson, C. A. *Climate change 2001: the scientific basis*. New York, USA: Cambridge University Press, 2001. 881 p.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Produção Agrícola Municipal – 1999*. Rio de Janeiro: IBGE, 1999. [on line]. <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/>>. Acesso em 31/05/2004.

Kobiyama, M.; Mendonça, M.; Moreno, D. A.; Marcelino, I. P. V. O.; Marcelino, E. V.; Gonçalves, E. F.; Brazetti, L. L. P.; Goerl, R. F.; Moller, G. S. F. *Introdução à prevenção de desastres naturais*. Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. 57 p.

Lighthill, J.; Holland, G.; Gray, W.; Landsea, C.; Craig, G.; Evans, J.; Kurihara, Y.; Guard, C. Global climate change and tropical cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 75, n. 11, p. 2147-2157, 1994.

Marcelino, E. V.; Rudorff, F. M.; Goerl, R. F.; Haas, R. Observações “in loco” realizadas durante a passagem do fenômeno Catarina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2005. (Submetido).

Marcelino, I. P. V. O. *Análise de episódios de tornados em Santa Catarina: caracterização sinótica e mineração de dados*. São José dos Campos. 220 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2003.

McBean, G. Climate change and extreme weather: a basis for action. *Natural Hazards*, v. 31, p. 177–190, 2004.

Met. Office. *Catarina hits Brazil: South Atlantic Hurricane breaks all the rules*. [on line] <<http://www.metoffice.com/sec2/sec2cyclone/catarina.html>> Visitado em 30 out. 2004.

Mitchell, J. K. Megacities and natural disaster: a comparative analysis. *Geojournal*, v. 49, p. 137-142, 1999.

Montoya, L. Geo-data acquisition through mobile GIS and digital video: an urban disaster management perspective. *Environmental Modelling & Software*, v. 18, p. 869–876, 2003.

Nicholls, N. Atmospheric and climatic hazards: improved monitoring and prediction for disaster mitigation. *Natural Hazards*, v. 23, p. 137–155, 2001.

Nicholls, N. Atmospheric and climatic hazards: improved monitoring and prediction for disaster mitigation. *Natural Hazards*, v. 23, p. 137–155, 2001.

Pearson, E.; Wadge, G.; Wiscoski, A. P. An integrated expert system/GIS approach to modeling and mapping natural hazards. In: European conference on GIS (EGIS'91), 1991, Brussels, *Proceedings...* Brussels, Belgium: EGIS foundation, 1991. Session 26, pp 763-771.

Santa Catarina. Secretaria de Estado de Coordenação Geral e Planejamento. Subsecretaria de Estudos Geográficos e Estatísticos. *Atlas Escolar de Santa Catarina*. Florianópolis: IOESC, 1991. 135 p.

Satyamurty, P.; Ferreira, C. C.; Gan, M. A. Cyclonic vortices over South America. *Tellus*, 42A, 1990, p. 194-201.

Silva Dias, M. A. F. Complexos convectivos de mesoescala. In: *Climanálise Especial: edição comemorativa de 10 anos*. Cachoeira Paulista: INPE/CPTEC, 1996. p. 173-182.

Simpson, R. H. The hurricane potential scale. *Weatherwise*, v. 27, p. 179-186, 1974.

Smith, K. *Environmental hazards: assessing risk*. Florence, USA: Routledge, 2000. 352 p.

Uitto, J. I. The geography of disaster vulnerability in megacities: a theoretical framework. *Applied Geography*, v. 18, n. 1, p. 7-16, 1998.

UNDP – United Nations Development Programme. *Reducing Disaster Risk: a challenge for development*. New York: UNDP, 2004. 129 p.

Varejão-Silva, M. A. *Meteorologia e Climatologia*. Brasília: INMET, 2000.

TORNADOS EM SANTA CATARINA: ANÁLISE METEOROLÓGICA E DE VULNERABILIDADE COM O AUXÍLIO DE GEOTECNOLOGIAS

Isabela Pena Viana de Oliveira Marcelino¹

Ernani de Lima Nascimento²

Nelson Jesus Ferreira³

ABSTRACT

Aiming to improve the knowledge of tornadoes in Brazil the current study analyzes their space temporal distribution in Santa Catarina (SC) state, as well as the associated vulnerability with this phenomenon. A review on the use of geotechnologies for tornadoes studies and also a case study of a tornado event that took place in Criciúma (SC) on January 3, 2005 are also presented. It was observed that tornadoes do occur practically every year in that region, having higher frequency of occurrence during the southern spring and summer. However, preventive measures in case of tornadoes outbreaks are still limited to assist the public to deal with its phenomenon, such that the local community's vulnerability is relatively high. The presented tornado analyses documents the synoptic conditions and the observed damages. It was observed that the storm in which the tornadoes were embedded developed in a meteorological condition different from its typical middle latitudes counterpart. These tornadoes classified as F1 and F2 left a footprint of destruction in Criciúma.

Keywords: Tornado, meteorological analysis, vulnerability assessment, Brazil

RESUMO

O presente trabalho pretende aperfeiçoar o conhecimento sobre tornados no Brasil, analisando a distribuição espaço-temporal de tornados em Santa Catarina, como também a vulnerabilidade associada a esse fenômeno. Uma discussão sobre o uso de geotecnologias para estudos de tornados será apresentada, como também um breve estudo de caso dos tornados ocorridos no município de Criciúma (SC) no dia 3 de janeiro de 2005. Constatou-se que os tornados ocorrem quase que anualmente em Santa Catarina, apresentando maior frequência nos meses da primavera e verão. Apesar disso, medidas preventivas para ocorrências de tornados são ainda limitadas no sentido de preparar a sociedade para lidar com esses fenômenos, tornando a vulnerabilidade das comunidades locais relativamente alta. A análise do episódio de tornado documenta a situação sinótica do ambiente atmosférico, bem como a análise dos danos ocasionados. As tempestades que geraram os tornados desenvolveram-se em condições meteorológicas que não apresentavam as características clássicas comumente observadas em ambientes atmosféricos típicos de tornados em latitudes médias. Esses tornados que foram classificados como F1 e F2 deixaram um rastro de destruição em locais distintos no município de Criciúma.

Palavras-Chave: tornado, vulnerabilidade, geotecnologias, análise meteorológica.

¹ Núcleo Geodesastres-Sul, Centro Regional Sul, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Santa Maria – RS. isabela@dsr.inpe.br.

² SIMEPAR Tecnologia e Informações Ambientais, Curitiba – PR. elnascimento@ufpr.br.

³ Divisão de Sensoriamento Remoto, Coordenação-Geral de Observação da Terra, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP. nelson@ltd.inpe.br.

1. INTRODUÇÃO

O Estado de Santa Catarina, localizado na região sul do Brasil, é propício à ocorrência de vários fenômenos climáticos severos, como vendavais, tempestades de granizo, inundações e até mesmo tornados. Dentre os mais frequentes fenômenos que provocam desastres naturais no território catarinense estão as inundações graduais (enchentes), com 1.215 ocorrências para um período de 21 anos. Os demais tipos de fenômenos extremos apresentaram um terço da frequência das inundações (Herrmann, 2001). Desta forma, em virtude das frequentes ocorrências, alguns municípios já dispõem de medidas preventivas estruturais (obras de engenharia) e não-estruturais (sistemas de alerta, mapeamentos, etc.), que visam diminuir a vulnerabilidade e, conseqüentemente, os impactos causados por tais fenômenos naturais.

De acordo com o Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (UNDP, 2004), o termo vulnerabilidade está associado ao nível de exposição e fragilidade de um sistema social em relação a um perigo natural. Uma das variáveis que contribuem para determinar o grau de vulnerabilidade é a capacidade de resistência e adaptação da população a esses fenômenos. Outras variáveis também são consideradas, como por exemplo, o baixo nível socioeconômico, a fragilidade das organizações sociais, a existência de edificações de baixa qualidade, dentre outros. Portanto, a vulnerabilidade é atenuada em áreas urbanas mais desenvolvidas, principalmente quando dotadas de planejamento e recursos específicos para mitigar as perdas advindas desses desastres (UNDP, 2004).

Santa Catarina apresenta graus diferenciados de vulnerabilidade em relação a cada tipo de fenômeno natural, a exposição física e social e a capacidade de resposta pós-evento (Cross, 2001). Enquanto já existem medidas preventivas para inundações, o mesmo não é válido para os outros tipos de perigos naturais. Com relação aos tornados, o território catarinense apresenta uma vulnerabilidade elevada, principalmente nas áreas urbanas, onde sua ocorrência pode provocar muitos danos e prejuízos, causando a destruição de edificações e resultando em elevado número de vítimas.

O tornado é definido como uma coluna de ar com rotação violenta em contato com o solo, normalmente observado como uma nuvem funil pendente de um cumulonimbus (Fujita, 1981). Doswell (2001) afirma que o tornado é formado pelo ar em movimento, cujos ventos são fortes o suficiente para causar destruição na superfície terrestre. Além de ser considerado como um dos mais violentos distúrbios atmosféricos, os tornados são normalmente acompanhados por intensas chuvas, precipitações de granizo e vendavais.

Santa Catarina é um dos estados brasileiros que apresenta as condições mais propícias para a ocorrência de tornados. O clima da região é caracterizado por passagens frequentes de sistemas frontais, sistemas convectivos de mesoescala e instabilidades isoladas que causam intensas precipitações, tempestades de granizo, vendavais e tornados (Marcelino, 2003, 2005). Além do que, vários episódios de tornados e trombas d'água (tornados na água) foram documentados nesse estado desde os anos 70. Brooks et al. (2003) também apresenta a Região Sul do Brasil como uma das áreas mais favoráveis no globo para a ocorrência de tempestades tornádicas, sugerindo assim, a necessidade de estudos mais aprofundados para essa região.

Neste contexto, o presente trabalho pretende aperfeiçoar o conhecimento sobre tornados no Brasil, analisando a distribuição espaço-temporal de tornados em Santa Catarina, como também a vulnerabilidade associada a esse fenômeno. Uma discussão sobre o uso de geotecnologias para estudos de tornados será apresentada, como também um breve estudo de caso dos tornados ocorridos no município de Criciúma (SC) no dia 3 de janeiro de 2005.

2. GEOTECNOLOGIAS PARA ESTUDOS DE TORNADOS

A utilização de geotecnologias para estudos de tornados é fundamental tanto na fase de prognóstico (previsão) quanto no diagnóstico. Na fase de prognóstico, a utilização de imagens de satélite e radar meteorológico torna-se imprescindível na determinação das áreas de instabilidades geradoras do fenômeno. No Brasil, apesar de poucos estudos enfocarem essa temática, alguns trabalhos tem sido realizados com imagens de radar visando o estabelecimento de um futuro sistema de alerta (Held et al., 2004; Held et al., 2005a; 2005b).

Quanto à fase de diagnóstico, que requer tanto estudos da atmosfera quanto da superfície, as geotecnologias também estão fortemente presentes, principalmente associados a imagens de satélites e de radar. Alguns trabalhos com esse enfoque já foram realizados no Brasil, por exemplo, Marcelino (2003) e Marcelino e Conforte (2003) utilizaram imagens do canal infravermelho termal do GOES-8 para gerar a temperatura de brilho do topo das nuvens. Essas imagens foram classificadas visando a identificação de células convectivas mais profundas, ou seja, as células prováveis que geraram os tornados. Eles também utilizaram imagens do radar *Precipitation Radar* (PR) do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) para diagnosticar a distribuição horizontal e vertical da precipitação ao longo de uma tempestade. Todavia, como limitação, este radar apresenta baixa resolução temporal, o que resulta na perda de registro de diversos episódios de tempestades que ocorrem no globo.

No que se refere à avaliação dos danos ocasionados pelos tornados e a delimitação de sua trajetória, o GPS é uma ferramenta importante para que esses registros sejam feitos de forma precisa. Em cada ponto analisado é retirada a coordenada geográfica e estabelecida à intensidade dos danos (Figura 1), de acordo com a escala Fujita (1981). Ressalta-se que esta é uma das escalas mais utilizadas em todo o mundo para avaliação de danos de tornados. A intensidade é determinada em campo através da análise das edificações danificadas, da tipologia das árvores derrubadas, quebradas ou arrancadas, do tamanho dos projéteis lançados pelo tornado, etc. Por exemplo, utilizando esta metodologia foi possível classificar como F3 (Força 3 – 252 a 332 km/h) o tornado ocorrido em 24/05/05 no município de Indaiatuba/SP (Nascimento e Marcelino, 2005).

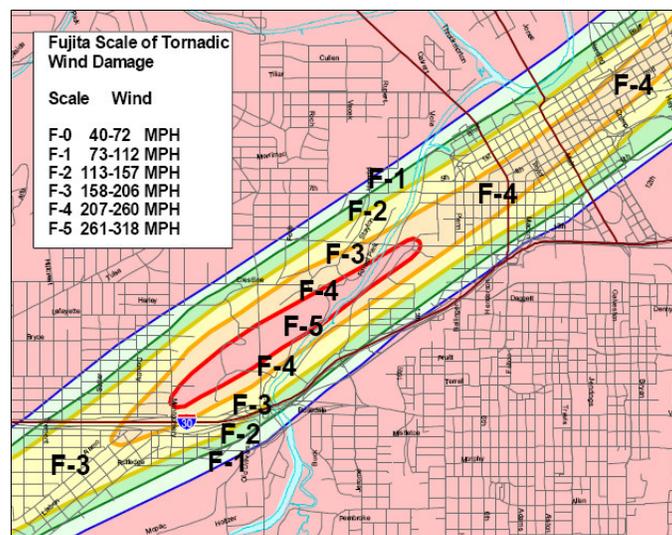


Figura 1 – Variação da intensidade do tornado ao longo de sua trajetória.
Fonte: Rae et al. (2001).

Imagens de satélites ambientais e fotografias aéreas também são utilizadas para determinar a trajetória dos tornados. Lillesand et al. (2002) realizaram diferentes processamentos digitais de imagens para melhor visualizar a trajetória percorrida por um tornado F3 que ocorreu no Estado de Wisconsin (EUA) em junho de 2001. Na Figura 2 pode-se observar a imagem do local da trajetória um mês antes da ocorrência do tornado (Figura 2a), enquanto na Figura 2b observar-se a trajetória do fenômeno um dia após a sua ocorrência. Neste trabalho foi utilizada a técnica de Componentes Principais (CP), para verificar as mudanças produzidas no solo pela passagem do tornado (Figura 2c).

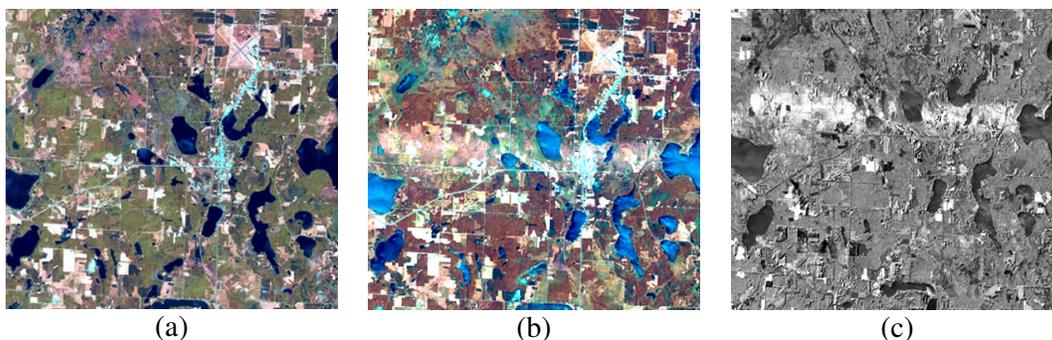


Figura 2 – Imagens do satélite Landsat-7, sensor ETM+, mostrando o local de ocorrência do tornado: (a) Imagem do dia 18/05/2001; (b) Imagem do dia 19/06/2001; (c) Imagem processada: segunda Componente Principal usando as bandas 1, 2 e 5 das imagens (a) e (b).

Fonte: Lillesand et al. (2002).

Outras técnicas de processamento digital também estão sendo usadas para delimitar os rastros dos tornados. Yuan et al. (2002) utilizou três técnicas de processamento digital de imagens para determinar os rastros dos tornados ocorridos em maio de 1999 em Oklahoma (EUA). A melhor técnica para determinar os rastros de tornados mais intensos foi a CP, que permitiu detectar tornados F4 nas áreas rurais e F3 nas áreas urbanas. A segunda técnica utilizada foi o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) (*NDVI analysis*) que se mostrou hábil para determinar tornados com danos F2 e F3, tanto em áreas urbanas quanto em áreas rurais. A terceira técnica utilizada foi a detecção de mudanças com NDVI (*NDVI change analysis*) que permitiu identificar os tornados de intensidade F1 e F2 (Yang et al., 2002).

No Brasil, Dyer (1988; 1994) realizou a detecção de rastros de tornados no sudoeste do Brasil, Paraguai e norte da Argentina utilizando imagens do sensor MSS do satélite Landsat 1 e fotografias aéreas com resolução de 1:60.000. O autor concluiu que utilizando as imagens de satélite os rastros de tornados são mais fáceis de serem visualizados quando ocorridos sobre áreas com cobertura vegetal. Assim, como citado por Yuan et al. (2002), a identificação de tornados utilizando imagens multiespectrais está diretamente associada ao tipo de uso e cobertura do solo. Com a chegada dos satélites de alta resolução (ex. Ikonos, QuickBird, entre outros) variando de 1 a 5 m de resolução espacial, tais problemas diminuíram significativamente. Entretanto, o uso não muito freqüente destes sensores nos estudos sobre identificação dos rastros de tornados, deve-se ainda ao elevado custo das imagens (Yuan et al, 2002).

Ainda tratando-se da avaliação dos danos de tornados, alguns trabalhos têm apresentado modelagens da trajetória do fenômeno associado à estrutura urbana das cidades,

utilizando o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Isso também tem sido feito para estudos de análise de risco, realizando simulações em 3D de tornados que já ocorreram, em locais com alta probabilidade de ocorrência. Rae et al. (2001) realizaram um trabalho no qual utilizaram os dados dos tornados que ocorreram em maio de 1999 em Oklahoma (EUA) para simular vários cenários de destruição para as cidades do norte do Texas, avaliando assim seus impactos socioeconômicos (Figura 3).

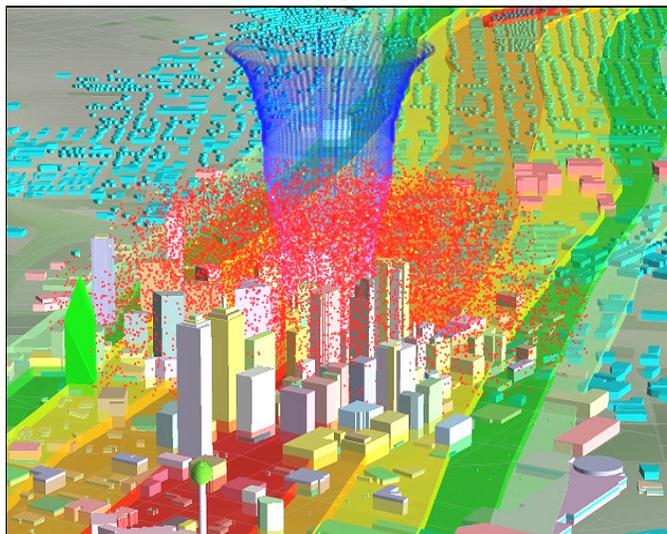


Figura 3 – Simulação em 3D de um tornado atingindo a cidade de Dallas - Texas.
Fonte: Rae et al. (2001).

O SIG também é uma poderosa ferramenta na avaliação, gerenciamento e comunicação de risco, podendo também ser amplamente utilizado na educação e capacitação das comunidades. Além disso, fornece subsídios para a resposta e reconstrução, oferecendo uma complexidade de dados e informações sobre a infra-estrutura das edificações, os danos potenciais, a localização dos abrigos, etc. Também é capaz de demonstrar os benefícios de ações de mitigações passadas e visualizar o potencial das iniciativas futuras, o que poderá resultar em alterações nas formas de uso da terra, na tipologia das construções e nos planos de prevenção de desastres (FEMA, 2003).

3. OCORRÊNCIAS DE TORNADOS EM SANTA CATARINA

3.1 Condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de tornados

A ocorrência de convecção profunda severa depende, fundamentalmente, da presença de quatro elementos atmosféricos: disponibilidade de umidade, instabilidade convectiva, cisalhamento vertical do vento e movimento ascendente que inicie a convecção (p.ex., Doswell e Bosart 2001). Tais padrões são comumente observados em condições precedentes à ocorrência de tempestades tornádicas em latitudes médias. Algumas características meteorológicas que acompanham esses padrões incluem: o esfriamento da atmosfera nos níveis médios (em torno dos 5 km de altitude), muitas vezes associado a um sistema migratório de baixa pressão em escala sinótica; uma camada de ar seco entre a baixa e a média troposfera (de 3 a 5 km de altitude); e presença de umidade na baixa troposfera (Johnson e Mapes, 2001). Quando estas características estão presentes simultaneamente, a atmosfera torna-se substancialmente instável.

Outros processos atmosféricos podem desempenhar um papel relevante no desencadeamento de convecção severa (e que pode, ocasionalmente, resultar em tornados). Um destes processos é o acoplamento entre correntes de jato da baixa e alta atmosfera, conforme descrito por Uccellini e Johnson (1979). Efeitos orográficos também podem contribuir para o desenvolvimento de convecção profunda (incluindo tempestades severas) uma vez que representam forçantes ascensionais para a iniciação convectiva. Esse assunto foi discutido, por exemplo, por Costa et al. (2001), que trataram do papel desempenhado pela forte interação entre o fluxo de escala sinótica e as encostas dos Alpes na formação de tempestades tornádicas na Itália. Entretanto a presença de orografia não é condição necessária para a formação de tornados.

Estudos mais recentes confirmam que os subtropicais da América do Sul, incluindo o sul do Brasil, está entre algumas das regiões do mundo onde eventualmente encontram-se condições sinóticas favoráveis ao desenvolvimento de tempestades convectivas severas, o que inclui tempestades capazes de produzir pedras de granizo de tamanho considerável, vendavais e tornados (Brooks et al., 2003; Nascimento, 2005). Em um trabalho relativamente recente, Brooks et al. (2003) conduziram uma análise “climatológica” global, cobrindo um período de três anos, sobre as condições atmosféricas conducentes ao desenvolvimento de tempo severo. Para este fim, eles calcularam, para todo o planeta (usando dados de 1997 a 1999), parâmetros atmosféricos usados para o prognóstico de tempestades severas e tornados nos Estados Unidos. Os resultados sugerem que a região subtropical da América do Sul está entre as mais ativas em termos de atividade convectiva potencialmente severa.

Há mais de uma razão para a região sul do Brasil (e parte do sudeste, mais o estado de Mato Grosso do Sul) estar incluída nas áreas suscetíveis à ocorrência de tempestades severas. Primeiro, ela é frequentemente influenciada por sistemas baroclínicos migratórios muito ativos, que estão associados a mudanças bruscas de temperatura, induzem a formação de ciclones em superfície (sistemas frontais e ciclones extratropicais) e favorecem o estabelecimento de cisalhamento vertical do vento (Nascimento, 2005). Segundo, a umidade oriunda da Bacia Amazônica é eficientemente transportada para as latitudes mais altas da América do Sul através da presença de escoamentos meridionais na baixa atmosfera, ou jatos de baixos níveis de norte, durante a estação quente neste continente (Berri e Inzunza, 1993). Este processo aumenta a oferta de umidade nos baixos níveis da atmosfera da região, o que também contribui para a desestabilização atmosférica.

O desenvolvimento de sistemas convectivos de mesoescala sobre o Paraguai e nordeste da Argentina durante a estação quente está fortemente associado à presença do escoamento de norte em baixos níveis. Tais sistemas convectivos são responsáveis por acumulações de precipitações (que por vezes geram inundações repentinas), bem como pela ocorrência ocasional de fortes ventos em superfície, particularmente sobre o oeste de Santa Catarina (Monteiro, 2001). E conforme apontado por Marcelino (2003), a existência deste fluxo de norte na baixa atmosfera associado a ventos de oeste na alta atmosfera e a difluência zonal na alta troposfera favorecem a ocorrência de tempestades tornádicas (e trombas d'água) em Santa Catarina.

A configuração topográfica complexa do Estado de Santa Catarina também parece contribuir para a formação e/ou intensificação da atividade convectiva em virtude da eficiente forçante mecânica para movimento ascendente representada pelas cadeias montanhosas. Costa et al. (2001), no caso da Itália, e Marcelino (2003), no caso de Santa Catarina, constataram que as localizações circundadas por colinas e montanhas parecem ser mais suscetíveis à ocorrência de tempestades severas, simplesmente porque estas são regiões onde atividade convectiva é mais frequente.

3.2 Distribuição espaço-temporal de tornados em Santa Catarina

De acordo com Marcelino (2003) e Marcelino (2005), 45 episódios de tornados, possíveis tornados e trombas d'água foram registrados no território de Santa Catarina no período de 1976 a 2003. Nesse período, esses fenômenos causaram prejuízos da ordem de US\$ 9.300.000. Na Figura 4, a ocorrência de tornados pode ser observada ao longo desses 27 anos. A média anual de ocorrências de tornados para o período apresentado foi de aproximadamente dois episódios.

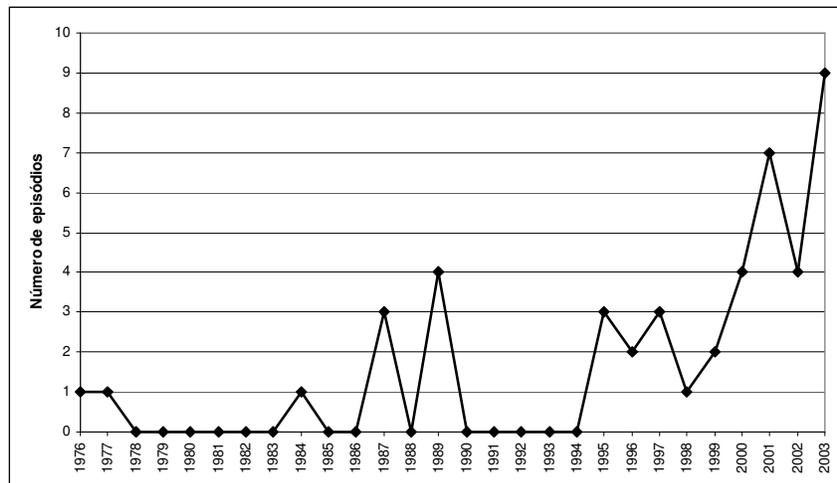


Figura 4 – Frequência anual de tornados em SC no período de 1976 a 2003.

Na Figura 4 verifica-se um aumento progressivo de tornados em Santa Catarina. Isso provavelmente está relacionado com a maior quantidade de dados e informação sobre esses fenômenos nos últimos anos. Desta forma, mesmo nos anos em que houve ausência de tornados, a hipótese de que eles tenham ocorrido não pode ser descartada. A falta de dados e informação sobre tais fenômenos e/ou a baixa intensidade dos danos podem ter contribuído para que não tivesse nenhum registro. Além disso, a grande falta de conhecimento aliada à confusão entre tornados e outros fenômenos fizeram com que muitos eventos de tornados fossem erroneamente registrados como vendavais (Marcelino et al. 2005).

Na Figura 5, pode-se observar a distribuição sazonal da ocorrência de tornado, no qual a estação do verão (janeiro e fevereiro) e da primavera (setembro, outubro e novembro) destacam-se como os períodos do ano mais favoráveis à ocorrência desse fenômeno.

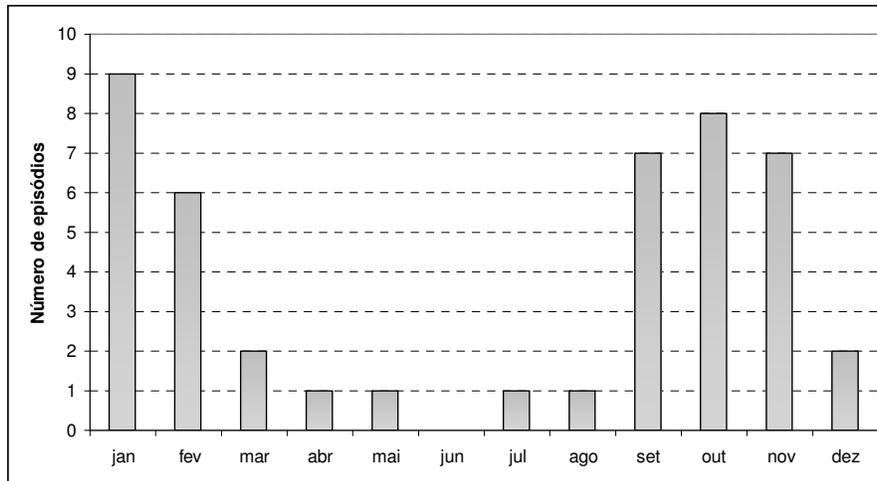


Figura 5 – Distribuição mensal de tornados em SC no período de 1976 a 2003.

O verão em Santa Catarina é caracterizado por temperaturas elevadas e umidade. Um dos sistemas atmosféricos que mais originam fenômenos atmosféricos extremos neste período são sistemas convectivos isolados. Essas tempestades formam-se como resultado do aquecimento da superfície durante o dia, o que causa instabilidades convectivas, geralmente durante o período da tarde. Durante a primavera, outros sistemas atmosféricos contribuem significativamente para a geração de tornados, a exemplo dos sistemas convectivos de mesoescala (CCM) e sistemas frontais transitentes. Os CCMs formam-se na região do Chaco (Paraguai) e quando atravessam o Estado de Santa Catarina causam chuvas intensas, tempestades de granizo, vendavais e tornados (Silva Dias, 1996). Apesar de serem mais intensas e frequentes no inverno, as frentes frias ainda podem surgir com intensidade elevada na primavera. Quando essas frentes frias aparecem, associadas aos CCMs, elas criam situações ainda mais favoráveis a eventos extremos, como tornados (Marcelino, 2003).

A distribuição espacial dos tornados no território de Santa Catarina pode ser observada na Figura 6. Foram registrados tornados nas regiões centrais do Estado, em particular nos municípios de Xanxerê, Florianópolis, Canoinhas, Itapoá, Joinville, Penha, Piçarras, Maravilha, Laguna e Foquilha. Esses municípios apresentaram um grande número de registros do fenômeno aliado a uma maior vulnerabilidade em relação aos demais municípios do Estado, tendo em vista suas densidades demográficas.

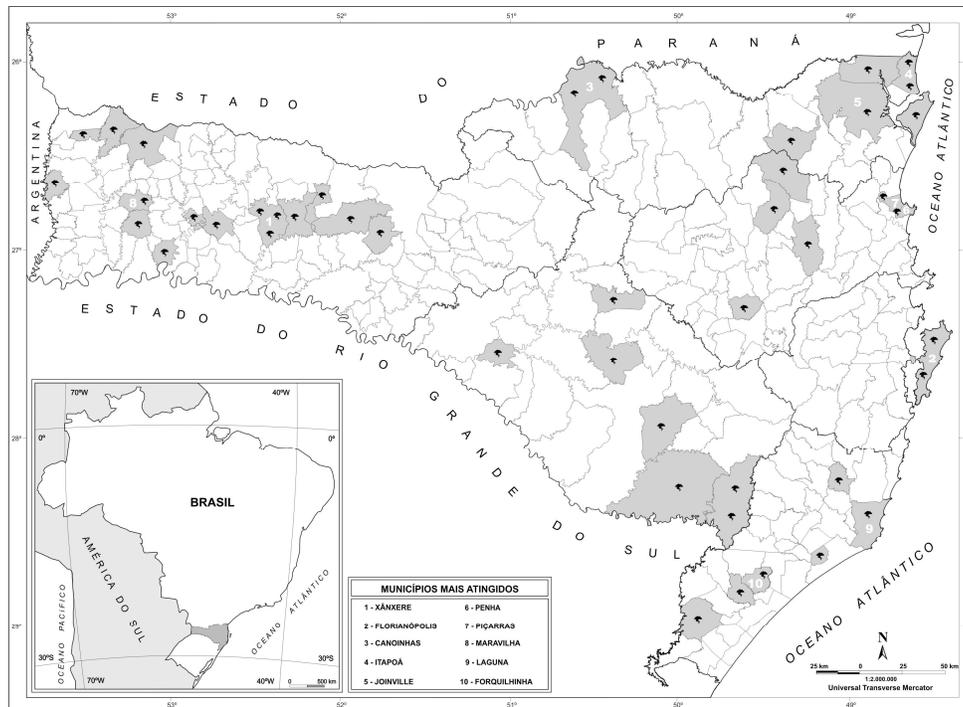


Figura 6 – Distribuição espacial de tornados em SC no período de 1976 a 2003.

3.3 O despreparo da população frente à ocorrência de tornados em Santa Catarina

O despreparo da população para enfrentar os tornados, tanto em Santa Catarina, quanto no território nacional, é notável. Isso se deve, primeiramente, pela falta de conhecimento do fenômeno, visto que ainda existe grande confusão com os vendavais. Conseqüentemente, não conhecendo o fenômeno, as ações preventivas são praticamente inexistentes. Para mostrar tal problemática, apresentam-se algumas denominações dadas aos tornados:

- No município de Maravilha (SC), o tornado ocorrido em outubro de 1984, foi chamado de “furacão” pelo jornal local;
- O tornado em São Joaquim (SC) foi denominado como “vendaval” (erro mais comum);
- O tornado ocorrido no município de Meleiro em fevereiro de 1996 foi chamado pelo Jornal da Manhã e por residentes de “tufão” e “redemoinho de vento”;
- O tornado de Piçarras também foi chamado de “redemoinho de vento” por um residente atingido;
- O tornado ocorrido em Joinville em janeiro de 1999 também foi chamado de “redemoinho de vento”.

Para melhor exemplificar, conforme verificado na Figura 7, o tornado de Forquilhinha ocorrido em novembro de 1999 foi o primeiro episódio com registro fotográfico do funil do tornado. Mesmo assim, esse fenômeno foi considerado pelo jornal A Notícia como sendo um “vendaval”.

<p>Tornado em novembro de 1999 no município de Forquilha, citado corretamente como “tornado” pelo jornal Diário Catarinense, 25/11/99, Florianópolis/SC.</p>	
<p>Tornado em novembro de 1999 no município de Forquilha, reportado erroneamente como “vendaval” pelo jornal A Notícia, 25/11/99, Joinville, Santa Catarina/SC.</p>	

Figura 7 – Diferentes denominações atribuídas aos tornados em SC.

Além da falta de conhecimento por parte da comunidade, um outro fator que contribui para aumentar a vulnerabilidade social é a falta de equipamentos adequados para monitorar e melhor entender a dinâmica dos tornados, tais como radares e estações meteorológicas. Esses equipamentos são fundamentais para realizar os diagnósticos que por sua vez, servem de base para a previsão deste fenômeno. Além disso, a falta de conhecimento da população em saber como agir diante de um episódio de tornado é visível para todo território nacional. O preparo da população como medida preventiva é fundamental para evitar que ocorram vítimas fatais. Os tipos de construções também aumentam a vulnerabilidade das comunidades atingidas, uma vez que residências e edifícios são construídos desconsiderando-se a possibilidade de ocorrência de tornados.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O diagnóstico dos danos ocasionados pelos dois tornados ocorridos no município de Criciúma foi realizado em campo utilizando-se GPS para demarcar a trajetória dos tornados e analisando os tipos de danos ao longo do rastro. A escala utilizada foi a Fujita (1981) que descreve os tipos de danos para cada intensidade relacionada. Apesar de se tratar de uma estimativa da intensidade e restringir-se a uma análise de danos (Doswell e Burgess, 1988), a utilização desse método para classificação dos tornados é utilizada em praticamente todo o globo.

O diagnóstico atmosférico em escala sinótica também foi realizado utilizando-se imagens de satélites e radar meteorológico, dados do modelo de mesoescala Eta/CPTEC apresentados em pontos de grades georreferenciados em 40 km x 40 km de latitude e longitude. Esses dados foram processados no *Grid Analysis and Display System* (GrADS) para vários campos de variáveis meteorológicas fornecendo informações sobre o ambiente atmosférico que favoreceu a formação do tornado.

5. ESTUDO DE CASO: TORNADOS EM CRICIÚMA

No dia 3 de Janeiro de 2005, ocorreram dois tornados no município de Criciúma, localizado no sul do Estado de Santa Catarina (Figura 8). O primeiro atingiu o bairro de Manaus, no centro da cidade. O segundo tornado, que surgiu aproximadamente trinta minutos após a passagem do primeiro, atingiu os bairros de Metropol e Colonial, na área adjacente ao centro de Criciúma.

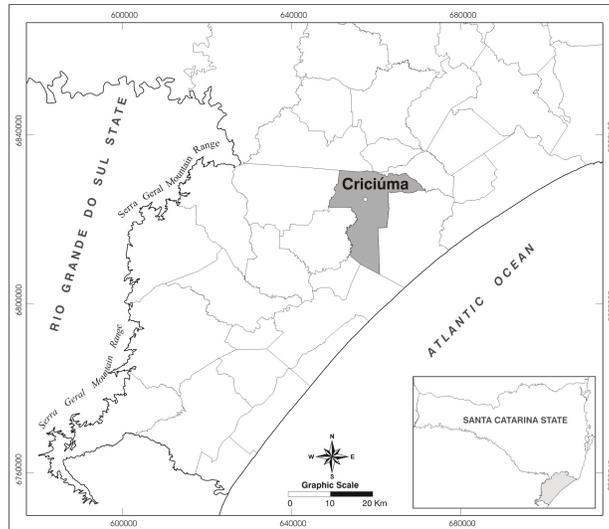


Figura 8 – Localização do município de Criciúma - SC.

A região centro-sul de SC constitui-se de uma planície costeira, próxima às encostas íngremes da Serra Geral, que apresentam altitudes médias de cerca de 1.000 m. A proximidade ao mar (maritimidade), a presença de áreas pantanosas e da Mata Atlântica contribuem para aumentar as taxas de umidade observadas na região. Além disto, a presença da Serra Geral favorece movimentos verticais ascendentes (efeito orográfico), os quais aliados às elevadas taxas de umidade e calor, geram condições propícias à formação de tempestades convectivas locais, associadas ou não a outros sistemas atmosféricos de escala regional, tais como frentes frias.

5.1 Análise sinótica

Nesta seção, será apresentada uma análise meteorológica preliminar dos tornados de 3 de janeiro de 2005, reproduzindo alguns resultados de Nascimento e Marcelino (2005). Esta análise não pretende ser uma descrição exaustiva do ambiente de mesoescala no qual se formaram as tempestades que originaram os tornados, mas fornece uma visão geral das condições sinóticas nas quais as tempestades ocorreram. As áreas de instabilidades que geraram um dos tornados podem ser vista na Figura 9.

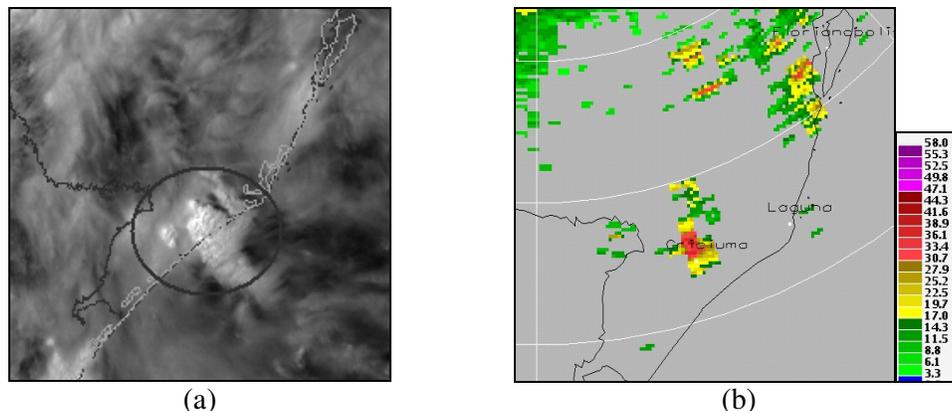


Figura 9 – (a) Imagens do satélite GOES-12, canal visível, dia 03/01/2005 às 17:45 UTC; (b) Imagem PPI do campo de refletividade (dBz) do radar do

SIMEPAR para o dia 03/01/2005 às 17:50 UTC. Fonte: Adaptado de Nascimento e Marcelino (2005).

As condições meteorológicas reinantes durante as horas que antecederam o evento dos tornados e no horário próximo à ocorrência dos mesmos serão examinadas com o auxílio das Figuras 10 e 11, respectivamente. A Figura 10 refere-se à análise do modelo operacional ETA-CPTEC (Seluchi e Chou, 2001) às 12 Z do dia 03/01/2005, enquanto que a Figura 11 mostra a previsão operacional de 6-h deste modelo válida para as 18 Z (exatamente como emitida no dia do evento).

A Figura 10a ilustra as condições atmosféricas em superfície na manhã do dia 03/01/2005. Um sistema de baixa pressão bem definido localizava-se sobre o Paraguai, com um cavado também evidente sobre o litoral do Rio Grande do Sul (RS). Este cavado promoveria chuvas fortes sobre o centro do RS horas mais tarde, chuvas estas que não teriam influência direta sobre o episódio tornádico.

Ventos de quadrante norte prevaleciam sobre todo o sul do Brasil. Sobre o Atlântico Sul estabeleceu-se um gradiente de pressão zonal relativamente forte que favorecia ventos de NE em superfície ao longo do litoral sul brasileiro. Este escoamento contribuiu para uma importante convergência do fluxo de umidade ao longo da costa de SC (Figura 10b) que viria a desempenhar papel relevante para o desenvolvimento da atividade convectiva horas mais tarde. Em 850 hPa os ventos permaneciam de quadrante norte, advectando umidade para as latitudes subtropicais do Brasil (Figura 10c).

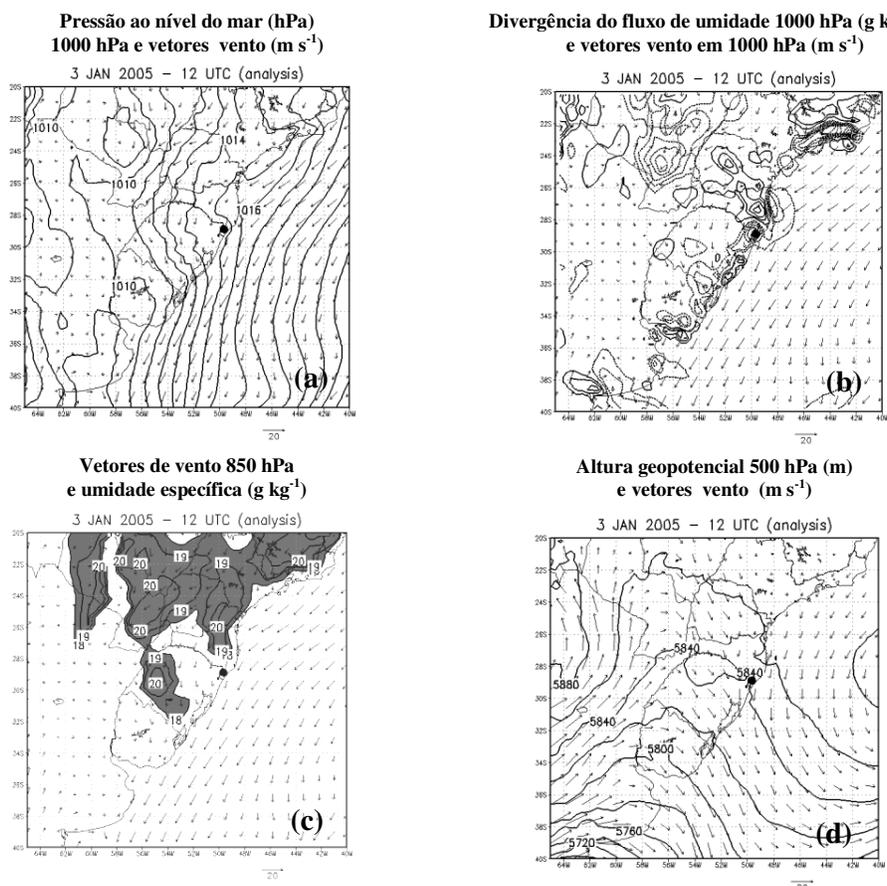


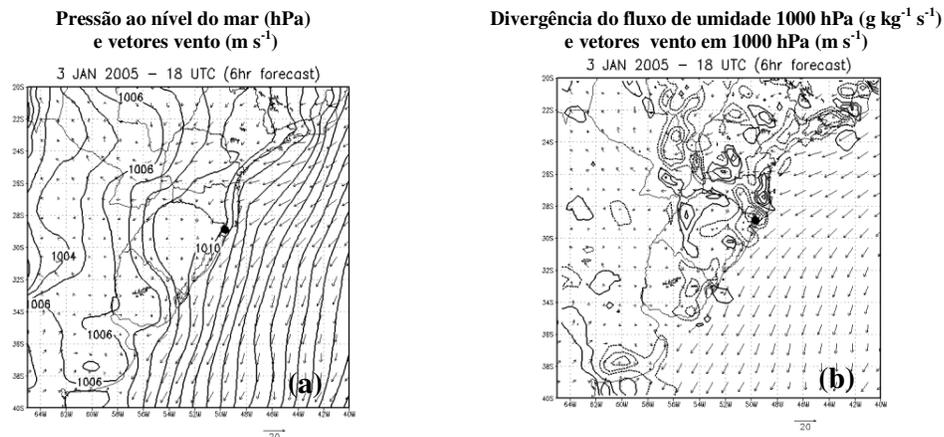
Figura 10 – Análise do modelo Eta/CPTEC válida para as 12 Z do dia 03/01/2005. Vetores representam: ventos a 10 m em (a) e (b), e ventos em 850 hPa e 500hPa em (c)

e (d), respectivamente. Contornos são: (a) pressão ao nível do mar indicada em intervalos de 1 hPa; (b) divergência de umidade em intervalos de $2 \times 10^{-5} \text{ g kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (linhas pontilhadas são valores negativos, com a linha de zero sendo omitida); (c) umidade específica em intervalos de 1 g kg^{-1} (apenas valores acima de 18 g kg^{-1} são mostrados); (d) altura geopotencial em 500 hPa em intervalos de 20 m. Um vetor referência de 20 m s^{-1} é indicado abaixo de cada painel, e o círculo nas figuras indica a localização de Criciúma (adaptado de Nascimento e Marcelino, 2005).

Este foi um dos mecanismos relevantes para a desestabilização da atmosfera no sul do Brasil neste dia. Entretanto, seguindo os critérios de Bonner (1968), um jato de baixos níveis não ficou caracterizado. A circulação ciclônica sobre o Paraguai era identificável também em 850 hPa.

Em níveis médios (Figura 10d), um cavado migratório bem definido deslocava-se sobre a região sul do Brasil, favorecendo a queda de pressão em superfície que induzia os ventos de NE sobre o litoral sul. A presença deste sistema sinótico contribuiu para o estabelecimento de um ambiente atmosférico propício ao desenvolvimento de tempestades a sua vanguarda, uma vez que favoreceu (como esperado) a formação de correntes verticais ascendentes em escala sinótica (não mostrado). Este é um mecanismo eficiente de desestabilização atmosférica com algumas implicações importantes para a formação de tempestades severas (p. ex., Doswell e Bosart, 2001). Além disto, comparando-se as Figuras 6a e 6d, percebe-se a existência de um importante cisalhamento direcional do vento na vertical sobre o litoral do RS. Em níveis altos, o cavado também estava bem definido (não mostrado), sendo acompanhado de um núcleo de jato (*jet streak*) posicionado sobre o RS. Forte divergência era evidente na entrada equatorial deste padrão sobre o extremo oeste catarinense. O campo de energia potencial convectiva disponível (*convective available potential energy*, CAPE) analisado pelo modelo (não mostrado) indicava valores mais altos (acima de 1000 J kg^{-1}) para a Argentina e RS, sem valores significativos sobre SC naquele horário.

A Figura 11 mostra a previsão de 6-hr do modelo Eta/CPTEC, válida para um horário próximo ao da ocorrência dos tornados em SC. Por se tratar de uma previsão, estes campos são examinados de forma qualitativa. É importante mencionar que a previsão do Eta/CPTEC válida para as 18 Z de 03/01/2005, apesar de prever corretamente a ocorrência de precipitação sobre a região central do RS, não previu a formação de tempestades isoladas sobre o extremo sul catarinense.



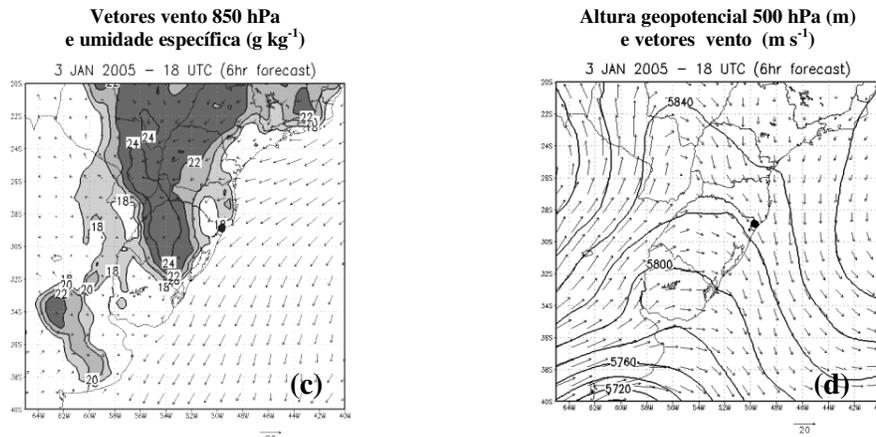


Figura 11 – Igual à Figura 10, porém representando o prognóstico numérico válido para as 18 Z. No painel (c), o intervalo do contorno é de 2 g kg^{-1} (adaptado de Nascimento e Marcelino 2005).

Em resposta ao avanço do cavado em níveis médios, o gradiente de pressão em superfície previsto para o período da tarde intensificou-se sobre o Atlântico Sul (Figura 11a). Isto não apenas induziu ventos mais intensos em superfície como também favoreceu um giro do vento no sentido horário no litoral de SC em relação àquele analisado às 12 Z (comparar com Figura 10a). Dados de METAR de Florianópolis confirmaram esta previsão para a direção do vento, com ventos gradualmente virando de E-NE às 13 Z para de E às 16 Z. Mais adiante veremos que esta evolução em escala sinótica pode ter contribuído para a formação das tempestades tornádicas. O campo previsto de divergência do fluxo de umidade (Figura 11b), por sua vez, mostrou valores substancialmente negativos (i.e., intensa convergência) sobre Criciúma, sugerindo a existência de uma importante forçante de superfície para a iniciação das tempestades.

Em 850 hPa (Figura 11c) o escoamento previsto permaneceu de quadrante norte, mantendo a advecção de umidade em baixos níveis. A umidade específica prevista atingiu 22 g kg^{-1} sobre o RS. Sobre SC o modelo mostrou valores mais modestos de umidade, especialmente sobre terreno elevado (Figura 11c). Entretanto, Criciúma localiza-se a apenas 46 m acima do nível do mar, de modo que a atmosfera no local poderia estar mais úmida do que o previsto pelo modelo para a região serrana. De fato, o METAR de Florianópolis reportou temperatura do ponto de orvalho (Td) de 24° C naquela tarde. Por outro lado, é interessante notar que o funil de condensação do primeiro tornado não tocou o solo, apesar de sua circulação ter atingido a superfície (caracterizando um tornado). Esta característica indica que a camada sub-nuvem não estava suficientemente úmida para que a condensação do vórtice tornádico tocasse efetivamente o solo.

O escoamento previsto em 500 hPa (Figura 11d) mostrava o avanço gradual do cavado de níveis médios, com tendência negativa do geopotencial sobre o sul do Brasil em relação às 12 Z. Os ventos em níveis médios não eram particularmente intensos sobre o sul brasileiro, com valores previstos atingindo apenas 12 m s^{-1} ao longo da costa norte do RS, enquanto que em ambientes típicos de supercélulas (em latitudes médias) velocidades do vento de pelo menos $15\text{-}20 \text{ m s}^{-1}$ em 500 hPa são geralmente observados (ver Nascimento, 2005).

Por outro lado, é importante ressaltar que o cisalhamento vertical do vento sobre o sul de SC intensificou-se em relação às 12 Z. Para ilustrar isto, analisamos a Figura 12 que compara diversas hodógrafas geradas a partir das saídas do modelo. Primeiramente,

nota-se que todas as hodógrafas previstas para as 18 Z (Figuras 12c,d) são mais longas do que as correspondentes analisadas às 12 Z (Figuras 12a,b), indicando o aumento do cisalhamento vertical do vento previsto para o período da tarde. Comparando-se as Figuras 12a,c [Figuras 12b,d] nota-se que o aumento do cisalhamento previsto foi mais acentuado em baixos níveis. Este aumento tornou-se monotonicamente mais intenso à medida que amostramos pontos de grade localizados gradualmente mais para leste [mais para sul], caracterizando bem a intensificação do escoamento de quadrante NE em baixos níveis, mencionado anteriormente. A previsão do aumento do cisalhamento vertical do vento, especialmente em baixos níveis, sugere que tempestades convectivas formando-se nestas condições encontrariam condições cinemáticas mais propícias para interagirem com vórtices horizontais induzidos pelo escoamento ambiental (Nascimento, 2005) e, portanto, podendo gerar intensas circulações em escala de nuvem. Um resultado interessante envolve o deslocamento de NE para SO do primeiro tornado.

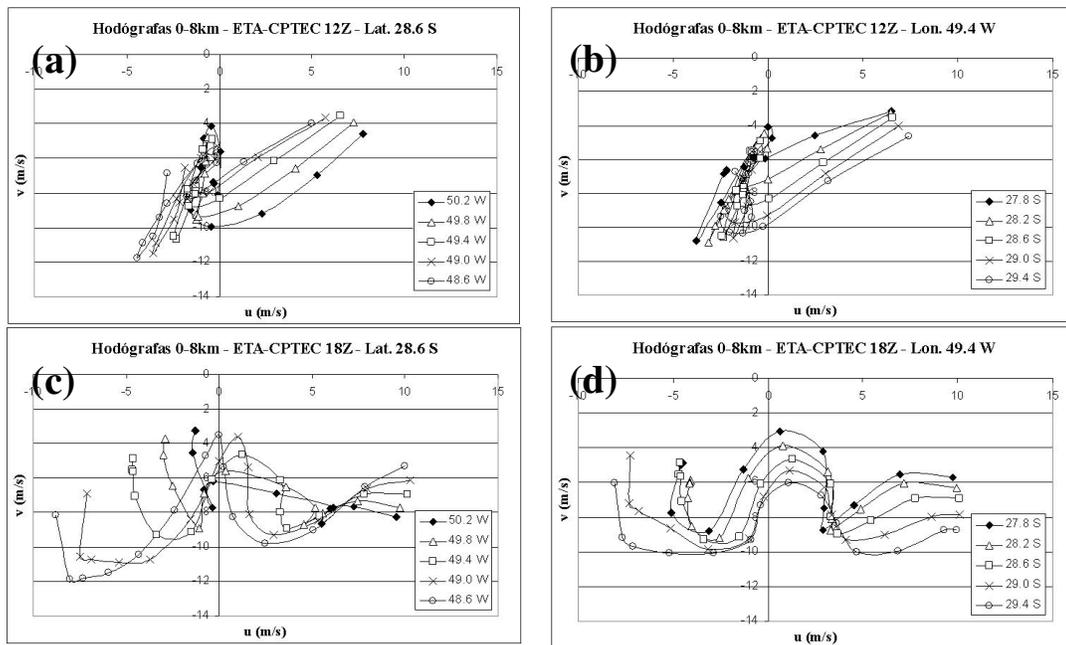


Figura 12 – Hodógrafas na camada 0-8 Km obtidas a partir do modelo Eta/CPTEC para diversos pontos de grade em torno da cidade de Criciúma/SC para o dia 03/01/2005. O ponto de grade representativo de Criciúma é $28,6^{\circ}$ S e $49,4^{\circ}$ W. Os dois gráficos da esquerda [direita] mostram hodógrafas em cinco pontos de grade zonalmente [meridionalmente] adjacentes, tendo Criciúma ($28,6^{\circ}$ S; $49,4^{\circ}$ W) ao centro. A distância entre cada ponto de grade adjacente é de $0,4^{\circ}$. Todas as hodógrafas acima iniciam-se em suas extremidades à esquerda, e evoluem ao longo dos níveis de 1000, 925, 900, 850, 800, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400 e 350 hPa. Painéis (a) e (b) referem-se à análise das 12 Z do Eta/CPTEC, e painéis (c) e (d) mostram as hodógrafas previstas (em modo operacional) pelo Eta/CPTEC às 18 Z. (Adaptado de Nascimento e Marcelino, 2005).

Note que todas as hodógrafas previstas para Criciúma e arredores (Figuras 12c,d) apresentavam ventos de NE para SO em baixos níveis, o que pode ter desempenhado um papel importante no deslocamento da circulação tornádica neste mesmo sentido,

especialmente em um ambiente com cisalhamento relativamente fraco em níveis médios.

Este resultado motivou Nascimento e Marcelino (2005) a realizarem uma simulação numérica em escala convectiva de uma tempestade idealizada com o modelo *Advanced Regional Prediction System* (ARPS) em um ambiente horizontalmente homogêneo, utilizando-se, como “sondagem ambiental”, o perfil atmosférico previsto pelo Eta/CPTEC sobre Criciúma. Os resultados (Nascimento e Marcelino, 2005) mostram o desenvolvimento de uma tempestade de curta duração (menor que 1h) com sua estrutura de baixos níveis deslocando-se de NE para SO. Este resultado fornece informação relevante para entender, ao menos em parte, o deslocamento do primeiro tornado. O deslocamento de SE para NO do segundo tornado, entretanto, não é facilmente explicado pela análise das hodógrafas e merece análise mais detalhada em trabalhos futuros. Outro ponto importante da simulação mencionada acima foi a obtenção de uma tempestade de curta duração, o que representa indício adicional de que o ambiente sinótico na tarde de 3 de janeiro de 2005 não era particularmente favorável para o desenvolvimento de tempestades tipo supercélulas. Este resultado parece ser consistente com a análise anterior realizada com os dados de radar e satélite.

Em níveis altos (campos não mostrados), o cavado mantinha-se bem definido sobre o sul do Brasil com ventos sendo previstos a atingir 20 m s^{-1} sobre o leste catarinense. Para o extremo sul de SC a previsão indicava uma região de fraca convergência em 200 hPa, sendo ligeiramente desfavorável à formação de tempestades intensas. Análises futuras abordarão o papel desempenhado pelo escoamento em altos níveis na evolução do sistema convectivo de Criciúma. Em termos de instabilidade convectiva, o Eta/CPTEC previa um aumento da CAPE sobre o litoral de SC em relação à análise das 12 Z, com um núcleo de valores moderados de CAPE (acima de 1000 J kg^{-1}) exatamente sobre a região de Criciúma (não mostrado). Assim sendo, o modelo capturou a tendência geral de desestabilização da atmosfera no período da tarde. É possível ainda que o Eta/CPTEC esteja subestimando os valores de CAPE já que os valores de Td observados no litoral de SC estiveram acima do previsto. Comparação com outros modelos operacionais e simulações de estudo de caso são necessárias para se avaliar melhor o campo da CAPE para este evento.

5.2 Descrição e classificação dos tornados

De acordo com as observações e dados de campo coletados pelos técnicos do Grupo de Estudos de Desastres Naturais (GEDN) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), o primeiro tornado teve início aproximadamente às 14:40 h no *campus* da Universidade Estadual de Santa Catarina (UNESC), com intensidade F0. Em seguida, ele se deslocou para NE-SO na direção do bairro de Vila Manaus, atingindo a intensidade F1. Na chegada a este bairro, ele se intensificou para F2. Neste momento, ocorreram danos mais severos, o que durou cerca de sete minutos. A seguir, o tornado regressou para as intensidades F1 e F0, dissipando-se por volta de 15:10 h.

Com base na análise do rastro, este tornado não tocou o solo continuamente. No entanto, quando o funil de vento não tocava o solo, ele permanecia a apenas alguns metros da superfície (10 m -15 m) destruindo violentamente o telhado de inúmeras casas (efeito de sucção). Segundo estas características, o tornado foi classificado como de intensidade F2 (Figura 13).



(a)



(b)

Figura 13 – Danos ocasionados pelo tornado F2 ocorrido no município de Criciúma em janeiro de 2005: (a) casa de madeira com o telhado seriamente destruído; (b) casa de tijolos totalmente destruída.

Com relação aos danos produzidos, o primeiro tornado causou a destruição de telhados, destruição total e parcial de casas e galpões; casas de madeira foram erguidas e deslocadas pela ação dos ventos (saindo de suas fundações); telhados foram lançados a dezenas de metros; muitos projéteis foram lançados a até 150 m aproximadamente. Esses projéteis foram encontrados cravados em troncos de árvore e no solo; árvores com raízes foram arrancadas e arremessadas a até 50 m de distância, assim como várias delas foram tombadas, retorcidas e quebradas; várias pessoas ficaram feridas principalmente devido aos projéteis e materiais em suspensão (telhas e pedaços de madeira) e houve uma morte. No bairro de Vila Manaus, quatro casas foram totalmente destruídas, 40 parcialmente destruídas e 30 danificadas, principalmente com avarias nos telhados.

O segundo tornado teve início por volta de 15:30 h, próximo ao rio Maina, com intensidade F0, deslocando-se na direção SE-NO. Ao alcançar o bairro de Metropol, ele se intensificou para F1, causando mais danos severos. A partir daí, ele se deslocou na direção do bairro Colonial como um F1, retornando para F0 próximo à colina circunvizinha a este bairro. Este tornado se dissipou às 15:45 h. Assim como no primeiro caso, este tornado não tocou o chão continuamente. Este tornado foi classificado com intensidade F1.

Os danos ocasionados pelo segundo tornado ficaram concentrados nos bairros Metropol e Colonial, nos quais os telhados foram total ou parcialmente destruídos e houve destruição parcial de edificações e de estruturas mais frágeis como garagens, barracos e currais; várias árvores (sobretudo eucaliptos) acabaram destruídas e retorcidas, muitas das quais foram tombadas e tiveram seus galhos quebrados. Um carro foi lançado para fora da pista, atingindo um muro. Muitos projéteis foram arremessados a longas distâncias, ferindo moradores e alguns animais desapareceram.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de geotecnologias para estudos de tornados tem sido amplamente utilizado tanto na previsão de tempo quanto na avaliação de impactos e análise de risco. Apesar do estudo de caso apresentado não ter utilizado todas as ferramentas possíveis para análise de tornados, a tendência para análise de eventos futuros é utilizar cada vez mais a geoinformação. Dessa forma, acredita-se que a vulnerabilidade poderá ser amplamente reduzida à medida que se incorporar cada vez mais tais ferramentas na prevenção.

A documentação e análise histórica de ocorrências de tornados em uma determinada região é o passo inicial para a compreensão do comportamento espaço-temporal desses fenômenos. Aliado a isso, o estudo dos ambientes atmosféricos que desencadeiam esses fenômenos também conduzem ao avanço das previsões, podendo assim, fornecer informações apropriadas para a emissão de alertas. Com base no estudo de caso apresentado, verifica-se que as condições atmosféricas que ocasionaram os tornados em Criciúma não seguiram o padrão clássico do ambiente atmosférico típico para ocorrências de tornados em latitudes médias. Assim, torna-se ainda mais necessário determinar o padrão atmosférico que geram tornados no Sul do Brasil.

É válido salientar que o entendimento das circunstâncias ambientais nas quais se desenvolvem os tornados também é importante para o prognóstico dos mesmos, para a verificação de indícios de mudanças climáticas e para o planejamento de medidas mitigadoras em desastres naturais.

Considerando-se que nenhuma medida está completa sem a participação das comunidades freqüentemente atingidas, é necessária a realização de campanhas de esclarecimentos e conscientização social. Pois, a comunidade preparada é a que sabe enfrentar e resistir aos desastres naturais.

6. REFERÊNCIAS

Berri, G. J.; Inzunza, B. J. The effect of the low-level jet on the poleward water vapor transport in the central region of South America. *Atmos. Environ.*, v. 27A, p. 335-341, 1993.

Brooks, E. H.; Lee, W. J.; Craven, J. P. The spatial distribution of severe thunderstorm e tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*, v. 67-68, p. 73-94, 2003.

Costa, S.; Mezzasalma, P.; Levizzanu, V.; Alberoni, P.P.; Nanni, S. Deep convection over Northern Italy: synoptic e thermodynamic analysis. *Atmospheric Research*, v. 56, p. 73-88, 2001.

Cross, J. A. Megacities e small towns: different perspectives on hazard vulnerability. *Environmental Hazards*, 3, p. 63-80, 2001.

Doswell III, C. A.; Bosart, L. F. Extratropical synoptic-scale processes e severe convection. In: Doswell III, C. A. (Ed.) *Severe Convective Storm*. Cap. 2. A Meteorological Monograph: American Meteorological Society. Submitted: May 2000. Disponível em: <www.cimms.ou.edu/~doswell/Monograph/Synoptics.html>. Acesso em: 15 jan. 2003.

Doswell III, C. A.; Burgess, D. W. On Some Issues of United States Tornado Climatology. *Monthly Weather Review*. v. 116, 1988, p. 495-501.

Doswell, C. A. *What is a tornado?* Norman: NOAA/ERL/National Severe Storms Laboratory, Oct. 2001. Disponível em: <http://www.cimms.ou.edu/~doswell/a_tornado/atornado.html>. Acesso em: 10 jan. 2003.

Doswell, C. A., 1991: A review for forecasters on the application of hodographs to forecasting severe thunderstorms. *Nat. Wea. Dig.*, 16, p. 2-16.

Doswell, C. A., Bosart, L. F., 2001: Extratropical synoptic-scale processes e severe convection. *Severe Convective Storms*, C. A. Doswell III (Ed.), AMS Meteor. Monograph, 28 (50), p. 27-69.

Dyer, R. A. A review of tornado activity in Brazil. In: *Anais International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*. Rio de Janeiro: INPE, v. 30 part 7a, 1994, p.203-213.

- Dyer, R. A. Remote Sensing Identification of tornado tracks in Argentina, Brazil and Paraguay. In: *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*. v. LIV, n. 10, 1988, p.1429-1435.
- FEMA - Federal Emergency Management Agency. *Mitigation Case Studies: safe rooms save lives*. 2003, 17 pp.
- Fujita, T. T. Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. In: *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, n. 8, 1981.
- Fujita, T. T. Tornadoes e downbursts in the context of generalized planetary scales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 38, n. 8, p. 1511-1524, 1981.
- Held, G., Gomes, A. M., Naccarato, K. P., Pinto Jr., O., Nascimento, E. L., Antonio, C. A. and Marcelino, I. P. V. O., 2005: Analysis of Tornado Characteristics in the State of São Paulo for the Improvement of an Automatic Alert System. In: *32nd Radar Meteorology Conference*, Albuquerque, New Mexico, 24-29 October 2005b (aceito para publicação).
- Held, G., Gomes, A. M., Nascimento, E., Pinto Jr., O., Naccarato, K. P., Antonio, C. A. and Porto Da Silva A. B. Tornado Signatures for Nowcasting Using Radar and Lightning Observations in Brazil. *Geophysical Research Abstracts*, Volume 7, CD ROM, EGU General Assembly 2005a, Vienna, Austria, 24-29 April 2005a, 6pp.
- Held, G., Gomes, A. M., Pinto Jr., O., Antonio, C. A. A. and Porto da Silva, A.B., 2004: The Palmital Tornado: Lightning and Radar Observations. *Proceedings, International Conference on Grounding and Earthing (GROUND'2004) & 1st International Conference on Lightning Physics and Effects*, Belo Horizonte, Brazil, 7-11 November 2004, 23-28.
- Herrmann, M. L. de P. *Levantamentos dos desastres naturais ocorridos em Santa Catarina no período de 1980 a 2000*. Florianópolis: IOESC, 2001, 89 p.
- Johnson, R.H., e B.E. Mapes, 2001: Mesoscale processes e severe convective weather. In: Doswell III, C. A. (Ed.) *Severe Convective Storm*. Cap. 4. A Meteorological Monograph: American Meteorological Society. Submitted: May 2000. Disponível em: <www.cimms.ou.edu/~doswell/Monograph/Synoptics.html>. Acesso em: 15 jan. 2003.
- Lillesand, T.; Podger, N.; Chipman, J.; Goldmann, R.; Lewelling, K.; Olsen, T. Assessing Tornado Damage via Analysis of Multi-temporal Landsat 7 ETM+ Data. In: Annual Conference of the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), Washington, D.C., April 21-27, 2002.
- Marcelino, I. P. V. O. *Análise de episódios de tornados em Santa Catarina: caracterização sinótica e mineração de dados*. São José dos Campos. 220 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2003.
- Marcelino, I. P. V. O. Tornados. In: Santa Catarina. Secretaria de Segurança Pública. *Atlas dos desastres naturais de Santa Catarina*. Florianópolis: Imprensa Oficial, 2005. (No prelo).
- Marcelino, I. P. V. O.; Conforte, J. C. Uso de sensoriamento remoto para análise de tornados no Brasil: episódio de Abdon Batista/SC. In: Dias, N. W.; Batista, G.; Mausel, P. W.; Novo, E. M. L.; Skelton, D. L.; Krug, T. (Eds.) *Sensoriamento Remoto: Aplicações para a preservação, conservação e desenvolvimento sustentável da Amazônia*. São José dos Campos: INPE/NASA/ Indiana State University, 2003. (CD Room).
- Marcelino, I. P. V. O.; Herrmann, M. L. P; Ferreira, N. J. The occurrence of tornadoes in Santa Catarina State, Brazil. *Australian Meteorological Magazine*, 2005. No prelo.

Mills, G; Colquhoun, J. Objective prediction of severe thunderstorm environments: preliminary results linking a decision tree with an operational regional NWP Model. *Weather e Forecasting*, v. 13, n. 4, p. 1078–1092, 1998.

Monteiro, M. A. Caracterização climática do Estado de Santa Catarina: uma abordagem dos principais sistemas atmosféricos que atuam durante o ano. *Geosul*, v. 16, p. 69-78, jan./jun. 2001.

Nascimento, E. L. and Marcelino, I.P.V.O., 2005: A multiple-vortex tornado in Brazil. Submitted to *Mon. Wea. Rev.*

Nascimento, E. L. Identifying severe thunderstorm environments in southern Brazil: analysis of severe weather parameters. In: 22nd *Conference on Severe Local Storms*, Hyannis, EUA, Amer. Meteor. Soc., em mídia digital, 2004. (Disponível em [//ams.confex.com/mas/11aram22sls/techprogram/paper_81745.htm](http://ams.confex.com/mas/11aram22sls/techprogram/paper_81745.htm))

Nascimento, E. L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Rev. Bras. Meteor.*, 20, p. 121-140, 2005.

Rae, S.; Stefkovich, J.; Woodall, G; O'Neal, B.; Gardiner, R.; Tidwell, J. *Data Analysis and Geographic Information System Data Compilation*. Service for the National Weather Service/Emergency Management Community. 2000, 21 pp.

Seluchi, M. E., Saulo, A. C., Nicolini, M., Satyamurty, P., 2003: The Northwestern Argentinean Low: a study of two typical events. *Mon. Wea. Rev.*, 131, p. 2361-2378.

Seluchi, M. E.; Chou, S. C. Evaluation of two Eta model versions for weather forecast over South America. *Geophys. Int.*, 40, p.219-237, 2001.

Silva Dias, M. A. F. Complexos convectivos de mesoescala. *Climanálise*, Cachoeira Paulista: MCT/INPE/CPTEC, p.173-182, 1996. Edição especial.

Uccellini, L. W.; Johnson, D. R. The coupling of upper e lower tropospheric jet streaks e implications for the development of severe convective storms. *Monthly Weather Review*, v. 107, n. 7, p. 682-703, June 1979.

UNDP – United Nations Development Programme. *Reducing Disaster Risk: a challenge for development*. New York: UNDP, 2004. 129 p.

Yuan M.; Dickens-Micozzi, M.; Magsig, M. A. Analysis of Tornado Damage Tracks from the 3 May Tornado Outbreak Using Multispectral Satellite Imagery. *Weather and Forecasting*. v. 17, 2002, p. 382 – 398.

5.1 “PERSPECTIVA HISTÓRICA DE MODELOS DE DINÂMICAS URBANAS E REGIONAIS”

Cláudia Maria de Almeida, Antonio Miguel Vieira Monteiro, Gilberto Camara

5.1.1 Introdução

Desafios no sentido de se apreender e simular fenômenos dinâmicos no ambiente computacional aguçaram a engenhosidade humana desde os primórdios dos computadores pessoais (“*Personal Computers – PCs*”), no final da década de 50 e início de 60. Particularmente em relação a processos de dinâmicas urbanas e regionais, isto não foi diferente, uma vez que modelos pioneiros para a simulação de alocação de atividades residenciais foram concebidos e implementados ainda do final da década de 50, a exemplo do modelo “Penn-Jersey” proposto por HERBERT e STEVENS (1960).

Muito embora esses modelos propunham-se a capturar a natureza essencialmente dinâmica inerente a processos de conversão do uso do solo urbano e regional, eles fracassaram neste propósito, sobretudo nas primeiras gerações, por não estarem dotados de uma estrutura conceitual propriamente dinâmica, com adequado tratamento das componentes temporal e espacial. Os modelos das recentes gerações esforçam-se por superar estas limitações, como será mostrado ao longo deste capítulo. No entanto, raríssimos são os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) que incorporam módulos para a modelagem dinâmica. Em que pese os avanços nas geotecnologias voltados à manipulação e representação de fenômenos dinâmicos, o seu corrente estágio tecnológico ainda enfatiza a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática (Câmara et al., 2003).

Assim sendo, “uma compreensão mais profunda sobre fenômenos naturais de dimensões espaço-temporais, com fins a representá-los sob a forma de modelos espaciais dinâmicos, constituem-se em uma das mais instigantes, senão mais férteis, e promissoras agendas de pesquisa no atual estado da arte de Geoinformação” (Almeida et al, 2005).

Antes de se introduzir uma perspectiva histórica sumária sobre modelos de dinâmicas urbanas e regionais, em outras palavras, modelos que tratam de mudanças do uso do solo urbano e regional, é necessário esclarecerem-se os termos a eles relacionados. Várias são as

definições para os termos solo (terra), uso do solo e mudanças de uso do solo, os quais variam com a finalidade de aplicação e o contexto de seu emprego (Briassoulis, 2000).

WOLMAN (1987) cita a definição de terra de STEWART (1968) no âmbito das ciências naturais: “o termo terra é usado em um sentido compreensivo, integrador ... para se referir a um vasto espectro de atributos de recursos naturais em um perfil que vai desde a atmosfera até alguns metros abaixo da superfície terrena. Os principais atributos são clima, relevo, solo, vegetação, fauna e recursos hídricos.”

Em uma abordagem mais econômica, HOOVER e GIARRATANI (1984) afirmam que terra “a princípio, denota espaço ... As qualidades da terra incluem, adicionalmente, atributos como propriedades topográficas, estruturais, agrícolas e minerais do sítio; o clima; a disponibilidade de ar e água; e finalmente, uma gama de características ambientais subliminares tais como tranqüilidade, privacidade, aparência estética, e outras.”

Uso do solo, à sua vez, denota a destinação que o Homem dá à terra (Turner e Meyer, 1994). SKOLE (1994) afirma que “uso do solo é o emprego humano de uma certa cobertura da terra, o meio pelo qual a atividade humana apropria-se dos resultados da produção primária líquida (“Net Primary Production” - NPP) conforme determinado por um complexo de fatores sócio-econômicos.” Finalmente, FAO/IIASA (1993) afirmam que “uso do solo diz respeito à finalidade para a qual a terra é usada pela população humana local e pode ser definida como as atividades humanas que estão diretamente relacionadas à terra, fazendo uso de seus recursos ou tendo um impacto sobre eles.”

Para BRIASSOULIS (2000), mudança de uso do solo “... significa transformações quantitativas na área (aumento ou diminuição) de um dado tipo de uso do solo....”. Segundo JONES e CLARK (1997), ela pode envolver a) conversão de um uso em outro, ou b) modificação de um certo tipo de uso, tais como mudanças de áreas residenciais de alto para baixo padrão (sem alteração física ou quantitativa dos edifícios), etc.

Em relação ao termo “modelo”, pode-se entendê-lo como a representação de um sistema, obtida através de diferentes linguagens: matemática, lógica, física, icônica, gráfica, etc., e segundo uma ou mais teorias (Novaes, 1981).

Um sistema é um conjunto de partes, apresentando interdependência entre seus componentes e atributos (Chadwick, 1973). Teoria, por sua vez, pode ser definida como um conjunto de afirmações interconexas que, através de construções lógicas, fornece uma explicação de um processo, comportamento, ou outro fenômeno de interesse, conforme existente na realidade (Chapin e Kaiser, 1979; Johnston et al. 1994).

De acordo com BATTY (1976), o conceito de ciência proposto por Popper como sendo “um processo de conjectura e refutação de problemas, seguido por tentativas de solução, eliminação de erros e redefinição de problemas (Popper, 1972)” reflete-se no desenvolvimento de teorias e modelos urbanos e regionais.

De modo geral, os modelos podem ser basicamente classificados de acordo com as seguintes tipologias (Echenique, 1968; Novaes, 1981):

- *modelo descritivo*: objetiva apenas o entendimento do funcionamento de um sistema;

- *modelo exploratório*: é um modelo descritivo que envolve a análise paramétrica de vários estados, por meio de variações nos elementos dos sistemas e nos seus relacionamentos, sem interferência externa sobre ele. Esses tipos de modelos destinam-se a responder perguntas do tipo “*what if*”;

- *modelo preditivo*: é um modelo exploratório que envolve a variável tempo, compreendendo a projeção de alguns elementos básicos;

- *modelo operacional*: possibilita a interferência do modelador, o qual pode introduzir fatores exógenos nos componentes do sistema e nos seus relacionamentos, de modo a alterar o seu comportamento¹.

Categorizações mais detalhadas de modelos de uso do solo urbano são propostas por inúmeros outros autores. MERLIN (1973), por exemplo, divide modelos urbanos em três categorias – desenvolvimento urbano, transporte, e recursos urbanos - subdividindo cada uma dessas três categorias de acordo com seus objetivos e métodos.

¹ Uma ramificação de modelos operacionais diz respeito a modelos prescritivos ou normativos, os quais procuram modificar o sistema em análise, de forma a se atingir um estado ótimo.

Modelos explanatórios, descritivos e estocásticos integram a primeira categoria; modelos econômicos de escolha de meios de transporte e de deslocamentos geográficos (incluindo modelos gravitacionais) constituem a segunda categoria; e finalmente, modelos de investigação geográfica (incluindo modelos de lugar central), econométricos e estatísticos são abordados na categoria de modelos de recursos urbanos.

PERRATON e BAXTER (1974) e NOVAES (1981) classificam modelos urbanos e regionais genéricos em modelos empíricos, microeconômicos ou comportamentais, macroeconômicos ou da física social, e modelos de simulação dinâmica.

A mais extensiva categorização de modelos genéricos de mudanças de uso do solo é apresentada por BRIASSOULIS (2000). Segundo ela, os modelos podem ser classificados em vista de seus aspectos metodológicos e funcionais em estatísticos ou econométricos; modelos de interação espacial; modelos de otimização (que incluem programação linear, dinâmica, hierárquica e não-linear assim como modelos de maximização de utilidades e modelos multi-critérios de tomada de decisão); modelos integrados (modelos de gravidade, de simulação e de entrada-saída); modelos baseados em ciências naturais; modelos baseados em GIS e modelos baseados na cadeia de Markov.

A classificação de modelos de mudanças do uso do solo urbano (e regional) aqui proposta enfoca aspectos conceituais e operacionais básicos dos mesmos, como a sua habilidade em apreender e lidar com representações de eventos espaço-temporais, observando uma seqüência cronológica em relação ao seu aparecimento.

5.1.2 Modelos Não-Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano e Regional

Modelos teóricos e matemáticos têm sido há tempos criados para fins de estudos urbanos, visando esclarecer processos de mudanças urbanas e regionais. Uma das mais antigas contribuições neste sentido é a teoria de anéis concêntricos de Von Thünen, de 1826 (Merlin, 1973). Von Thünen abordou, de fato, questões de localização agrícola, mas o uso urbano foi decisivo para o seu problema. Ele concebeu um modelo econômico muito simples, consistindo de uma cidade e regiões concêntricas à mesma. De acordo com este modelo, a partir de uma certa distância do centro, uma dada cultura irá suplantá-las;

em uma segunda área, uma outra cultura irá prevalecer sobre as restantes, e assim por diante. Neste caso, o uso mais intenso da terra será próximo ao centro, e o preço do aluguel e da terra decresce na periferia (Perraton e Baxter, 1974).

Uma outra abordagem semelhante em teoria econômica é o modelo de localização industrial desenvolvido por Weber em 1909. Ele se propôs a explicar a localização de uma indústria em um plano simples e homogêneo. A localização final será no ponto onde os custos de transporte da matéria-prima até a indústria e de entrega dos produtos finais no mercado sejam mínimos (Merlin, 1973; Perraton e Baxter, 1974). Isto foi chamado de triângulo clássico de Weber (FIGURA 5.1).

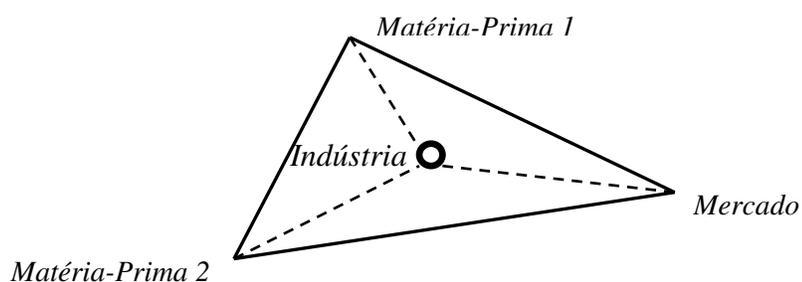


FIGURA 5.1 – Triângulo clássico de Weber para a localização industrial.

FONTE: Perraton e Baxter (1974, p. 36).

Uma outra realização baseada em teoria econômica foi o modelo de lugares centrais de Christaller, de 1933 (Merlin, 1973). Segundo ele, cidades são lugares centrais hierarquicamente organizados, cujo papel fundamental é a provisão de bens e serviços. Sua idéia básica era de que cada ponto no espaço deve distar menos de uma hora (cerca de 4 km) de um lugar central. Este pretexto o levou, por meio de triângulos equiláteros, a organizar o espaço regional em estruturas hexagonais regulares (FIGURA 5.2), as quais refletem a área de influência de cada lugar, i.e., seu raio de ação.

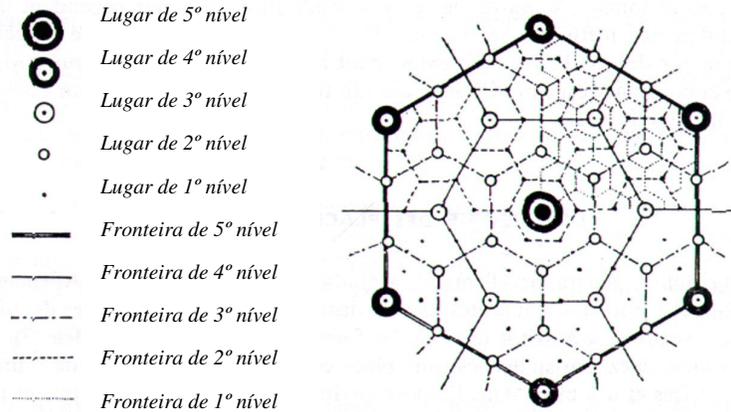


FIGURA 5.2 – Sistema hexagonal da teoria de lugares centrais de Christaller.
 FONTE: Merlin (1973, p.152).

Lösch aprimorou a idéia de Christaller, concebendo em 1940 a sua teoria de regiões econômicas. Enquanto Christaller preocupava-se com a localização de assentamentos e vilas, Lösch enfocava a localização de comércio e serviços. Para ele, os centros podem ser classificados em grupos hierárquicos de acordo com o tipo de serviço e o tamanho do mercado. Se a população é homoganeamente distribuída ao longo da área considerada, há um aumento na demanda por um bem particular próximo ao centro, dado que os custos decrescem em direção a ele; i.e., a curva de demanda decai a partir do centro. Uma vez que as áreas de mercado são circulares, a livre entrada de empresas em um sistema de competição perfeita, produz um complexo de hexágonos aninhados (FIGURA 5.3), aproximando-se do ideal de círculos (Perraton e Baxter, 1974).

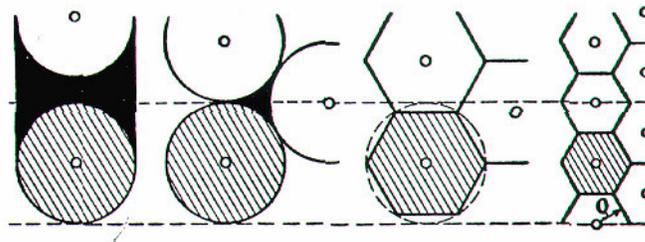


FIGURA 5.3 – Ninhos hexagonais da teoria de regiões econômicas de Lösch.
 FONTE: Merlin (1973, p.135).

Sucedendo essas simples realizações em modelagem urbana baseadas em teorias econômicas, uma nova geração de modelos computacionais entrou em cena no final dos anos 50 e começo dos anos 60, imediatamente após notáveis avanços nas facilidades computacionais e o advento da Revolução Quantitativa (uma revolução científica destinada a introduzir rigor e qualidade em disciplinas como Sociologia, Ciências Políticas e Urbanismo).

Desenvolvimentos pioneiros em modelagem urbana surgiram quase que exclusivamente na América do Norte, onde a crescente propriedade de automóveis durante os anos 40 e início dos anos 50 levou à constatação de que as cidades, com sua estrutura física tradicional, não poderiam fazer frente às novas necessidades de mobilidade. Os primeiros estudos de transportes envolviam prognósticos de geração de viagens e sua distribuição espacial, sendo os primeiros estimados por regressão linear, e a distribuição, por modelos gravitacionais, assim denominados em analogia à Lei de Gravitação de Newton. Estes primeiros estudos, contudo, negligenciavam questões importantes sobre o uso do solo. Porém, a crescente consciência acadêmica e profissional à época em relação ao inter-relacionamento entre tráfego e uso do solo permitiu a construção de modelos de uso do solo já por volta de 1960 (Batty, 1976).

Em paralelo a estes desenvolvimentos em planejamento de transportes, dois importantes projetos de pesquisa referentes à economia urbana e locacional também tiveram um profundo impacto no âmbito de modelagem à época. O primeiro deles é um modelo econômico teórico para localização residencial proposto por ALONSO (1960), o qual levou à frente o trabalho de Von Thünen, contextualizando este modelo na teoria microeconômica de comportamento do consumidor baseado na maximização de utilidades, onde o consumidor define seu local de residência em função de compensações entre custos de transportes e de moradia. O segundo projeto de impacto é o modelo de localização intra-urbana concebido por WINGO (1961), também baseado no trabalho de Von Thünen, o qual operava sobre custos detalhados de transportes para explicar a densidade populacional. Pouco antes, CLARK (1951) em um modelo similar, também se baseou na teoria de Von Thünen, descrevendo as densidades residenciais a partir do centro como uma função exponencial que decai com a distância (Equação 5.1).

$$D_j = A \exp(-\beta d_j) \quad (5.1)$$

onde, D_j é a densidade residencial em um local j ; A é uma constante; d_j é a distância ao centro da cidade, e β é um parâmetro.

Alguns exemplos dignos de nota entre os primeiros experimentos de modelagem são o modelo de Greensborough (Chapin e Weiss, 1962) e os modelos de Baltimore e Connecticut (Lakshmanan, 1964, 1968), todos baseados em técnicas estatísticas lineares e se utilizando de uma abordagem indutiva ancorada, por assim dizer, em uma teoria 'a priori'. Por um outro lado, modelos indutivos não-lineares também foram construídos, tais como o modelo de alocação de atividades do vale de Delaware (Seidman, 1969).

Muitos modelos, contudo, foram construídos com base no modelo gravitacional, sugerindo uma abordagem mais dedutiva, na qual mecanismos específicos atuantes no sistema urbano foram simulados. O modelo de Pittsburgh (Lowry, 1964) e seus sucessores são bons exemplos da abordagem gravitacional, a qual foi responsável por produzir uns dos mais bem sucedidos modelos urbanos deste período (Batty, 1976).

O modelo de Lowry organiza a economia do espaço urbano em atividades (população, empregos secundários e empregos terciários) e em usos do solo (residencial, serviços e industrial). A seguir, o modelo aloca essas atividades em zonas da região urbana. A população é alocada proporcionalmente à população potencial de cada zona, e os empregos terciários são alocados em proporção aos empregos potenciais ou mercado potencial de cada zona.

Alocando-se as várias atividades de acordo com restrições pré-determinadas, o modelo testa então a distribuição projetada de população versus a distribuição usada para computar os potenciais, a fim de verificar se ambas são coincidentes. Isto é necessário para assegurar consistência entre essas distribuições, uma vez que o modelo usa as distribuições de população e empregos para calcular os potenciais, o que indiretamente afeta a localização dessas variáveis projetadas. Isto é feito por meio da retro-alimentação ao modelo dos dados de população e empregos projetados, reiterando-se na seqüência todo o procedimento de

alocação, até que as distribuições de entrada do modelo sejam coincidentes com as de saída. Um diagrama interpretativo desta seqüência de operações é apresentado na FIGURA 5.4.

Muitas são as limitações desses primeiros modelos, e críticas incisivas foram feitas aos mesmos, sobretudo em questões do seu dimensionamento. Alguns destes modelos eram tão ambiciosos em termos de abrangência, dados requeridos e capacidade de processamento computacional, que vários foram abandonados ou drasticamente reduzidos. Um outro problema refere-se ao fato de que, embora baseados em bem definidas estruturas formais, alguns modelos ancoravam-se esparsamente em teorias, aparentando um caráter arbitrário e mecanicista. Uma terceira crítica relaciona-se ao fracasso de muitos modeladores em reconhecer limitações contextuais inerentes ao objeto de modelagem, em vista do complexo conjunto de variáveis intervenientes em sistemas urbanos, as quais não podem ser analisadas simultaneamente, mas sim, em separado. E finalmente, muitos desses primeiros modelos puderam apenas descrever a estrutura urbana em um instante no tempo, ou no melhor dos casos, comparar essas estruturas estáticas, incorporando um equilíbrio artificial de longo prazo, o que os tornou meras simulações de estruturas urbanas estáticas observáveis (Batty, 1976).

5.1.3 Primeiros Modelos Dinâmicos de Mudanças do Uso do Solo Urbano e Regional

Em um esforço de superação das limitações da primeira geração de modelos urbanos, um novo grupo de modelos propõe-se, dentre outras coisas, a operar sobre uma base dinâmica. Nem todos eram totalmente dinâmicos, o que torna importante a introdução, por hora, de algumas definições básicas em termos de modelagem dinâmica.

De acordo com Wegener et al. (1986), um modelo denomina-se *dinâmico*, se ele possui uma dimensão temporal explícita, se suas entradas e saídas variam com o tempo, e se seus estados dependem de estados anteriores. Uma forma simples de modelo dinâmico é o *estático comparativo*, que procura representar a estrutura estática de sistemas urbanos em um instante de tempo sem recorrer a explicações de mudanças de estrutura ao longo do tempo, as quais constituem o comportamento do sistema² (Batty, 1976).

² De acordo com a Teoria de Sistemas (Bertalanffy, 1951), a estrutura do sistema não pode ser interpretada sem o conhecimento do comportamento do sistema e vice-versa. A Teoria de Sistemas postula a idéia de sistemas sendo

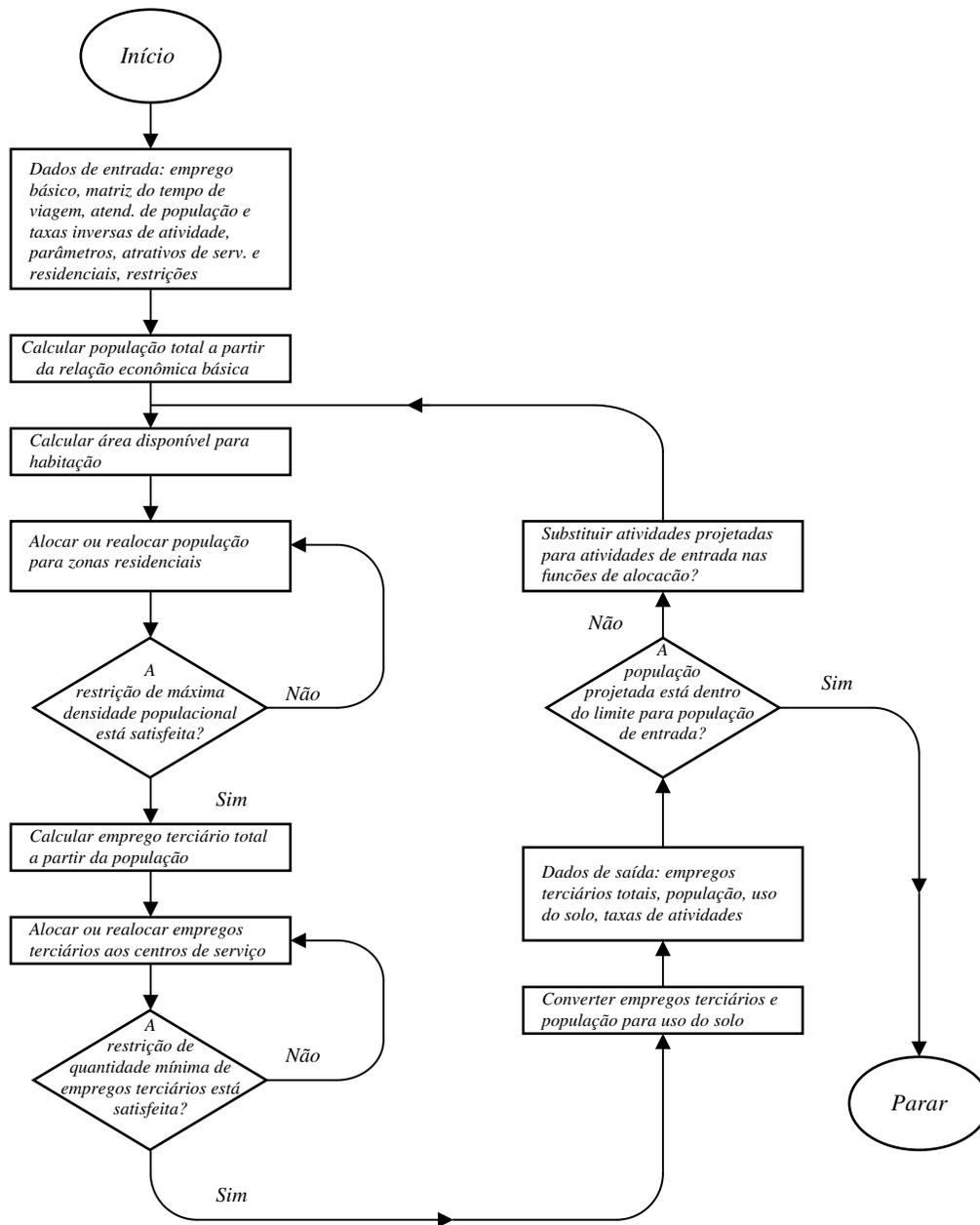


FIGURA 5.4 – Fluxograma genérico do modelo de Lowry.

FONTE: BATTY (1976, p. 61).

Uma seqüência de modelos estáticos comparativos é chamada modelo *recursivo*, no qual o estado final de um período de tempo serve como estado inicial do período subsequente

descritos em termos de estrutura e comportamento, em termos de entradas e saídas, e a noção de controle intencional desses sistemas em termos de retroalimentações positivas e negativas.

(Wegener et al. 1986). BATTY (1976) faz mais uma distinção, ao afirmar que um modelo é *quase-dinâmico*, se ele contém partes estáticas em uma estrutura dinâmica.

PERRATON e BAXTER (1974) apresentam um modelo estático comparativo, analisando as repercussões de disposições alternativas de redes de transporte, regulações de ocupação e serviços públicos na distribuição de população. O trabalho de BUTLER (1969) é um exemplo de modelo recursivo, onde a redistribuição residencial é abordada em dois submodelos – quais moradores mudam-se e para onde – sendo que a nova distribuição residencial é usada para determinar quais famílias irão mudar-se no período seguinte.

Modelos quase-dinâmicos são comumente construídos com base em modelos de interação espacial, como o concebido por LOWRY (1964). Neste caso, o modelo de interação espacial é generalizado pela incorporação de capacidade zonal ou de rede ou restrições de oferta em uma estrutura de multiatividades, por meio de otimizações não-lineares. Bons exemplos dessa categoria de modelos são BOYCE (1977), COELHO e WILLIAMS (1978), LEONARDI (1981), etc.

Dentre os primeiros modelos dinâmicos de ordem linear está o proposto por CZAMANSKI (1965), que aplicou um simples modelo econômico baseado no tempo à região de Baltimore. Este é um modelo de segunda ordem e quatro equações, descrito a seguir:

$$P(t+1) = a_1 + b_1 E(t-1), \quad (5.2)$$

$$S(t+1) = a_2 + b_2 P(t), \quad (5.3)$$

$$E^b(t+1) = a_3 + b_3 X(t+1), \quad (5.4)$$

$$E(t+1) = E^b(t+1) + E^l(t+1) + S(t+1), \quad (5.5)$$

onde P é população; S é emprego terciário; E^b é emprego básico derivado; X é emprego básico exógeno e E^l é emprego básico baseado em localização, que inclui X ; a_1 , a_2 , a_3 e b_1 , b_2 , b_3 são parâmetros a serem estimados; a notação de tempo é auto-explicativa. O modelo

fornece uma abordagem simples para a geração de atividades urbanas, embora não apresente dimensão espacial.

Um outro exemplo de modelagem dinâmica é o modelo EMPIRIC, o qual é baseado em um sistema de equações diferenciais de primeira ordem, referente a diferentes zonas e atividades. Este modelo foi concebido por HILL (1965) para o Projeto de Planejamento Regional de Boston e possui várias versões, resultado de sucessivas revisões. Diferentemente de Czamanski, o EMPIRIC tem caráter espacial e reconhece a natureza simultânea dos inter-relacionamentos urbanos, adotando para este fim soluções formais como o método de mínimos quadrados de duplo estágio. O intervalo de tempo é de dez anos, e conseqüentemente, a ênfase em dinâmicas é implícita ao invés de explícita.

Um problema básico com esses modelos lineares supramencionados concerne o fato de que eles não procuram distinguir agentes transitórios (grupo de atividades em relocação na cidade) dos estacionários. Além disso, há um enviesamento indutivo, no sentido de que a ênfase sobre explicações é completamente estatística, e assim sendo, há poucos princípios diretrizes na escolha do intervalo de tempo.

A definição do intervalo de tempo é de grande importância em modelagem dinâmica. Para FORRESTER (1969), o período de simulação deve ser curto o suficiente para não influenciar o comportamento do modelo; em particular, ele não deve ser usado para introduzir intervalos implícitos. BATTY (1976) citando BROADBENT (1969) afirma que o intervalo de tempo deve ser pequeno o suficiente para detectar os fenômenos de interesse; se o intervalo é muito grande, o modelo pode tornar-se trivial, e portanto, passível de decomposição em uma série de modelos estáticos comparativos para cada período de tempo.

FORRESTER (1969) sugere que a extensão do período de simulação deve ser metade ou menos do que o menor atraso³ presente no sistema. Para ele, atrasos são essenciais para o entendimento de sistemas complexos, e isto está em concordância com a Teoria da

³ Atraso é o tempo decorrido entre a introdução de um certo estímulo e a manifestação de seus impactos no sistema em consideração.

Bifurcação⁴, segundo a qual pequenas mudanças no conjunto de variáveis do sistema podem levar a trajetórias significativamente distintas de comportamento do mesmo. De acordo com esta regra, a maior parte dos modelos urbanos dinâmicos com períodos de simulação de cinco anos ou mais são fortemente inadequados para capturar as dinâmicas de mudanças urbanas (Wegener et al. 1986).

O Modelo Metropolitano Baseado no Tempo (“Time-Oriented Metropolitan Model” - TOMM), desenvolvido por CRECINE (1964) para o Programa de Renovação da Comunidade de Pittsburgh, procurava tornar um simples modelo estático baseado no modelo original de Pittsburgh (Lowry, 1964) em um modelo dinâmico mais complexo, pela consideração do comportamento do sistema. Importante distinção foi feita entre agentes transitórios e estacionários. Na sua segunda versão, adotou-se um intervalo de tempo de dois anos bem como uma formulação mais realística das medidas de atração locacional, incorporando aluguel, amenidades e custos de transporte (Crecine, 1968). Na terceira versão, questões sobre comportamento de agentes transitórios foram abordadas.

Muito embora este modelo apresente alguns avanços significativos, não há consistência entre atividades móveis e o seu relacionamento com a base econômica. Apesar de o TOMM ser organizado em torno do conceito de agente transitório, novos agentes em processo de locação ou relocação não estão devidamente separados, dificultando o rastreamento das propriedades de equilíbrio do modelo (Batty, 1976).

Um conjunto de técnicas formuladas para a simulação de processos industriais, coletivamente denominadas Dinâmica de Sistemas, foi empregado na modelagem de sistemas urbanos e globais hipotéticos, adotando-se intervalos de cinco anos ou mais em período de 250 anos (Forrester, 1969, 1971). Estas técnicas possuem os seus fundamentos na engenharia de controle, onde o conceito de estrutura e comportamento do sistema é concebido em termos de níveis de estoques, que são progressivamente alterados ao longo do tempo por taxas afetadas positiva ou negativamente por retro-alimentações dentro do sistema de interesse.

⁴ A Teoria da Bifurcação é comumente mencionada em associação com a Teoria da Catástrofe, em vista dos seus interrelacionamentos. A última diz respeito basicamente a processos submetidos a mudanças rápidas, e que apresentam consequentemente um comportamento descontínuo (Bak et al. 1989).

Muitos desses modelos são baseados na noção de que um sistema é limitado por uma quantia fixa de recursos, os quais afetam o crescimento do sistema ao longo do tempo. Tipicamente, esse sistema cresce exponencialmente a princípio, e conforme se aproxima do limite de recursos, o crescimento decai, e uma eventual condição de equilíbrio é atingida, em geral com oscilações em torno do estado estável.

Os modelos de Forrester não são espaciais e não reconhecem que a estrutura de atividades em uma cidade possa ser explicada em termos de interação espacial (Batty, 1971). Eles também desconsideram bem demonstradas e reconhecidas teorias urbanas, e muitas de suas hipóteses não podem ser provadas ou testadas (Batty, 1976).

Entretanto, estes modelos foram aplicados em duas situações reais. A primeira é o caso do Condado de Harris, Texas (Porter e Henley, 1972), que não é de muito interesse. O segundo caso, que se mostrou ser um experimento promissor, refere-se à sub-região de Veneza (Costa e Piasentin, 1971). Veneza foi dividida em três zonas – *Centro Urbano*, *Estuario* e *Terra Ferma* – e o modelo simula o crescimento de população, emprego e moradia de 1951 a 1971. A adequabilidade desta aplicação reside no fato de que a sub-região de Veneza em questão é marcadamente limitada em termos espaciais, e portanto, inadequada para modelos de alocação de atividades.

Uma outra classe de modelos urbanos dinâmicos foi elaborada em seqüência ao trabalho de economistas como Paelinck, baseada na especificação de dinâmicas urbanas em termos de equações diferenciais relacionando fenômenos macroeconômicos (Paelinck, 1970; Blokland et al. 1972). Um dos aspectos de modelos como estes, cujo componente espacial é implícito ao invés de explícito, refere-se ao fato de que muito mais hipóteses são necessárias para a sua validação do que nos seus similares espaciais. Apesar desses modelos serem mais ricos em detalhes, eles são freqüentemente mais difíceis de calibrar em situações reais. Por um outro lado, suas hipóteses são normalmente fundamentadas sobre teorias econômicas consolidadas, e a estimativa dos seus parâmetros é uma área bem desenvolvida em Econometria, o que os torna de mais fácil aplicação a situações reais do que os modelos de Dinâmica de Sistemas (Batty, 1976).

BATTY (1971) desenvolveu um modelo dinâmico, aplicado à região de Reading, UK, matematicamente formulado como um sistema de equações diferenciais relacionando população, emprego terciário e básico através do tempo, por meio de hipóteses de base econômica, e através do espaço, por meio de modelos gravitacionais que simulam os fluxos entre várias atividades. Uma das principais suposições subliminares é a de que a cidade está sempre em desequilíbrio, uma vez que em qualquer instante de tempo, sempre há repercussões no modelo que ainda não foram processadas pelo sistema.

Este modelo foi posteriormente detalhado (Batty, 1976), diferenciando agentes em locação daqueles em relocação. As interações espaciais orientam-se em função da localização de atividades, divididas em três tipos: população residencial, serviços e emprego básico. Serviços são subdivididos em grupos orientados a consumidores e produtores, e emprego básico é separado em emprego dependente de emprego já existente, e agentes em locação, cuja localização não pode ser prevista pelo modelo.

Conforme BATTY (1976) explica, os agentes em locação fornecem o estímulo externo ao modelo, porque embora o nível total de emprego básico seja exógeno, a outra categoria de emprego básico é distribuída espacialmente usando um modelo linear. População e emprego terciário são alocados usando-se modelos de gravidade limitados por atração e produção (Wilson, 1970). Estes modelos procuram simular, embora de modo grosseiro, um equilíbrio entre oferta e demanda de atividades, enquanto que no modelo de localização residencial, um submodelo foi previsto para lidar com a oferta de área residencial horizontal e vertical.

Um outro modo de se obter modelos urbanos totalmente dinâmicos é interpretar a convergência de modelos estáticos ao equilíbrio como um processo de ajuste no tempo. Isto permite a investigação da trajetória de um sistema urbano como uma seqüência de passos, os quais podem ou não atingir o equilíbrio dependendo de influências exógenas.

BEAUMONT et al. (1981) propuseram um modelo neste sentido, cuja idéia básica é bem simples: ele parte do modelo de viagens-compras limitado pela produção conforme proposto por LAKSHMANAN e HANSEN (1965) e interpreta as somas de colunas, dependendo do sinal, como demanda não atendida ou excesso de oferta, e usa essa

informação para direcionar o crescimento ou declínio de atividades comerciais (Equação 5.6).

$$W_j^\circ = \varepsilon \sum_i \frac{W_j^a \exp(-\beta_1 c_{ij})}{\sum_j W_j^a \exp(-\beta_1 c_{ij})} e_i P_i - k W_j W_j, \quad (5.6)$$

onde W_j = atividades comerciais em zonas de comércio j ; e_i = despesas com compras da população P_i das zonas i em j ; k = custos para o fornecimento de atividades de comércio em j ; ε é um parâmetro de elasticidade determinante da velocidade do processo de ajuste; e β_1 = o parâmetro da função de impedimento. Na ausência de estímulos externos, o modelo produz um crescimento logístico de centros de compra até um equilíbrio espacial, mas devido a suas não-linearidades, ele apresenta uma variedade de bifurcações para diferentes combinações de seus parâmetros α , β_1 , e ε , e para diferentes distribuições iniciais de P_i e W_j .

Um outro modelo dinâmico destinado a produzir bifurcações é o proposto pelo grupo de Brussels (Allen et al. 1981). Este modelo aborda a questão de dinâmicas em sistemas urbanos a partir de um ponto de vista diferenciado. Ele é baseado no conceito de auto-organização através de perturbações aleatórias encontradas no nível molecular ou genético de sistemas físicos ou biológicos. Allen e sua equipe levou à frente este conjunto de idéias segundo o que ele denominou “modelo dinâmico geral da evolução espacial de sistemas urbanos”, o qual se baseava em conceitos sofisticados como sistemas abertos e adaptáveis, caos e complexidade (Allen et al. 1986).

O modelo de Brussels é mais elaborado do que o anterior., com quatro setores industriais e, ao invés de habitação, dois grupos populacionais. A forma para a previsão do crescimento e declínio de comércio W_j em zonas comerciais j é dada por (Equação 5.7):

$$W_j^\circ = \varepsilon \sum_i \frac{[A_j (k + c_{ij}) - \beta_1]^a}{\sum_j [A_j (k + c_{ij}) - \beta_1]^a} e_i P_i - (k + c_{ij}) W_j W_j, \quad (5.7)$$

onde A_j é a atratividade da zona j , e as notações restantes têm o mesmo significado como na Equação 5.6.

Os dois modelos têm diferentes formulações para a atratividade. Eles também diferem na forma de produzir bifurcações. Enquanto no primeiro caso, as bifurcações são sistematicamente exploradas por variações paramétricas, no modelo de Brussels elas são geradas por perturbações aleatórias, embora o comportamento dinâmico produzido pelos dois modelos seja muito similar.

Da mesma forma que nos exemplo precedentes, estes dois modelos receberam inúmeras críticas, dentre as quais uma concerne o fato de que, como todos os modelos de interação espacial, eles prevêm um processo lento (estabelecimento de comércio) a partir de um processo rápido (viagens comerciais). WEGENER et al. (1986), os autores dessas críticas, propuseram então um modelo urbano dinâmico observando diferentes escalas de tempo para as mudanças urbanas, i.e., um modelo temporal multinível.

Wegener e sua equipe classificaram processos de mudanças urbanas em três níveis de acordo com sua velocidade de ocorrência. Processos lentos (Nível 1) referem-se à construção de infra-estrutura de transportes, indústrias públicas e habitação popular. Estes investimentos tendem a ser duráveis e envolvem intervalos mais longos entre planejamento e conclusão. Processos de velocidade média (Nível 2) referem-se a mudanças econômicas, sociais e tecnológicas (envelhecimento, óbito, formação de novos lares, mudança de emprego, etc.), uma vez que estas mudanças são visíveis apenas em uma escala de médio prazo, enquanto que processos rápidos (Nível 3) dizem respeito à mobilidade, dado que esses deslocamentos representam as ocorrências mais voláteis no escopo de transformações urbanas.

Este modelo temporal multinível compreende três módulos (escolha, transição e fatores exógenos), e cada uma das mudanças urbanas elencadas são assinaladas a um desses módulos. Investimentos públicos são sempre incluídos no módulo de fatores exógenos; envelhecimento, óbito, aposentadoria e processos afins, por se constituírem em mudanças involuntárias, são adicionados ao módulo de transição; e as mudanças restantes, ao módulo

de escolha. Esses módulos são interligados por um gerenciador de arquivos e acionados por um agendador.

A estrutura do modelo consiste de um aparato temporal, com períodos interconexos de simulação de diferentes extensões, múltiplas de um período muito curto de tempo, que pode ser um mês ou um trimestre. Se um módulo é ativado pelo agendador, ele será informado do número de unidades de tempo em que deverá permanecer ativo. O módulo usará essa informação para calcular o número de micro-eventos a serem processados durante este intervalo de tempo. Se o número é muito grande, o módulo pode aumentar o seu fator de amostragem ou resolução, e assim, economizar tempo de processamento. Em vista da detalhada abordagem da dimensão temporal e do comportamento microeconômico, o modelo não foi integralmente implementado, possuindo contudo, muitos de seus componentes operacionais. Este modelo foi aplicado para a simulação de processos de mudanças de longo prazo na região urbana de Dortmund, Alemanha (Wegener et al. 1986).

Concluindo, pode-se finalmente afirmar que embora refinamentos consideráveis tenham sido introduzidos na primeira geração de modelos dinâmicos no sentido de dotá-los de habilidade para lidar com as complexas, e por vezes recursivas, interações espaciais dentre as diferentes atividades em uma cidade, de incorporar a dimensão temporal (multinível) na análise quantitativa e de empregar sofisticados recursos teóricos e matemáticos – p.ex. equações diferenciais, Teoria da Catástrofe e Bifurcação, etc. -, estes modelos permaneceram fundamentalmente não-espaciais, especialmente no sentido de que seus resultados não podiam ser visualizados espacialmente.

5.1.3 Modelos Dinâmicos Espaciais de Mudanças do Uso do Solo Urbano e Regional

De acordo com o exposto nas seções anteriores, os modelos urbanos desenvolvidos no final dos anos 50 até a metade dos anos 80, de uma maneira geral, não operavam sobre uma dimensão espacial. Quando isto acontecia, o espaço urbano era desagregado em unidades (usualmente zonas de origem-destino ou definidas de acordo com distritos censitários ou outros critérios afins), mas, conforme já exposto, o resultado destes modelos não podia ser visualizado espacialmente. De fato, efetivos avanços na representação espacial de modelos

urbanos ocorreu apenas no final dos anos 80, quando modelos de autômatos celulares (“Cellular Automata” - CA) começaram a ser utilizados em larga escala.

Stephen Wolfram, um dos mais renomados teóricos sobre autômatos celulares, os define como sendo:

“... idealizações matemáticas de sistemas físicos, no qual o espaço e o tempo são discretos, e os atributos assumem um conjunto de valores também discretos. Um autômato celular consiste de uma grade regular uniforme (ou `campo matricial`), comumente infinito em sua extensão, com uma variável discreta em cada localidade (`célula`). O estado de um autômato celular é completamente especificado pelos valores das variáveis em cada célula. Um autômato celular evolui em passos de tempo discretos, com o valor da variável em uma célula sendo afetado pelos valores das variáveis nas células vizinhas encontrados no passo de tempo anterior. A vizinhança de uma célula é tipicamente formada pela própria célula em consideração e todas as demais células localizadas nas suas adjacências imediatas. As variáveis em cada célula são atualizadas simultaneamente (`sincronicamente`), baseando-se nos valores das variáveis da sua vizinhança no passo de tempo precedente, e de acordo com um conjunto pré-definido de `regras locais` (Wolfram, 1983, p. 603)”.

Modelos de autômatos celulares (CA) possuem aplicações nas mais diversas áreas, desde a física teórica e empírica até mudanças de uso e cobertura do solo, engenharia e controle de tráfego, disseminação de epidemias, biologia comportamental, dentre outras. O artigo de WOLFRAM (1983) refere-se a cerca de 50 outros artigos que tratam de possíveis aplicações de autômatos celulares.

O Jogo da Vida (“Game of Life”) de John Conway (Gardner, 1970), ou `Life` como ficou conhecido, immortalizou o conceito de CA. No `Life`, o espaço celular é composto de uma grade quadrada regular bidimensional, onde a vizinhança das células consiste de seus oito vizinhos imediatos, isto é, quatro vizinhos ortogonais e quatro vizinhos diagonais⁵.

⁵ Esta vizinhança de oito células é chamada de vizinhança de `Moore`. Uma vizinhança de apenas quatro células ortogonais adjacentes é conhecida como vizinhança de `von Neumann`.

Qualquer célula pode estar viva ('on') ou morta ('off'), e há apenas duas regras simples para uma célula tornar-se viva ou morrer. Uma célula morta torna-se viva se há exatamente três células vivas imediatamente adjacentes à mesma. Uma célula permanece viva se há duas ou três células vivas nas suas adjacências, senão ela morre. Isto significa que uma célula morre de isolamento ou superpopulação. Apesar da simplicidade das regras, este jogo suporta a geração de inumeráveis padrões de comportamento dinâmico.

De fato, o 'Life' demonstrou ser rico o suficiente para suportar a computação universal (Berlekamp et al. 1982). É evidente que mesmo nos mais simples CA, padrões globais complexos emergem diretamente da aplicação de regras locais, e é exatamente esta propriedade de complexidade emergente que torna os CA tão fascinantes, e o uso de seus modelos tão atrativos.

Uma outra propriedade interessante do 'Life' foi a possibilidade de apresentar certas configurações que se auto-perpetuam. Um exemplo bem conhecido destas configurações é o 'glider'. Um 'glider' é feito de cinco células vivas, dispostas como na FIGURA 5.5, no passo de tempo $t = 0$. A seqüência de quatro passos de tempo resulta nas mudanças mostradas, ao final da qual a configuração deslocou-se uma célula acima e à direita. Como afirma O'SULLIVAN (2000), um aspecto interessante de um 'glider' é que o seu comportamento pode ser descrito sem conhecimento das regras subjacentes.

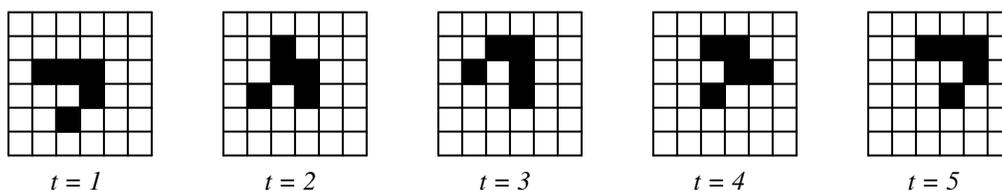


FIGURA 5.5 – Configuração de um 'glider' em o "Jogo da Vida" – um exemplo de emergência. Células vivas estão mostradas em preto.

FONTE: O'SULLIVAN (2000, p. 58).

Apesar dos CA lidarem com a emergência observável em fenômenos complexos, possuem grande flexibilidade para fazer frente aos diversos processos dinâmicos, e revelarem uma

incrível simplicidade operacional, eles são limitados, a princípio, em vista de restrições impostas pela maior parte de suas suposições teóricas.

Em resposta a isto, COUCLELIS (1997) propõe uma série de melhoramentos a serem incorporados em modelos de CA, os quais representam uma possibilidade técnica para se relaxar uma ou todas as suposições de CA convencionais (FIGURA 5.6). Estas proposições visam atender sobretudo as demandas de modelagem urbana e regional.

De acordo com a sua opinião, o espaço não mais necessita ser homogêneo em termos de suas propriedades e estrutura; vizinhanças não necessitam ser uniforme no espaço, e as funções de transição não necessitam ser universais (i.e., igualmente aplicáveis em cada ponto). Para ela, efeitos de decaimento com a distância poderiam integrar as vizinhanças de CÁ, regras de transição poderiam ser probabilísticas ao invés de determinísticas, e passos de tempo variáveis poderiam ser usados em ajuste a certos calendários.

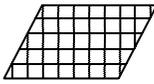
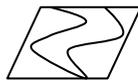
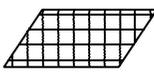
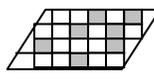
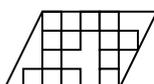
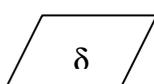
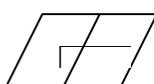
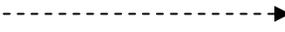
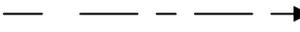
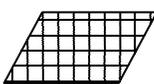
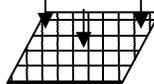
Espaço	Estrutura	regularidade 	irregularidade 
	Propriedades	uniformidade 	não-uniformidade 
Vizinhança		estacionariedade 	não-estacionariedade 
Função de transição		universalidade 	não-universalidade 
Tempo		regularidade 	não-regularidade 
Condições do sistema		fechado 	aberto 

FIGURA 5.6 – Generalizações comuns de autômatos celulares (CA).

FONTE: COUCLELIS (1997, p. 168).

Alguns teóricos de CA poderiam argumentar que, neste caso, o paradigma de autômatos celulares não mais se sustenta, especialmente devido a relaxamentos na noção de vizinhança local e de regras de transição, e que estes modelos adaptados deveriam ser preferencialmente denominados como modelos celulares (Albin, 1975; Batty, 2000)

Os CA propriamente ditos estiveram de alguma forma implícitos na primeira geração de modelos computacionais nos anos 60, com os experimentos de CHAPIN e WEISS (1968) e de LATHROP e HAMBURG (1965), executados respectivamente para a Carolina do Norte e o oeste do Estado de Nova York. Nos anos 70, TOBLER (1970), influenciado pela geografia quantitativa, propôs modelos celulares para o desenvolvimento de Detroit. Pouco depois, em 1974, ele começou a formalmente explorar a forma pela qual CA *stricto sensu* poderiam ser aplicados a sistemas geográficos, resultando no seu famoso artigo “Cellular geography” (Tobler, 1979). Finalmente, no final dos anos 80, CA começaram a ser amplamente utilizados para questões urbanas, impelidos pelo desenvolvimento paralelo no âmbito de computação gráfica e de teoria da complexidade, caos, fractais e afins (Batty et al. 1997).

Os anos 90 experienciaram sucessivos melhoramentos em modelos urbanos de CA, os quais passaram a incorporar dimensões ambientais, sócio-econômicas e políticas, e finalmente foram bem-sucedidos na articulação analítica de fatores de micro e macro-escala espaciais (Phipps e Langlois, 1997; White e Engelen, 1997; White et al. 1998).

Autômatos celulares podem ser considerados como uma categoria de modelos espacialmente explícitos (ou mais genericamente, modelos dinâmicos espaciais). O termo “espacialmente explícito” não é novo, mas ainda é empregado para caracterizar modelos que procuram descrever e prever a evolução de atributos ambientais em subunidades de área com distintas localização e configuração (Baker, 1989). BRIASSOULIS (2000) subdivide estes modelos em espacialmente explícitos integrais (georreferenciados) e espacialmente explícitos parciais (não-georreferenciados).

Modelos de CA podem contemplar aplicações teóricas e práticas, onde as primeiras concernem exercícios abstratos, e as de caráter prático, experimentos que lidam com

estudos de caso reais. Há atualmente cerca de vinte ou mais aplicações de CA a cidades (Batty, 2000), incluindo um vasto repertório tanto temático quanto metodológico.

Os primeiros modelos urbanos de CA não raro eram baseados em procedimentos metodológicos simples, como restrições de coerência de vizinhança (Phipps, 1989) ou regras Booleanas (Couclelis, 1985) para as funções de transição. Mais tarde, sucessivos refinamentos passaram a ser incorporados nestes modelos, a exemplo da adoção de regras de transição dinâmicas (Deadman et al. 1993), as quais poderiam alterar-se com a concomitante mudança das condições e políticas da municipalidade em estudo.

Outros exemplos neste sentido são o trabalho de WU (1996), que concebeu regras de transição para capturar processos desordenados de ocupação da terra, baseadas em heurística e lógica fuzzy, e o trabalho de WARD et al. (1999), no qual regras de transição são modificadas segundo limiares-meta de otimização econômica, social e ambiental, associados ao desenvolvimento urbano sustentável.

Outros refinamentos referem-se à introdução de abordagens microeconômicas em CA, o que levou ao aparecimento sistemas multiagentes (“Multi-Agent Systems” - MAS). Como exemplos, citam-se o trabalho de SEMBOLONI (1997), descrevendo os padrões de desenvolvimento de cidades principais e satélites em função de diferentes categorias de população e atividades, os trabalhos de SANDERS et al. (1997) e TORRENS (2003) bem como os trabalhos de BATTY et al. (1998) e SCHELHORN et al. (1999) sobre movimento de pedestres, segundo o que se denomina modelos “atômicos” ou “microscópicos”⁶.

As funções de transição de CA também foram melhoradas pela incorporação de ferramentas de suporte à decisão, incluindo AHP ou técnicas baseadas em processos analíticos hierárquicos, o que foi em grande parte possibilitado pelas ligações entre CA e GIS (Engelen et al. 1997; Wu, 1998). Além de processar operações internas de CA (Clarke e Gaydos, 1998; Li e Yeh, 2000), GIS foram igualmente úteis na implementação de CA baseados em modelos de espaço proximal (Takeyama e Couclelis, 1997) e na articulação de

⁶ Modelos “atômicos” ou “microscópicos” são aqueles que dizem respeito a objetos com resolução ao nível de entidade, tais como pedestres, domicílios, veículos, habitações, etc. (Benenson e Torrens, 2004).

níveis analíticos de micro e macro-escala (Phipps e Langlois, 1997; White e Engelen, 1997; White e Engelen, 2000).

Um exemplo ilustrativo de modelos de CA integrando fatores analíticos de micro e macro-escala espaciais é o trabalho de WHITE et al. (1998), no qual a demanda por área de uso residencial é estimada através de um subsistema social que leva em consideração fluxos migratórios inter-regionais, e onde a demanda por atividades econômicas (industrial, comercial, serviços) é obtida por meio de subsistemas regionalizados que avaliam o desempenho de diferentes setores econômicos, fornecendo paralelamente informações sobre oportunidades de emprego, as quais serão novamente utilizadas para computar a demanda residencial. Este modelo destina-se a estimar a demanda para os diversos tipos de uso do solo, considerando ao mesmo tempo, a capacidade de suporte ambiental dos sítios em questão (subsistema natural), assim como as restrições impostas em nível local por aspectos funcionais, físicos, institucionais e de infra-estrutura (FIGURA 5.7).

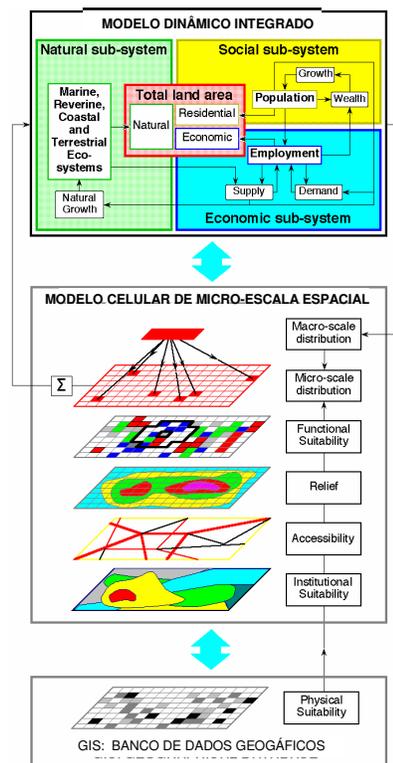


FIGURA 5.7 – Um modelo de CA integrando micro e macro-escalas espaciais.

FONTE: WHITE et al. (1997, p. 237).

PHIPPS e LANGLOIS (1997) foram igualmente bem-sucedidos ao estimar os impactos de fatores analíticos de níveis macro e nacional, como políticas restritivas de imigração, no nível local. O seu modelo de dados contém um módulo chamado de Dinâmica Global dos Sistemas (“Global Systems Dynamics” - GSD), o qual recebe uma entrada que reflete o macroestado do padrão espacial em cada unidade de tempo, e cuja saída altera, em cada unidade de tempo, uma matriz markoviana de probabilidades espaciais de transição (“Spatial Transition Probability Matrix” - STPM). Este modelo foi implementado através de computação paralela e não por meio de GIS (FIGURA 5.8).

Avanços teóricos no campo de sistemas complexos também foram adicionados a autômatos celulares através do trabalho pioneiro de WOLFRAM (1984). Artigos lidando com temas relacionados a complexidade, como caos⁷, fractais⁸ e criticalidade auto-organizável (“self-organized criticality” - SOC)⁹ começaram a ser produzidos após o trabalho de Wolfram e são recorrentes na comunidade científica de CA (Couclelis, 1988; Batty e Longley, 1991; White e Engelen, 1993; Batty e Longley, 1994; Portugali et al. 1997; Portugali et al. 1999; Sobreira e Gomes, 2001; Batty, 2003).

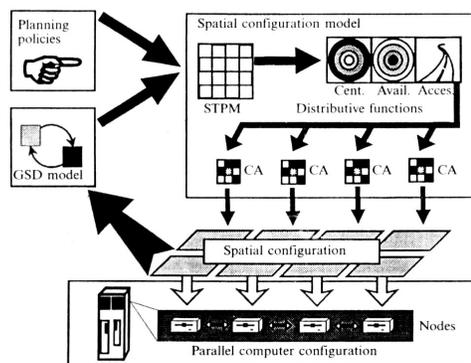


FIGURA 5.8 – Um modelo de CA incorporando variáveis de macro-escala.

FONTE: PHIPPS e LANGLOIS (1997, p. 196).

⁷ Caos é formalmente definido como o estudo de sistemas dinâmicos complexos não-lineares, sendo que o termo complexo envolve uma multiplicidade de variáveis intervenientes e seus interrelacionamentos em um dado fenômeno (Thompson, 1997).

⁸ Fractais são objetos de qualquer espécie, cuja forma espacial nunca é regular (lisa), e sim irregular, e esta irregularidade se propaga geometricamente através de muitas escalas. Fractais podem ser chamados como a geometria do caos (Batty and Longley, 1994).

⁹ Criticalidade auto-organizável (SOC) refere-se a sistemas onde os componentes individuais seguem sua própria dinâmica local até um estado crítico, no qual as dinâmicas emergentes são globais, e a comunicação flui livremente através de todo o sistema. Complexidade é a consequência da criticalidade auto-organizável (Bak et al. 1989).

Progressos teóricos inovadores no vasto campo de inteligência artificial (“artificial intelligence” - AI), tais como sistemas especialistas, redes neurais artificiais e computação evolucionária, foram recentemente incluídos no escopo de simulações em CA. MOORE (2000), citando WEISS e KULIKOWSKI (1984), define sistemas especialistas como “sistemas computacionais que aconselham ou auxiliam a solucionar problemas do mundo real, usando-se um modelo de raciocínio baseado no conhecimento de um especialista humano, que chegam à mesma conclusão que o especialista humano chegaria, caso confrontado com um problema semelhante.” Redes neurais, por sua vez, procuram simular o raciocínio humano (Moore, 2000) oferecendo soluções tolerantes a falhas. De acordo com FISCHER e ABRAHART (2000), estes mecanismos são capazes de aprender e tomar decisões baseadas em informação incompleta, confusa ou vaga. E finalmente, métodos de computação evolucionária constituem um procedimento de busca extremamente flexível e inteligente, o qual reproduz os mecanismos conhecidos da evolução natural (Diplock, 2000).

Conforme exposto por ALMEIDA et al. (2003), métodos recém-incorporados em modelos de CA, como ferramentas de ajuste de padrões por redes neurais (Wu, 1998; Xia e Yeh, 2000) e aprendizagem evolucionária (Papini et al. 1998) têm se revelado como os mais promissores para a próxima geração de modelos urbanos de CA.

5.1.4 Modelos Teóricos x Modelos Empíricos de Dinâmicas Urbanas e Regionais

Não há consenso entre pesquisadores, sobretudo aqueles do âmbito de modelagem de dinâmicas do uso do solo urbano e regional, a respeito de onde a tênue linha entre teoria e modelos principia e onde exatamente ela termina, e até mesmo se há ou não essa linha fronteira. Para Batty (1976), “modelagem não é apenas uma reflexão de teoria urbano-regional formulada alhures; mas ela constitui uma parte essencial da teoria nos campos de economia urbana, geografia e planejamento urbano e regional.” Esta afirmativa foi feita por volta de meados dos anos 70, quando os modelos concentravam-se basicamente em torno de abordagens econométricas, teorias gravitacionais e de alocação de atividades.

É interessante notar o câmbio de opinião ao longo da presente década, onde os impactos de massivos avanços em ferramentas computacionais, ancoradas principalmente sobre rotinas

algorítmicas e lógicas, se fizeram sentir de forma pronunciada. Torrens e O'Sullivan (2001) reportam que “uma das limitações de modelos urbano-regionais de CA é a de que em alguns casos eles contribuíram relativamente pouco do ponto de vista teórico. Argumenta-se que os modelos exploram várias hipóteses sobre cidades e regiões, mas os resultados concernem freqüentemente detalhes da construção de modelos às custas das teorias que estes se propõem a explorar. Pesquisa em modelagem de CA é simplesmente isso: pesquisa em modelagem, e não pesquisa sobre teoria e dinâmica urbana e regional.”

Seguindo uma argumentação similar, Briassoulis (2000), que se dedica a modelos de mudanças de uso e cobertura do solo (“land use and cover change” - LUCC), afirma que “apesar do uso da teoria em modelos parecer ser indispensável, das várias teorias de mudanças de uso propostas, relativamente poucas têm sido usadas na operacionalização de modelos. Algumas teorias e modelos são concebidos simultaneamente; e daí o uso dos termos teoria e modelo de forma alternada ... mas a maioria das teorias ainda estão sem as suas contrapartes (não necessariamente matemáticas) em modelagem, e a recíproca também é válida. Vários modelos estão privados de fundamentações teóricas.”

As razões para este lapso no relacionamento entre teorias e modelos são duplas (Briassoulis, 2000): a) a primeira se refere a diferentes posicionamentos epistemológicos¹⁰ adotados por teóricos e modeladores, onde modelos normalmente se orientam por um tradição positivista¹¹, ao passo que as teorias cobrem um espectro muito mais vasto de epistemologias; e b) uma segunda razão concerne o fato de que a realidade é altamente complexa, o que leva a uma dicotomia no campo de modelagem: ou a redução e simplificação do mundo real resulta em uma representação rudimentar da realidade, ou os modelos dotados de estruturas muito complicadas acabam inoperantes dentro dos limites viáveis de tempo e de demais recursos para a solução de problemas.

O hiato “teoria x modelagem” encontra exemplos em todo o horizonte histórico de modelagem urbano-regional: desde a primeira geração de ambiciosos modelos de transportes em meados dos anos 60, que foram abandonados ou drasticamente reduzidos,

¹⁰ Epistemologia refere-se ao estudo crítico de princípios, hipóteses e resultados de ciências reconhecidas, visando à determinação de fundamentações lógicas, valores e contexto objetivo de cada uma delas (Ferreira, 1986).

¹¹ O Positivismo diz respeito a um conjunto de doutrinas, as quais impõem uma orientação científica ao pensamento filosófico, atribuindo à ciência todo e qualquer progresso do conhecimento (Ferreira, 1986).

até as relativamente recentes abordagens microeconômicas que procuram aprofundar-se em demasia sobre o comportamento individual (Wegener et al. 1986; Wegener, 2000), e por esse motivo, tornam a integral implementação computacional de seus postulados praticamente impossível. Em suma, esforços para apreender um dado contexto real com um nível de detalhamento excessivo provaram ser parcial ou totalmente impraticáveis de um ponto de vista operacional.

Modelos teóricos podem ser entendidos como aqueles cuja gama de suposições, premissas e equações derivadas (quando existentes) explicativas do comportamento do sistema são definidas `a priori'. Modelos empíricos, por um outro lado, apóiam-se nos dados disponíveis para emitir conclusões sobre o sistema `a posteriori', empregando métodos estatísticos empíricos ou mesmo simples regras determinísticas. Modelos de CA teóricos sobre mudanças do uso do solo podem lidar tanto com cidades ou regiões abstratas/hipotéticas quanto com cidades ou regiões reais, enquanto que modelos empíricos concernem estritamente áreas urbanas e regionais reais.

Couclelis (1985), Portugali et al. (1997) e Semboloni (1997), a título de exemplo, trabalham com modelos de CA teóricos para cidades hipotéticas. Batty e Xie (1997) também lidam com modelos de CA teóricos, porém sob uma ótica mais estocástica. Papini et al. (1998), a sua vez, trabalham com um modelo de CA teórico, porém aplicado a uma região real: a área metropolitana de Roma. O trabalho de Clarke et al. (1997), por um outro lado, é um bom exemplo de um modelo de CA empírico, no qual regras de transição determinísticas são estabelecidas com base na observação do objeto de estudo, a área da baía de São Francisco, e onde a calibração é também executada levando em consideração o comportamento mutável do estudo de caso ao longo do intervalo de tempo considerado para a simulação.

A divisão entre modelos de CA teóricos e empíricos deve ser cuidadosamente observada, pois apresenta fronteiras mais nebulosas do que delimitações estritamente rígidas. Alguns modelos de CA podem ser chamados de híbridos, pois sua estrutura interna concilia teoria e empirismo. O modelo proposto por White et al. (1998) exemplifica esta situação, pois ele define acessibilidade com base na teoria gravitacional, e estima a aptidão de uma dada

célula para abrigar um novo uso do solo através de uma equação probabilística, construída portanto, empiricamente.

Os modelos de CA a serem apresentados nos próximos capítulos podem ser, da mesma forma, considerados como híbridos. Embora estes modelos estimem seus parâmetros diretamente a partir dos dados, existe de fato um robusto corpo teórico subjacente aos métodos estatísticos e não-paramétricos empregados, que diz respeito à teoria de probabilidade e dos conjuntos, teorema de Bayes, pesos de evidência e redes neurais artificiais. E com relação aos fenômenos em estudo propriamente ditos – mudanças do uso do solo urbano e regional – todo um conjunto de argumentos teóricos de caráter econômico é adotado para explicá-los, levando em conta noções de maximização de utilidade do consumidor e otimização de vantagens locacionais.

De fato, escolher entre uma abordagem teórica ou empírica, ou mesmo adotar uma solução híbrida, dependerá sempre de um julgamento sensato do modelador, que considerará o perfil específico do objeto de estudo, assim como a(s) finalidade(s) particulares objetivadas pelo experimento de modelagem. Isto deve ser feito com o fim de se evitar problemas metodológicos básicos em modelagem, como os identificados por Harris (1975) já em meados dos anos 70. Para ele, um grande número de modelos não se originou da necessidade em se solucionar problemas urbanos e regionais práticos e específicos, mas ao contrário, novas abordagens parecerão sempre derivar da expansão ou refinamento de estruturas disponíveis no âmbito de modelagem.

E finalmente, a seguinte recomendação sugerida por Oppenheim (1986) será deixada aqui como um mandamento diretriz para todo e qualquer idealizador de modelos: “... a modelagem consiste no desenvolvimento de uma representação para uma dada situação, e não na identificação de uma situação que se ajusta a um dado modelo.”

5.1.5 Por Que Usar Autômatos Celulares para Modelagem Urbana?

Modelos de CA tornaram-se populares em grande parte devido ao fato de serem tratáveis, apresentarem uma incrível simplicidade operacional, gerarem uma dinâmica que pode reproduzir processos tradicionais de mudanças por difusão, e conterem complexidade

suficiente para simular mudanças inesperadas e surpreendentes como as observadas em fenômenos emergentes. Esses modelos são flexíveis, no sentido de que fornecem uma estrutura não sobrecarregada com suposições teóricas, e que é aplicável a um espaço representado como uma grade. Estes modelos podem, portanto, articularem-se com dados matriciais, comumente usados em SIG (Almeida et al. 2003).

CA são também considerados como modelos flexíveis, porque eles lidam com os mais diversos processos dinâmicos do mundo real e podem ser vinculados a um amplo espectro de teorias do campo de complexidade: caos, emergência, fractais, criticalidade auto-organizável etc., bem como do campo de AI, como sistemas especialistas, redes neurais artificiais, aprendizagem evolucionária.

Em face do acima exposto, é sensato afirmar-se que este tipo de representação de modelos constitui ainda uma das melhores técnicas atualmente disponíveis para responder às necessidades e interesses das investigações acerca de dinâmicas de uso do solo urbano e regional.

5.1.6 Considerações Finais

Este capítulo propôs-se a fornecer uma retrospectiva histórica e o atual panorama de modelos urbanos e regionais dinâmicos. Os próximos capítulos desta seção dedicam-se a expor aplicações práticas de modelos dinâmicos espaciais voltados ao estudo de transformações do uso do solo urbano e regional, abordando diversas metodologias de parametrização.

Cumprе lembrar que modelos de dinâmica espacial representam um desafio imediato para a próxima geração de Sistemas de Informações Geográficas (“Geographical Information Systems” - GIS). De acordo com Burrough (1998), métodos para a modelagem de sistemas abertos, dos quais CA são um dos melhores exemplos e respondem a muitos dos requisitos para a simulação de processos dinâmicos de forma rápida e eficiente, são raramente implementados em GIS. Na opinião de Openshaw, “...GIS permanecem surpreendentemente restritos, ..., privados de modelagem e simulação tão relevantes ao mundo atual...” (Openshaw, 2000, p. 26). Estes argumentos são respaldados pelo trabalho de Câmara et al. (2003), para quem os atuais paradigmas computacionais de representação

do conhecimento são essencialmente estáticos e incapazes de modelar apropriadamente a dimensão temporal e os relacionamentos de contexto dinâmico entre entidades e seus atributos.

Embora modelos tenham sido alvo de severo criticismo, principalmente em vista do seu reducionismo e limitações para capturar integralmente a complexidade inerente da realidade (Briassoulis, 2000), pode-se argumentar em prol de sua existência e continuidade, pois eles oferecem uma maneira incomparável de se abstrair padrões, ordem e tendências dinâmicas diretrizes de processos do mundo real.

Conforme exposto por Batty (1976, p. 354), “... padrão e ordem existem de fato, e é relativamente fácil identificá-los ... em sistemas urbanos e regionais. Se uma pessoa concorda ou não com a descrição estatística desses padrões é uma questão de opinião, e ultimamente de fé nas idéias fundamentais.”

Na verdade, modelos urbanos devem ser concebidos, manipulados, aplicados e interpretados de uma forma sábia e crítica, de modo que os modeladores, planejadores, tomadores de decisão da esfera pública e privada, assim como cidadãos de maneira geral possam extrair o melhor de seus resultados e sensatamente reconhecer os seus limites. Essas idéias são bem sintetizadas por Batty (1976, p. 353), ao afirmar que “é necessário uma perspectiva mais liberal no estado-da-arte de todos aqueles envolvidos em modelagem urbana, promovendo assim a visão de que modelos são auxílios à imaginação dentro de um processo maior de projeto, solução de problemas e tomada de decisão na sociedade como um todo.”

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBIN, P. S. **The analysis of complex socioeconomic systems**. Lexington, MA: D. C. Heath, 1975.

ALLEN, P. M.; ENGELEN, G.; SANGLIER, M. Towards a general dynamic model of the spatial evolution of urban systems. In: Hutchinson, B.; Batty, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 199-220.

ALLEN, P. M.; SANGLIER, M.; BOON, F. Intra-urban evolution - Part II. In: Kahn, D. ed. **Models of urban settlement and structure as dynamic self-organizing systems**. Washington, D. C.: US Department of Transportation, 1981.

ALMEIDA, C. M.; BATTY, M.; MONTEIRO, A. M. V.; CÂMARA, G.; Soares- Filho, B. S.; CERQUEIRA, G. C.; PENNACHIN, C. L. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 27, n. 5, p. 481-509, 2003.

ALMEIDA, C. M.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; SOARES-FILHO, B. S.; CERQUEIRA, G. C. Modelos Celulares de Dinâmicas Espaço-Temporais: Aplicações em Estudos Urbanísticos. In: Câmara, G.; Meirelles, M. ed. **Fundamentos de Geomática: Princípios e Aplicações**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2005. No prelo.

ALONSO, W. A general theory of the urban land market. **Papers and Proceedings of the Regional Science Association**, v. 6, p. 149-158, 1960.

BAK, P.; CHEN, K.; CREUTZ, M. Self-organized criticality in the Game of Life. **Nature**, v. 342, p. 780-782, 1989.

BAKER, W. L. A review of models of landscape change. **Landscape Ecology**, v. 2, n. 2, p. 111-133, 1989.

BATTY, M. Modeling cities as dynamic systems. **Nature**, v. 231, p. 425-428, June 1971.

BATTY, M. **Urban modelling**: algorithms, calibrations, predictions. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1976. 381 p.

BATTY, M. GeoComputation using cellular automata. In: Openshaw, S.; Abraham, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 5, p. 95-126.

BATTY, M. **The emergence of cities**: complexity and urban dynamics. 2003. Disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper64.pdf>. Acessado em 12/07/03.

BATTY, M.; COUCLELIS, H.; EICHEN, M. Urban systems as cellular automata. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 159-164, 1997.

BATTY, M.; JIANG, B.; Thurstain-Goodwin, M. **Local movement**: agent-based models of pedestrian flow. 1998. Disponível em <http://www.casa.ucl.ac.uk/local_movement.doc>. Acessado em 03/08/02.

BATTY, M.; LONGLEY, P. Cities as fractals: simulating growth and form. In: Crilly, T.; Earnshaw, R. A.; Jones, H. ed. **Fractals and chaos**. New York: Springer Verlag, 1991. p. 41-69.

BATTY, M.; LONGLEY, P. **Fractal cities**: a geometry of form and function. London: Academic Press, 1994.

BATTY, M.; XIE, Y. Possible urban automata. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 175-192, 1997.

BEAUMONT, J. R.; CLARKE, M.; WILSON, A. G. The dynamics of urban spatial structure: some explanatory results using difference equations and bifurcation theory. **Environment and Planning A**, v. 13, p. 1473-1483, 1981.

BENENSON, I; TORRENS, P. M. Geosimulation - object-based modeling of urban systems: editorial. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 28, p. 1-8, 2004.

BERLEKAMP, E. R.; CONWAY, J. H.; GUY, R. K. **Winning ways for your mathematical**

plays. New York: Academic Press, 1982.

BERTALANFFY, L. von. An outline of general systems theory. **British Journal of the Philosophy of Science**, v. 1, p. 134-165, 1951.

BLOKLAND, J.; HENDRICKS, A. J.; PAELINCK, J. H. P. **Elements for the construction of a simple model for a stagnating town**. Amsterdã: Regional Science Association - Dutch Meeting, 1972.

BOYCE, D. E. **Equilibrium solutions to combined urban residential location, modal choice, and trip assignment models**. Philadelphia: Regional Science Research Institute, 1977. (RSRI Discussion Paper, n. 98).

BRIASSOULIS, H. **Analysis of land use change: theoretical and modeling approaches**. Lesvos, Greece. Tese (Doutorado em Geografia) - University of Aegean, 2000. Disponível em <<http://www.rri.wvu.edu/WebBook/Briassoulis/contents.htm>>. Acessado em 28/10/02.

BURROUGH, P. A. Dynamic modelling and geocomputation. In: Longley, P. A.; Brooks, S. M.; McDonnell, R.; MacMillan, B. ed. **Geocomputation: a primer**. Chichester: John Wiley & Sons, 1998. Cap. 9, p. 165-192.

BUTLER, E. W. **Moving behavior and residential choice**. Washington, D.C.: Highway Research Board, 1969. (Report n. 81).

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; MEDEIROS, J. S. Representações computacionais do espaço: fundamentos epistemológicos da ciência da geoinformação. **Geografia**, v. 28, n.1, p. 83-96, 2003.

CHADWICK, G. **Una vision sistematica del planeamiento**. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1973. 283 p.

CHAPIN JR., F. S.; KAISER, E. J. **Urban land use planning**. Urbana: University of Illinois Press, 1979.

CHAPIN JR., F. S.; WEISS, S. F. **Factors influencing land development**. Chapel Hill: Institute for Research in Social Science - University of North Carolina, 1962.

CHAPIN JR., F. S.; WEISS, S. F. A probabilistic model for residential growth. **Transportation Research**, v. 2, p. 375-390, 1968.

CLARK, C. Urban population densities. **Journal of the Royal Statistical Society A**, v. 114, p. 490-496, 1951.

CLARKE, K. C.; GAYDOS, L. J. Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth predictions for San Francisco and Baltimore. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 12, p. 699-714, 1998.

CLARKE, K. C.; HOPPEN, S.; GAYDOS, L. J. A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 247-261, 1997.

COELHO, J. D.; WILLIAMS, H. C. W. L. On the design of land use plans through locational surplus maximization. **Papers of the Regional Science Association**, v. 40, p. 71-85, 1978.

COSTA, P.; PIASENTIN, U. **Un modello di simulazione dello sviluppo urbano di Venezia**. Venice: Symposium on Trends in Mathematical Modelling – UNESCO, 1971.

- COUCLELIS, H. Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. **Environment and Planning A**, v. 17, p. 585-596, 1985.
- COUCLELIS, H. Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. **Environment and Planning A**, v. 20, p. 99-109, 1988.
- COUCLELIS, H. From cellular automata to urban models: new principles for model development and implementation. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 165-174, 1997.
- CRECINE, J. P. **TOMM** (Time oriented metropolitan model). Pittsburgh: Department of City Planning, 1964. (CRP Technical Bulletin, n. 6).
- CRECINE, J. P. **A dynamic model of urban structure**. Santa Monica: RAND Corporation, 1968. (P-3803).
- CZAMANSKI, S. A method of forecasting metropolitan growth by means of distributed lags analysis. **Journal of Regional Science**, v. 6, p. 35-49, 1965.
- DEADMAN, P.; BROWN, R. D.; GIMBLETT, P. Modelling rural residential settlement patterns with cellular automata. **Journal of Environmental Management**, v. 37, p. 147-160, 1993.
- DIPLOCK, G. Genetic programming: a new approach to spatial model building. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 9, p. 219-252.
- ECHENIQUE, M. **Models: a discussion**. Cambridge, UK: University of Cambridge, 1968. (Land Use and Built Form Studies, WP 6).
- ENGELEN, G.; WHITE, R.; ULJEE, I. Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy making. In: Timmermans, H. P. J. ed. **Decision support systems in urban planning**. London: E&FN Spon, 1997. Cap. 8, p. 125-155.
- FAO/IIASA. **Agro-ecological assessments for national planning: the example of Kenya**. Rome: FAO, 1993. (FAO Soils Bul, n. 67).
- FERREIRA, A. B. H. **Novo dicionário da língua portuguesa**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1986. 1838 p.
- FISCHER, M. M.; ABRAHART, R. J. Neurocomputing – tools for geographers. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 8, p. 187-217.
- FORRESTER, J. W. **Urban dynamics**. Cambridge, Mass: MIT Press, 1969.
- FORRESTER, J. W. **World dynamics**. Cambridge, Mass: Wright-Allen Press, 1971.
- GARDNER, M. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'Life'. **Scientific American**, v. 223, p. 120-123, 1970.
- HARRIS, B. Bridging the gap between theory and practice in urban planning. In: Pack, J. ed. **Proceedings of the Conference on the Use of Models by Planning Agencies**. Philadelphia: University of Pennsylvania, 1975.

- HERBERT, J. D.; STEVENS, B. H. A model for the distribution of residential activity in urban areas. **Journal of Regional Sciences**, v. 2, p. 21-36, 1960.
- HILL, D. M. A growth allocation model for the Boston region. **Journal of the American Institute for Planners**, v. 31, p. 111-120, 1965.
- HOOVER, E. M.; GIARRATANI, F. **An introduction to regional economics**. New York: Alfred K., 1984.
- JOHNSTON, R. J.; GREGORY, D.; SMITH, D. M. **The dictionary of human geography**. Oxford: Blackwell, 1994.
- JONES, A.; CLARK, J. Driving forces behind European land use change: an overview. In: The user needs for more harmonized land use information at the national and EU level. **Report on the CLAUDE** (Coordinating Land Use and Cover Data Analyses in Europe) **Workshop**. Wageningen: CLAUDE, Concerted Action, EC, 1997. v. DGXII, p. 24-31.
- LAKSHMANAN, T. R. An approach to the analysis of intra-urban location applied to the Baltimore region. **Economic Geography**, v. 40, p. 348-370, 1964.
- LAKSHMANAN, T. R. A model for allocating urban activities in a state. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 1, p. 283-295, 1968.
- LAKSHMANAN, T. R.; HANSEN, W. G. A retail market potential model. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 31, p. 134-143, 1965.
- LATHROP, G. T.; HAMBURG, J. R. An opportunity-accessibility model allocating regional growth. **Journal of the American Institute of Planners**, v. 31, p. 95-103, 1965.
- LEONARDI, G. A general accessibility and congestion-sensitive multi-activity spatial interaction model. **Papers of the Regional Science Association**, v. 47, p. 3-17, 1981.
- LI, X.; YEH, A. G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 2, p. 131-152, 2000.
- LOWRY, I. S. **A model of metropolis**. Santa Monica: RAND Corporation, 1964. (RM-4035-RC).
- MERLIN, P. **Méthodes quantitatives et espace urbain**. Paris: Masson et Cie Éditeurs, 1973. 190 p.
- MOORE, T. Geospatial expert systems. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 6, p. 127-159.
- NOVAES, A. G. **Modelos em planejamento urbano, regional e de transportes**. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1981. 290 p.
- O'SULLIVAN, D. **Graph-based cellular automaton models of urban spatial processes**. London. 317p. Tese (Doutorado em Geografia) – Centre for Advanced Spatial Analysis of the University College London (CASA-UCL), 2000.
- OPPENHEIM, N. A critical survey of current developments in urban and regional modelling. In: Hutchinson, B.; Batty, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 41-54.

OPENSHAW, S. GeoComputation. In: Openshaw, S.; Abrahart, R. J. ed. **Geocomputation**. New York: Taylor & Francis, 2000. Cap. 1, p. 1-31.

PAELINCK, J. H. P. Dynamic urban growth models. **Papers of the Regional Science Association**, v. 24, p. 25-37, 1970.

PAPINI, L.; RABINO, G. A.; COLONNA, A.; DI STEFANO, V.; LOMBARDO, S. (1998) Learning cellular automata in a real world: the case study of the Rome metropolitan area. In Bandini, S.; Serra, R.; Liverani, F. S. ed. Cellular automata: research towards industry. **ACRI'96: Proceedings of the Third Conference on Cellular Automata for Research and Industry**. London: Springer-Verlag, 1998. p. 165-183.

PERRATON, J.; BAXTER, R. **Models, evaluations & information systems for planners**. Lancaster: MTP Construction, 1974. 305 p.

PHIPPS, M. Dynamical behaviour of cellular automata under constraints of neighbourhood coherence. **Geographical Analysis**, v. 21, p. 197-215, 1989.

PHIPPS, M.; LANGLOIS, A. Spatial dynamics, cellular automata and parallel processing computers. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 193-204, 1997.

POPPER, K. R. **Objective knowledge**. Oxford, UK: Oxford University Press, 1972.

PORTER, H. R.; HENLEY, E. J. Applications of the Forrester model to Harris County, Texas. In: Chen, K. ed. **Urban dynamics: extensions and reflections**. San Francisco: San Francisco Press Inc., 1972.

PORTUGALI, J.; BENENSON, I.; OMER, I. Spatial cognitive dissonance and sociospatial emergence in a self-organizing city. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 263-285, 1997.

PORTUGALI, J.; BENENSON, I.; Omer, I. City: the greens and the blues. In: Portugali, J. ed. **Self-organization and the city**. Berlin: Springer Verlag, 1999. Cap. 5.

SCHELHORN, T.; O'SULLIVAN, D.; HAKLAY, M.; THURSTAIN-GOODWIN, M. **Streets: an agent-based pedestrian model**. 1999. Disponível em < <http://www.casa.ucl.ac.uk/streets.pdf>>. Acessado em 31/07/02.

SANDERS, L.; PUMAIN, D.; MATHIAN, H.; GUÉRIN-PACE, F.; BURA, S. SIMPOP: a multi-agent system for the study of urbanism. **Environment and Planning B**, v. 24, n.2, p. 287-305, 1997.

SEIDMAN, D. R. **The construction of an urban growth model**. Philadelphia: Delaware Valley Regional Planning Commission, 1969. (DVRPC Plan - Report n. 1).

SEMBOLONI, F. An urban and regional model based on cellular automata. **Environment and Planning B**, v. 24, p. 589-612, 1997.

SKOLE, D. L. Data on global land-cover change: Acquisition, assessment, and analysis. In: Meyer, W. B.; Turner, B. L. II. Ed. **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. p. 437-471.

SOBREIRA, F.; GOMES, M. **The geometry of slums: boundaries, packing and diversity**. 2001. Disponível em < <http://www.casa.ucl.ac.uk/paper30.pdf>>. Acessado em 09/11/01.

TAKEYAMA, M.; COUCLELIS, H. Map dynamics: integrating cellular automata and GIS through geo-algebra. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 11, p. 73-91, 1997.

THOMPSON, A. **Chaos theory** – definition of chaos explained. 1997. Disponível em <<http://www.galactic-guide.com/articles/8R85.html>>. Acessado em 31/07/03.

TOBLER, W. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. **Economic Geography**, v. 26, p. 234-240, 1970.

TOBLER, W. Cellular geography. In: **Philosophy in geography**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Co., 1979. p. 379-386.

TORRENS, P. M. **Automata-based models of urban systems**. 2003. Disponível em <http://www.geogr.ku.dk/courses/phd/gis-model/Torrens_automata_based_models_of_urban_systems.pdf>. Acessado em 18/05/03.

TORRENS, P. M.; O'SULLIVAN, D. Cellular automata and urban simulation: where do we go from here? editorial. **Environment and Planning B**, v. 28, p. 163-168, 2001.

TURNER, B. L. II; MEYER, B. L. Global land use and land cover change: An overview. In: Meyer, W. B.; Turner, B. L. II. Ed. **Changes in land use and land cover: a global perspective**. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1994. p. 3-10.

WARD, D. P.; MURRAY, A. T.; PHINN, S. R. **An optimized cellular automata approach for sustainable urban development in rapidly urbanizing regions**. 1999. Disponível em <http://www.geovista.psu.edu/sites/geocomp99/Gc99/025/gc_025.htm>. Acessado em 30/10/02.

WEGENER, M. New spatial planning models. **Emerging Directions in Urban Planning Research Seminar**. Enschede: ITC, 2000.

WEGENER, M.; GNAD, F.; VANNAHME, M. The time escala of urban change. In: Hutchinson, B.; Batty, M. ed. **Advances in urban systems modelling**. Amsterdam: Elsevier, 1986. p. 175-197.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land use patterns. **Environment and Planning A**, v. 25, p. 1175-199, 1993.

WHITE, R.; ENGELEN, G. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B**, v. 24, n. 2, p. 235-246, 1997.

WHITE, R.; ENGELEN, G. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 24, p. 383-400, 2000.

WHITE, R.; ENGELEN, G.; ULJEE, I. **Vulnerability assessment of low-lying coastal areas and small islands to climate change and sea level rise – Phase 2: Case study St. Lucia**. Kingston, Jamaica: United Nations Environment Programme: Caribbean Regional Coordinating Unit, 1998.

WILSON, A. G. **Entropy in urban and regional modeling**. London: Pion Press, 1970.

WINGO, L. **Transportation and urban land**. Washington, D. C.: Resources for the Future

Inc., 1961.

WOLFRAM, S. Statistical mechanics of cellular automata. **Review of modern physics**, v. 55, p. 601-643, 1983.

WOLFRAM, S. Universality and complexity in cellular automata. **Physica**, v. 10D, p. 1-35, 1984.

WOLMAN, M. G. Criteria for land use. In: McLare, D. J.; Skinner, B. J. ed. **Resources and world development**. New York: John Wiley, 1987. p. 643-657.

WU, F. A linguistic cellular automata simulation approach for sustainable land development in a fast growing region. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 20, n.6, p. 367-387, 1996.

WU, F. Simland: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 1, p. 63-82, 1998.

XIA, L.; YEH, A. G. Modelling sustainable urban development by the integration of constrained cellular automata and GIS. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 14, p. 131-152, 2000.

MODELAGEM DE DINÂMICA INTRA-URBANA NO BAIRRO SAVASSI, BELO HORIZONTE, BRASIL

Marcela Maria Guimarães Godoy¹, Britaldo Silveira Soares-Filho²

¹Anglogold Ashanti Mineração Ltda, Praça do Mineiro, 83, Nova Lima, 34000.000, MG.
marcelamgg@yahoo.com

²Centro de Sensoriamento Remoto/Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional -
Universidade Federal de Minas Gerais. Av. Antônio Carlos 6627, Belo Horizonte, 31270-
901, MG. britaldo@csr.ufmg.br

RESUMO

Este trabalho apresenta um modelo espaço-temporal para análise e simulação das mudanças de uso do solo urbano no bairro da Savassi de 1985 a 2004, Belo Horizonte. Essa área de estudo representa uma importante referência comercial para a cidade de Belo Horizonte, embora esteja necessitando atualmente de um novo modelo para a revitalização de seu setor econômico. São analisados dois períodos: 1985 a 1996, de ascensão de um vívido comércio de rua na região, e 1996-2004, de declínio desse comércio e de transformação da Savassi em uma zona de serviços. A base conceitual para o desenvolvimento do modelo de simulação espacial foi a técnica de autômatos celulares, implementada no software DINAMICA. Os resultados das simulações entre 1996-2004 aproximaram dos padrões históricos de mudanças e as projeções para 2020 demonstraram a tendência do bairro de transformação para uma zona predominantemente de serviços, com a conseqüente concentração de áreas comerciais em núcleos restritos, como galerias e centros comerciais. A utilização desse modelo de simulação de mudanças, portanto, se mostrou apropriada como um instrumento de auxílio ao planejamento urbano, visando antever implicações urbanísticas advindas da dinâmica de uso do solo.

ABSTRACT

We have developed a space-time model to analyze and simulate the land use changes from 1985 to 2004 in the Savassi neighborhood, Belo Horizonte, Brazil. The study area represents an important commercial reference to the city of Belo Horizonte, although it currently needs a new model for revitalization of its economic sector. We analyzed two periods: 1985 to 1996, of rising of a burgeoning street commerce in the region, and 1996-2004, of decline of this commerce and intense transformation of Savassi into a service zone. The conceptual basis for the development of the spatial simulation model was the technique of cellular automata, implemented in the software DINAMICA. Results from simulations for 1996-2004 period approached the historical spatial patterns of change and projections to 2020 demonstrated the trend of this neighborhood in transforming itself in a major service zone, thus concentrating commercial establishments to a few shopping malls. Therefore, the utilization of this land-use simulation model showed its potential as a tool to be used in urban planning, aiming to foresee urbanistic implications due to land-use dynamics.

INTRODUÇÃO

A cidade é um fenômeno vivo no qual os limites entre o econômico, o social e o político não param de se recompor em expansão e transformação permanente. O crescimento e mudanças urbanas consistem em um processo dirigido pelo crescimento demográfico, políticas públicas e impulsionado pelas atividades comerciais, industriais e de serviços. São esses segmentos que determinam o dinamismo, crescimento e conformação do espaço urbano e orientam o cotidiano da cidade. Para o melhor entendimento desse processo de evolução urbana é necessário o desenvolvimento de métodos de representação dessas informações em constante mutação (Batty *et al.*, 2004). Isso hoje representa um grande desafio aos sistemas de geoinformação, ainda fortemente baseados numa visão estática da realidade geográfica.

O advento dos modelos espaciais dinâmicos, nos quais o estado ou atributo de uma certa localização terrestre muda ao longo do tempo em resposta a forças dirigidas (Burrough, 1998), abre um novo campo de possibilidades para a representação da dinâmica urbana. Dentre esses modelos, encontram-se os sistemas baseados em autômatos celulares. Sua abordagem trata o espaço como um arranjo de células no qual cada célula pode assumir diferentes estados ao longo do tempo em função dos estados das demais células em sua vizinhança, segundo um conjunto específico de regras de transição (White e Engelen, 2000). Todas as transições ocorrem simultaneamente e o tempo avança em intervalos discretos. Apesar de sua simplicidade, essa abordagem é bastante poderosa no que tange à modelagem de fenômenos urbanos, devido à sua facilidade de manuseio e flexibilidade em se adaptar a diferentes abstrações da realidade geográfica. Por isso, ela tem sido amplamente utilizada por vários pesquisadores para a representação da dinâmica das cidades, como no exemplo dos trabalhos de Wu (1998), White *et al.* (2000) e Almeida *et al.* (2003). Esses modelos visam subsidiar o planejamento urbano e regional, tendo em vista que a informação sobre as tendências de mudança no uso do solo é necessária para uma grande variedade de propósitos para fins de tomadas de decisão. Por exemplo, as tendências de uso do solo consistem num importante critério para a seleção de áreas que necessitem de implementação de projetos de expansão urbana, melhoria das vias de circulação, qualidade residencial e ambiental, instalação de equipamentos urbanos e mesmo revitalização do setor comercial.

Neste trabalho, foi escolhido o software DINAMICA, um tipo genérico de autômato celular (Soares *et al.*, 2002; 2005 e no prelo), para desenvolver um modelo espaço-temporal de análise e simulação das mudanças no uso do solo no Bairro Savassi, Belo Horizonte, ocorridas entre os períodos 1985-1996 e 1996-2003/2004. Como abordagem do DINAMICA, a paisagem urbana é representada por uma estrutura matricial, na qual cada célula possui um estado que pode ser transacionado para outro dependendo de uma dinâmica pré-quantificada e da configuração de sua vizinhança espacial. Portanto, é formulada a hipótese que determinadas variáveis territoriais controlam as transições de uso do solo e o padrão espacial dessas mudanças ao longo de um período observado. De maneira generalizada, as etapas de construção do modelo em questão consistiram em: 1) montagem de uma base digital com mapas multitemporais de uso solo; 2) quantificação das taxas de mudanças; 3) determinação de variáveis que, como marcos urbanos e arquitetônicos, influenciam a dinâmica de uso do solo; 4) calibração e validação do sistema de simulação visando à reprodução da dinâmica intra-urbana observada e 5) prognóstico para o ano de 2020, usando-se a tendência do período mais recente (1996-2003/2004).

Como resultado, o presente modelo pretende mostrar não só a tendência de dinâmica urbana do bairro da Savassi, mas também identificar seus principais vetores de mudanças e com isso possibilitar antever possíveis configurações espaciais resultantes desse cenário tendencial e suas implicações urbanísticas. Como contribuição, se disponibiliza esse instrumento de modelagem para fins de construção de cenários prospectivos, visando buscar a formulação de propostas para revitalização desse bairro, pelo qual a população de Belo Horizonte tem tanto apreço.

O BAIRRO SAVASSI

A fundação da cidade de Belo Horizonte, em 1897, foi conseqüência da necessidade de uma capital de Estado que equilibrasse as suas regiões e amenizasse os desníveis econômicos existentes na época, bem como uma representação do surgimento de uma nova era, uma vez que, com a Proclamação da República, a cidade de Ouro Preto passou a ser a simbologia da dominação colonial e do poder monárquico. Belo Horizonte nasceu assim planejada de acordo com a ordem positivista, conseqüência do desdobramento do Iluminismo em suas manifestações do final do século XIX. O seu projeto original propunha

espaços de primeira categoria, com zonas urbanas compostas por um meticuloso traçado ortogonal de ruas, bem como avenidas amplas e arborizadas, planejadas para serem ocupadas imediatamente. Os espaços de segunda categoria possuíam zonas suburbanas (separadas das zonas urbanas pela Avenida do Contorno) e zonas rurais (destinadas a constituir o cinturão verde da cidade), tendo padrões mais flexíveis de urbanização e servindo como futuras áreas de expansão da cidade (Monte-Mór *et al.*, 1994).

Dentre os bairros contidos pelo anel da Av. do Contorno, a região centro-sul, conhecida como bairro dos funcionários, pois foi ocupada originalmente pelos funcionários públicos que se mudaram para a nova capital, destacou-se nas décadas de 80 e 90 pela forte valorização do seu metro quadrado. Dessa região, se desmembrou em 1991 o Bairro Savassi (Lei municipal 5872) devido a sua importância econômica, sobretudo, advinda do comércio (Fig. 1).

A história do Bairro Savassi está ligada a uma outrora padaria. Quando a praça 13 de Maio (atual Diogo de Vasconcelos ou Praça da Savassi) foi inaugurada, nos primeiros anos da nova capital mineira, não se poderia prever que a região se transformaria em um dos pontos mais conhecidos de Belo Horizonte. No ano de 1940, o comerciante Arthur Savassi, proprietário de uma fábrica de laticínios, resolveu inaugurar uma padaria na Praça 13 de Maio, que logo ficou bastante conhecida em virtude dos seus apetitosos produtos. O pão da “padaria Savassi” estava tão conhecido que, aos poucos, o entorno do estabelecimento começou a ser conhecido pelo nome da padaria.

Nos anos 80, a Savassi ganhou alguns quarteirões fechados, o que criava um ponto de parada de pessoas de todas as idades que procuravam uma paquera ou uma sombra para descansar. Seus arredores passaram a se destacar na época pelo seu próspero comércio, sobretudo de artigos de fino vestiário. Com o advento dos “shopping centers” no início dos anos 90, houve uma retração desse comércio de lojas de fachada de rua, pois a facilidade de estacionamento e a maior segurança desses centros comerciais os tornaram muito mais atrativos.

Dentre as transformações sofridas pela região do bairro Funcionários até os dias de hoje, destacam-se as três mais significativas para a região. A primeira delas é a transformação de uma região do bairro dos funcionários e partes de outros bairros em bairro Savassi. A

representações estáticas, comumente utilizadas em sistemas de informações geográficas tradicionais, não os representam de maneira adequada (Batty *et al.*, 2004).

O objetivo dos modelos espaço-temporais é a análise e simulação numérica de processos do mundo real em que os estados do modelo se modificam ao longo do tempo em função de diversas condições de entrada. Nesse aspecto, um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial é o desenvolvimento de métodos de abstrações que tenham a capacidade de representar adequadamente os fenômenos espaço-temporais, gerando, como resultado, a descrição das mudanças nos padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo (Câmara e Monteiro, 2003).

Para este estudo, utiliza-se um modelo de simulação baseado no sistema de autômatos celulares. Os autômatos celulares são conjuntos de células que interagem, permitindo a criação de pontes entre representações micro e macroscópicas. Normalmente, no autômato celular, o próximo estado de uma célula depende do seu estado atual e do estado das células vizinhas. Os autômatos celulares, portanto, consistem numa ferramenta para construção de modelos dinâmicos para diversas aplicações – e.g. espalhamento de fogo (Karafyllidis e Thanailakis, 1997), propagação de epidemia (Sirakoulis *et al.*, 2000) e desmatamento (Soares-Filho *et al.*, 2004 e Soares-Filho *et al.*, 2006).

Neste estudo, utiliza-se o software DINAMICA como plataforma do modelo de simulação. O DINAMICA emprega, como entrada, um conjunto de mapas, a saber: o mapa de uso do solo, também conhecido como mapa de paisagem, entendendo-se assim a paisagem como um arranjo bidimensional de usos do solo; o mapa de tempo de permanência que guarda o tempo de permanência de cada célula em seu estado atual e dois conjuntos de variáveis cartográficas que são divididas em estática e dinâmicas, posto que essas últimas se alteram durante a execução do modelo. São esses dois conjuntos de variáveis que supostamente controlam a localização das mudanças (Fig. 2). Essas variáveis são combinadas, pelo somatório de seus pesos de evidências (Goodacre *et al.*, 1993; Bonham-Carter, 1994 e Soares-Filho *et al.*, 2005), com o objetivo de gerar os mapas de probabilidade de mudanças, os quais indicam as áreas mais favoráveis para uma determinada transição. (Soares-Filho *et al.*, 2002; 2004 e 2005). Pesos de evidência consiste em um método Bayesiano, no qual o efeito de cada variável espacial em uma determinada transição pode ser calculado

independentemente de uma solução combinada. A única condição que deve ser assumida é que os mapas de entrada sejam espacialmente independentes. Para assegurar essa condição, utiliza-se um conjunto de medidas como os testes de *Cramer* e da *Incerteza da informação conjunta* (Bonham-Carter, 2004). Variáveis correlacionadas ou são eliminadas ou combinadas em uma terceira que entrará no modelo integrado. Como resultado, os relacionamentos calculados pelo método de pesos de evidência são utilizados para parametrizar e calibrar o modelo de simulação no tocante à configuração espacial das mudanças.

Em seqüência, um outro componente do modelo, a função de transição opera sobre os mapas de probabilidade gerados, buscando realizar as quantidades desejadas de mudanças através de sorteio de células, após o ordenamento de suas probabilidades. As quantidades de mudanças são determinadas *a priori* pela obtenção da matriz de transição que é passada ao modelo como entrada. Portanto, a validação do modelo diz respeito apenas a localização espacial das mudanças e não suas quantidades. Como regra local do autômato celular, duas funções de transição são empregadas (*patcher e expander*) pelo DINAMICA para reproduzir os padrões espaciais, cujos parâmetros de entrada são o tamanho médio, variância e forma das manchas de mudanças a serem simuladas (Soares-Filho *et al.*, 2002).

O último procedimento a ser executado é a validação que consiste no cotejo dos resultados do modelo com uma situação de referência, no caso um mapa de uso do solo do tempo final da simulação. Diversas técnicas de comparação de mapas já foram desenvolvidas, em exemplo os trabalhos de Costanza (1989), Pontius (2002), Power *et al.* (2001) e Hagen (2003). Embora ainda não haja consenso qual seria a técnica mais apropriada e nem qual ajuste definiria um limiar de aceitação/rejeição do modelo, atualmente as técnicas de comparação em múltiplas resoluções – que levam em conta não apenas o ajuste célula à célula, mas dentro de crescentes janelas de mapa – têm ganhado destaque. Nesse sentido, foi incorporado na plataforma do DINAMICA o método *fuzzy* de comparação de mapas desenvolvido por Hagen (2003). Esse ajuste usa uma função de decaimento exponencial com a distância para comparar a distribuição de classes de células ao redor de uma célula central. Em geral, aceita-se que um modelo apresenta bons resultados quando seu ajuste é superior ao obtido de uma comparação entre o mapa final e inicial (Hagen, 2003).

Apesar do estudo envolver dois períodos do tempo (1985-1996, 1996-2003/2004). O modelo de simulação só foi implementado para o último período. Após a sua validação, foi feita uma projeção até o ano de 2020, usando-se a tendência desse período.

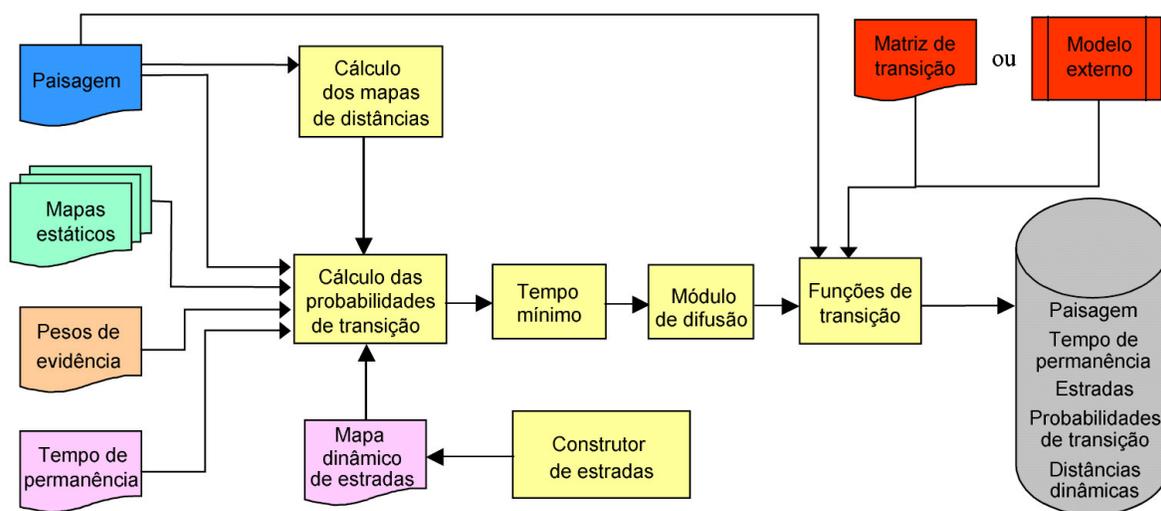


Fig. 2. Arquitetura do software DINAMICA 2.x

ESTRUTURAÇÃO DA BASE DE DADOS MULTITEMPORAIS

O Bairro Savassi possui limites definidos em Lei. Porém, com objetivo de enriquecimento da análise, foram incluídos dois quarteirões a leste da área limite definida pela lei municipal e dois quarteirões ao norte (Fig. 1), haja vista que a Rua da Bahia e a Av. Brasil não representam barreiras urbanas para o seu desenvolvimento, ocupação e uso do solo. A metodologia aplicada neste estudo foi desenvolvida conforme fluxograma apresentado na Fig. 3.

Tratando-se de um modelo em escala local, como unidade espacial mínima foi definido o lote, como aprovado na planta de parcelamento da Prefeitura Municipal de Belo Horizonte. A classificação dos tipos de uso do solo é diversa e possui várias referências na literatura (Jensen e di Gregorio, 2002). A definição mais simples do conceito de uso do solo refere-se à maneira pela qual o solo é utilizado pelo Homem, ou seja, ao propósito ou função que é dado à parcela de solo. Neste trabalho, utilizar-se á como referência classificatória a definição estabelecida pela Lei de Uso e Parcelamento do Solo da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH, 1996). O uso do solo foi mapeado, selecionando-se três anos específicos que são 1985, 1996 e 2003/2004.

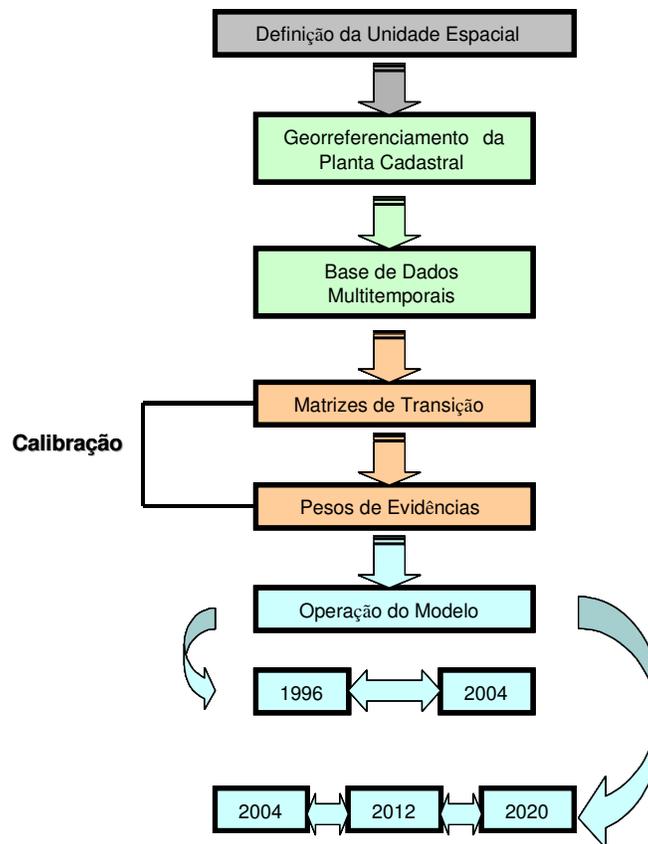


Fig. 3. Fluxograma do trabalho.

Para 1985 e 1996, foram resgatadas informações através da pesquisa denominada “Percurso” realizada pela Empresa de Processamento de Dados de Belo Horizonte (Prodabel) nessas duas datas. Vale a pena ressaltar que para tais dados desconhece-se o método de pesquisa utilizado, bem como os critérios de classificação dos usos do solo. Para compilação e padronização desses dados, o primeiro passo realizado foi a obtenção de cópias analógicas de microfilmes existentes na Prodabel. Essas cópias foram capturadas por *scanner*, utilizando-se a definição de 300 dpi, e georreferenciadas, tendo como base a própria base de cadastro digital desse órgão, pois os mapas em microfilme não possuíam coordenadas de referência. Esses mapas foram então vetorizados e armazenados em um SIG comercial.

Para identificação do uso no bairro em 2003/2004 foi efetuado um trabalho em campo, cuja classificação utilizada foi baseada no mesmo conceito da Lei de Uso e Ocupação do Solo (PBH, 1996). A pesquisa foi realizada através de registros fotográficos das fachadas dos imóveis de toda a região de estudo e de visitas à área para esclarecimento de possíveis

dúvidas geradas pelo levantamento fotográfico. Nessa pesquisa, foram levantados os usos de 1681 lotes que compõem a região de estudo. Os dados coletados foram atribuídos aos lotes da planta de parcelamento já em formato vetorial.

Considerando que os dados vieram de fontes diversas, fez-se necessária a padronização dos dados a fim de se estabelecer um só conceito classificatório. Desse modo, a classificação final para os usos do solo adotou cinco classes individuais, a saber: 1 - Uso Comercial (CO) ; 2 - Uso Residencial (RS); 3 - Uso de Serviços (SV); 4 - Uso Institucional (IT) ; 5 - Lote Vago (LV). Algumas combinações desses usos individuais foram encontradas, sendo que as combinações que fossem superiores a 03 (três) usos por unidade espacial foram reclassificadas para 6 - Uso Misto (MI). Ainda os lotes cujas informações não puderam ser recuperadas foram classificados como: 7 - Sem Informação (SI). Outras combinações de uso do solo encontradas foram: 8. Uso Comercial e de Serviços (COSV); 9. Uso Residencial e de Serviços (RSSV); 10. Uso Comercial e Residencial (CORS) (Fig. 4).

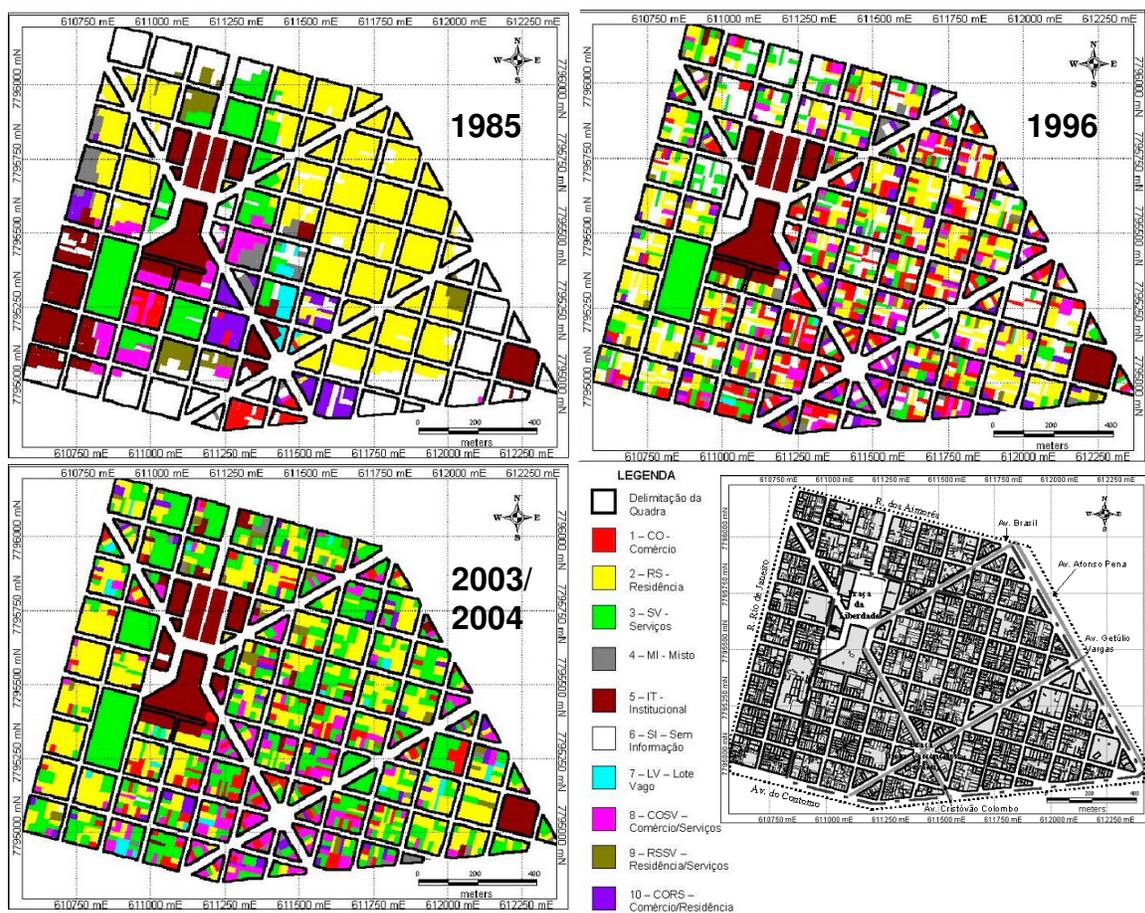


Fig. 4. Mapas de uso do solo na região da Savassi nas três datas estudadas.

ANÁLISE DAS MUDANÇAS

A Fig. 4 permite uma análise da dominância de usos do solo no instante das datas observadas, na qual se nota uma nítida e crescente descentralização das atividades de uso do solo, reflexo da nova Lei do Uso do Solo, aprovada e implementada em 1985; tendência que se confirma para o período de 1996-2003/2004, pois a Lei de 1996 se espelha nos mesmos conceitos de pluralismo e flexibilidade (PBH, 1985; 1996). Observa-se assim a tendência nos últimos anos de expansão do uso de serviço e subsequente concentração de comércio e uso misto de comércio e serviço ao redor da Praça da Savassi (Praça Diogo Vasconcelos). Também, a região leste da Savassi, tradicionalmente residencial em 1985, sofre uma profunda transformação, inicialmente com a implantação de pontos de comércio e mais tarde com a invasão dos usos de serviço.

A transformação sofrida ao longo do tempo analisado está sintetizada pela Fig. 5, na qual se observa a ascensão do comércio entre 1985 e 1996, com conseqüente redução do uso residencial, e entre 1996-2004 a trajetória recente de expansão dos usos de serviço sobre as áreas de comércio, enquanto o uso residencial se mantém praticamente estável.

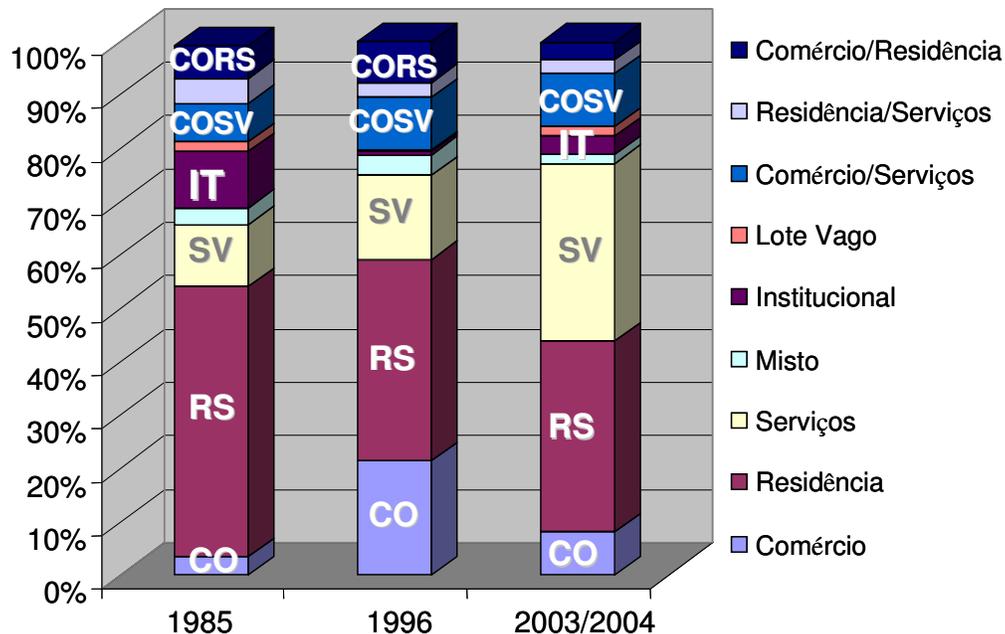


Fig.5. Distribuições dos usos do solo na região da Savassi nas três datas estudadas.

A análise de lotes vagos na região é bastante interessante. Observa-se uma grande queda até meados da década de 90 e retomada do seu crescimento em 2004. Isto pode ser explicado pela especulação imobiliária. Nessa área, o lote é bastante valorizado. Como conseqüência,

uma prática comum na região, devido à não existência de lotes vagos “originais” é a demolição de casas antigas para a construção de grandes prédios, explicando-se assim, o aumento temporário de lotes vagos. Já as oscilações da área ocupada pelo uso institucional podem ser mais atribuídas às diferentes metodologias de pesquisa do que mudanças em si.

As matrizes de transição, obtidas através da tabulação cruzada das informações de uso por lote, servem para quantificar as tendências da dinâmica intra-urbana ao longo dos dois períodos analisados (Fig. 6). As duas matrizes 1985/1996 e 1996/2004 ilustram o intenso dinamismo ocorrido na região da Savassi ao longo dessas duas décadas, indicando que a maior parte dos lotes da região sofreu mudanças em seu uso. Observe que a diagonal das matriz de transição indica a permanência do estados, dos quais, durante o primeiro período, somente 32% do comércio, 44% de residências e 22% de serviços se mantiveram imutáveis, sendo esses números para o segundo período, respectivamente, de 17%, 60% e 44%.

Observa-se no primeiro período que 27% de usos comerciais voltaram a ser residência, enquanto 24% se transformaram em uso misto de comércio e serviço. Mais de 40% das residências se transformaram em comércio ou serviços e 32% dos serviços voltaram a uso residencial, enquanto 15% foram transformados em comércio.

A volatilidade dos usos de comércio se acirra durante a última década, quando somente 17% permanecem imutáveis, 25% mudam para residências e 34% para serviços. Nesse período, o uso residencial se mantém mais estável, quando somente 20% mudam-se para serviços e outros 20% para outros usos. Já os serviços permanecem mais (45%), enquanto 38% voltam ao uso residencial e o restante, ou seja, aproximadamente 17%, mudam-se para outros usos.

A análise de permanência do uso misto não tem significado, uma vez que se tem uma grande quantidade de usos comuns em uma mesma unidade espacial de análise. Entre 1985 e 1996, a permanência do uso institucional foi pequena, sendo que as mudanças mais significativas foram de aproximadamente 58% para residência e 15% para uso de serviços. O uso institucional não apresentou nenhum tipo de mudanças de 1996 a 2003/2004. Já o lote vago apresentou permanência de 0% ao longo dos dois períodos analisados. Em síntese, os usos dominantes na região ao longo do tempo estudado foram o comercial,

residencial, de serviços e misto de comércio e serviço. Durante o primeiro período, o uso residencial se sobressaiu, apesar do avanço do comércio na região. No último período, o uso de serviços começa a predominar na região, embora o uso residencial tenha sido mantido em grande extensão.

		Uso em 1996								
		CO	RS	SV	MI	IT	LV	COSV	RSSV	CORS
Uso em 1985	CO	0.324324	0.27027	0.081081	0.054054	0	0	0.162162	0.027027	0.08108
	RS	0.188596	0.445175	0.144737	0.037281	0	0	0.078947	0.019737	0.08552
	SV	0.150538	0.322581	0.225806	0.053763	0	0	0.16129	0.043011	0.04301
	MI	0.184211	0.315789	0.210526	0.026316	0	0	0.105263	0.026316	0.13157
	IT	0.098039	0.578431	0.147059	0.019608	0.068627	0	0	0.029412	0.05882
	LV	0.533333	0.133333	0.2	0	0	0	0.066667	0	0.06666
	COSV	0.1	0.457143	0.157143	0.071429	0	0	0.114286	0.014286	0.08571
	RSSV	0.228571	0.2	0.285714	0.028571	0	0	0.2	0	0.05714
	CORS	0.389831	0.135593	0.101695	0.033898	0	0.016949	0.152542	0.016949	0.15254

		Uso em 2003/2004								
		CO	RS	SV	MI	IT	LV	COSV	RSSV	CORS
Uso em 1996	CO	0.177143	0.245714	0.342857	0.022857	0.028571	0.022857	0.12	0.011429	0.02857
	RS	0.060606	0.600551	0.203857	0.008264	0.013774	0.022039	0.035813	0.027548	0.02754
	SV	0.048951	0.377622	0.447552	0	0.020979	0.013986	0.041958	0.041958	0.00699
	MI	0.057143	0.228571	0.257143	0.028571	0	0	0.257143	0.085714	0.08571
	IT	0	0	0	0	1	0	0	0	0
	LV	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	COSV	0.05814	0.186047	0.290698	0.081395	0	0.011628	0.22093	0.046512	0.10465
	RSSV	0	0.25	0.65	0	0	0	0.05	0.05	0
	CORS	0.173333	0.226667	0.24	0.013333	0	0.013333	0.32	0	0.01333

		Uso em 2003/2004 por pixel								
		CO	RS	SV	MI	IT	LV	COSV	RSSV	CORS
Uso em 1996	CO	0,1612	0,2176	0,3695	0,0242	0,0298	0,0267	0,1438	0,0099	0,0174
	RS	0,0415	0,4593	0,2569	0,0065	0,1464	0,0172	0,0266	0,0226	0,0229
	SV	0,0632	0,3420	0,4407	0,0121	0,0147	0,0251	0,0632	0,0346	0,0043
	MI	0,0789	0,2434	0,2566	0,0197	0,0000	0,0000	0,2500	0,0724	0,0789
	IT	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	LV	0,3125	0,0000	0,6875	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
	COSV	0,0573	0,1762	0,2421	0,0917	0,0086	0,015759	0,2407	0,0444	0,1232
	RSSV	0,0000	0,2488	0,5493	0,0751	0,0000	0,0000	0,070423	0,0563	0,0000
	CORS	0,1373	0,2246	0,2310	0,0468	0,0000	0,0097	0,3425	0	0,0081

Fig. 6. Matrizes de transição 1985/1996, 1996/2003-2004, cruzando-se informação por lote e 1996/2003-2004, tabulando-se os mapas *raster* célula a célula.

A análise espacial das principais mudanças ocorridas por meio de mapas de mudanças (Fig. 7) permite a identificação dos principais pólos de mudanças em conjunto com os seus atratores urbanos. Por essa figura, nota-se que a atividade de comércio, inicialmente espalhada pelo setor leste do bairro, tendeu a se concentrar nas proximidades da Praça Diogo de Vasconcelos (Savassi) e ao longo das avenidas Cristóvão Colombo e Getúlio Vargas e ruas adjacentes. O uso residencial se mantém nas porções mais periféricas, tanto a leste como oeste do bairro (próximo à Praça da Liberdade), longe dos principais eixos

viários, e o uso de serviços se espalha indistintamente por toda a região. Essa análise serve, portanto, para subsidiar a escolha das variáveis territoriais que influenciam a configuração espacial das mudanças, a saber: 1) distância à Praça da Savassi; 2) distância à Praça da Liberdade; 3) distância aos principais eixos viários da área de estudo (Av. Cristóvão Colombo e Av. Getúlio Vargas); 4) distância às residências e 5) distância ao comércio. Essas duas últimas variáveis visam incluir no modelo o efeito de contágio tanto no desenvolvimento do comércio quanto na manutenção de áreas residenciais.

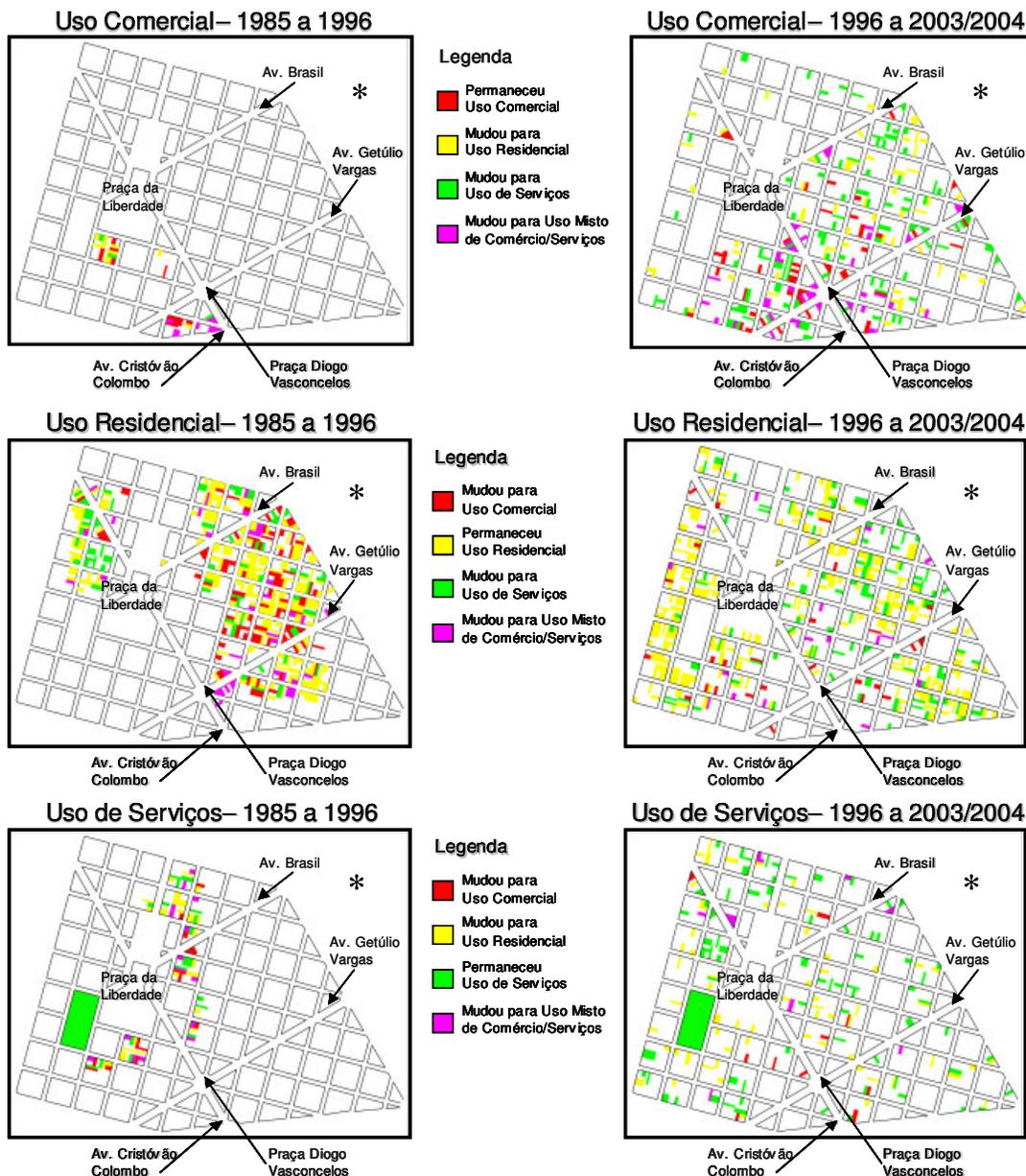


Fig. 7. Mapas de mudanças para uso comercial, uso residencial e uso de serviços.

MODELO DE SIMULAÇÃO DE MUDANÇAS

O modelo de simulação espacial foi desenvolvido somente para o período 1996-2004, haja vista que os dados de 1985 padecem de maiores incertezas. Como parâmetro de entrada, DINAMICA recebe uma matriz de transição. Para isso houve necessidade de transformação da matriz de transição, obtida ao nível do lote, para uma calculada cruzando-se os mapas célula a célula, posto que DINAMICA opera sobre uma base raster. Foi feita então a transposição da representação da unidade espacial do lote (em geral em torno de 400 m²) para as células raster, no caso com tamanho de 10x10 metros.

Uma nova matriz de transição foi obtida através da tabulação cruzadas das bases raster (Fig. 6). Analisando a diferença entre as duas matrizes, verifica-se uma aproximação nas taxas de transição correspondentes, com algumas variações que retratam usos do solo que ocupam áreas desiguais em relação ao tamanho médio do lote. Portanto, essa nova matriz não representa estritamente as mudanças de uso em termos de parcelas do solo, mas sim de suas áreas ocupadas.

Um outro passo necessário ao desenvolvimento do modelo de simulação consistiu em reduzir a sua complexidade, haja vista o elevado número de estados e transições originais. Observe que para cada transição são necessários dados de calibração, como o seus pesos de evidência. O modelo foi então reduzido para oito estados, com a exclusão do lote vago, e transições entre as grandes áreas de uso institucional, tais como o “Minas Tênis Clube” e o “Palácio da Liberdade” – sede do governo mineiro –, foram também evitadas. Fig. 8 ilustra a matriz de transição implementada no modelo DINAMICA, com 8 estados e 45 transições.

		2003/2004							
		comércio	residência	serviço	misto	institucional	com_serv	res_serv	com_res
1996	comércio	0.166	0.224	0.380	0.025	0.031	0.148	0.010	0.018
	residência	0.053	0.587	0.215	0.008	0.044	0.034	0.029	0.029
	serviço	0.065	0.351	0.452	0.012	0.015	0.065	0.036	0.004
	misto	0.079	0.243	0.257	0.020	0.000	0.250	0.072	0.079
	institucional	0.000	0.000	0.017	0.000	0.983	0.000	0.000	0.000
	com_serv	0.058	0.179	0.246	0.093	0.009	0.245	0.045	0.125
	res_serv	0.000	0.249	0.549	0.075	0.000	0.070	0.056	0.000
	com_res	0.139	0.227	0.233	0.047	0.000	0.346	0.000	0.008

Fig. 8. Matriz de transição do modelo de simulação.

O próximo passo consistiu em obter os pesos de evidência para cada uma das cinco variáveis territoriais (distância à Praça da Savassi; distância à Praça da Liberdade; distância aos principais eixos viários, distância às residências e distância ao comércio) em relação as

45 transições analisadas. Os gráficos da Fig. 9 representam a relação entre a distância à Praça Savassi e os pesos de evidência para as quatro principais transições de uso do solo. Peso positivo favorece a transição enquanto o negativo a desfavorece. As curvas foram corrigidas para evitar o “efeito quarteirão”, ou seja, a falta de informação ao longo do sistema viário. Observe a favorabilidade de transição para o comércio com a proximidade da Praça. Devido ao elevado número de transições, foi obtido o total de 225 funções de peso de evidências para a calibração do modelo de simulação. Isto se tornou possível graças ao software DINAMICA possuir um módulo para definição dos intervalos de categorização e cálculo automático dos pesos de evidência. Para cada transição foi obtido um mapa de probabilidade de transição através do somatório dos pesos de evidência equivalente à cada categoria das cinco variáveis de configuração territorial (Soares-Filho *et al.*, 2005).



Fig. 9. Pesos de evidências para faixas de distância a Praça da Savassi para as conversões: comércio-serviço, residência-comércio, serviço-comércio e serviço-residência. Valores positivos favorecem a conversão e negativos desfavorecem.

Após a obtenção dos mapas de probabilidade de transição, a alocação das mudanças, como determinada pela matriz de transição (Fig. 8), se deu através da utilização da função de transição *patcher*, a qual foi configurada para produzir manchas com tamanho de quatro células (cada célula = 100 m²), aproximando-se assim do tamanho do lote padrão de 400 m², ou seja a unidade espacial original de análise. Enfim, o modelo foi rodado em um único passo de tempo equivalente a 8 anos.

A Fig. 10 apresenta o mapa de saída da simulação para o período 1996-2004 em comparação com a situação de referência de 2004 e o mapa de ajuste espacial *Fuzzy*, usando-se a função de decaimento exponencial. O ajuste médio do modelo de simulação alcançou 54% em comparação com os 52% obtidos comparando-se o mapa de entrada de 1996 com o de referência de 2004. Segundo Hagen (2003), considera-se o ajuste do modelo apropriado quando há melhora do índice médio Fuzzy em relação à situação de referência, que leva em conta a comparação entre os mapas dos tempos inicial e final. Portanto, o resultado do modelo é tido como adequado, tendo em vista sobretudo os seus múltiplos estados e transições.

Usando-se das mesmas configurações do modelo 1996-2004, foi realizada uma simulação com três passos de tempo de oito anos, visando obter uma projeção da configuração espacial do Bairro da Savassi ao redor de 2020. Como resultado, a Fig. 10 mostra que se as tendências atuais permanecerem, ter-se-á uma predominância de serviços ao redor do principal ponto comercial hoje do bairro, ou seja, a Praça da Savassi, e a formação de agrupamentos dos demais usos em pólos de atividades.

CONCLUSÕES

Através deste estudo, observou-se a difusão dos usos de serviços, com a sua co-ocorrência e fusão com residências, fato justificado pela especulação imobiliária, pois o valor da terra no local tem sido cada vez maior, tendo como conseqüência a sua verticalização. O reflexo direto desse fenômeno é o aumento do tráfego viário e de pessoas, gerando a necessidade de um redirecionamento do planejamento urbano para essa situação que está se expandindo. Observou-se também a constância do uso institucional e a redução e aglutinação dos usos comerciais em pólos econômicos, o que demonstra a consolidação do efeito “shopping centers”, “mini-shoppings” e galerias comerciais. Essa tendência tem-se afirmado cada vez

mais em consequência da falta de segurança das ruas, bem como a falta de infra-estrutura de estacionamento público. A montagem do modelo de simulação serviu para demonstrar que essas mudanças não ocorrem ao acaso, mas são influenciadas pela arranjo espacial dos principais marcos urbanísticos, como praças e avenidas.

Uma grande limitação aos modelos de simulação espacial é o seu ajuste – um processo trabalhoso em função do grande número de parâmetros a serem calibrados. No entanto, as ferramentas de análise, calibração e validação disponibilizadas pelo DINAMICA facilitaram a montagem e operação desse complexo modelo, mostrando a adequabilidade de se trabalhar com múltiplos estados e transições, usando-se como unidade espacial o lote urbano. Nesse caso, o uso de funções de transição que operam com o conceito de mancha (agregado de células) permitiu representar essa unidade espacial sobre uma estrutura raster.

Portanto, a complexidade da dinâmica observada, com seus vários estados de uso do solo e múltiplas transições, pôde ser representada, usando-se da capacidade de abstração da plataforma do DINAMICA. Aplicações já desenvolvidas nesse software compreendem desde estudos em escala local, como o caso da Savassi, com célula de 10x10 metros, até simulações a nível continental, como o exemplo do modelo SimAmazonia – um arranjo de 140 milhões de células de 1 km² desenvolvido para a representação da dinâmica de uso do solo por toda a bacia amazônica (Soares-Filho *et al.*, 2006) –, demonstrando assim o potencial e flexibilidade da sua arquitetura para a modelagem de vários fenômenos dinâmicos.

O modelo de projeção para 2020 forneceu a oportunidade de prospectar potenciais configurações espaciais, produto da trajetória recente dessa dinâmica intra-urbana, em conjunto com as suas implicações urbanísticas. Vale a pena ressaltar que o modelo representa tendências e não uma radiografia fiel do que o futuro pode apresentar.

A disponibilidade de tais modelos de representação da dinâmica urbana traz novas oportunidades para o estudo urbanístico com vistas à elaboração de projetos de planejamento e intervenções. Embora, ainda seja um enfoque pouco utilizado na atualidade, espera-se que a metodologia disponibilizada nessa contribuição se torne de fato um instrumento de suporte às decisões de planejamento urbano, haja vista que a cidade se encontra em perpétua mutação. Nesse sentido, o modelo serve para explorar situações

possíveis de acontecer em função da trajetória recente e com isso tanto alertar os tomadores de decisão, como também conscientizar e motivar a população, para a realização de investimentos necessários ao desenvolvimento, preservação e mesmo recuperação desse espaço urbano.

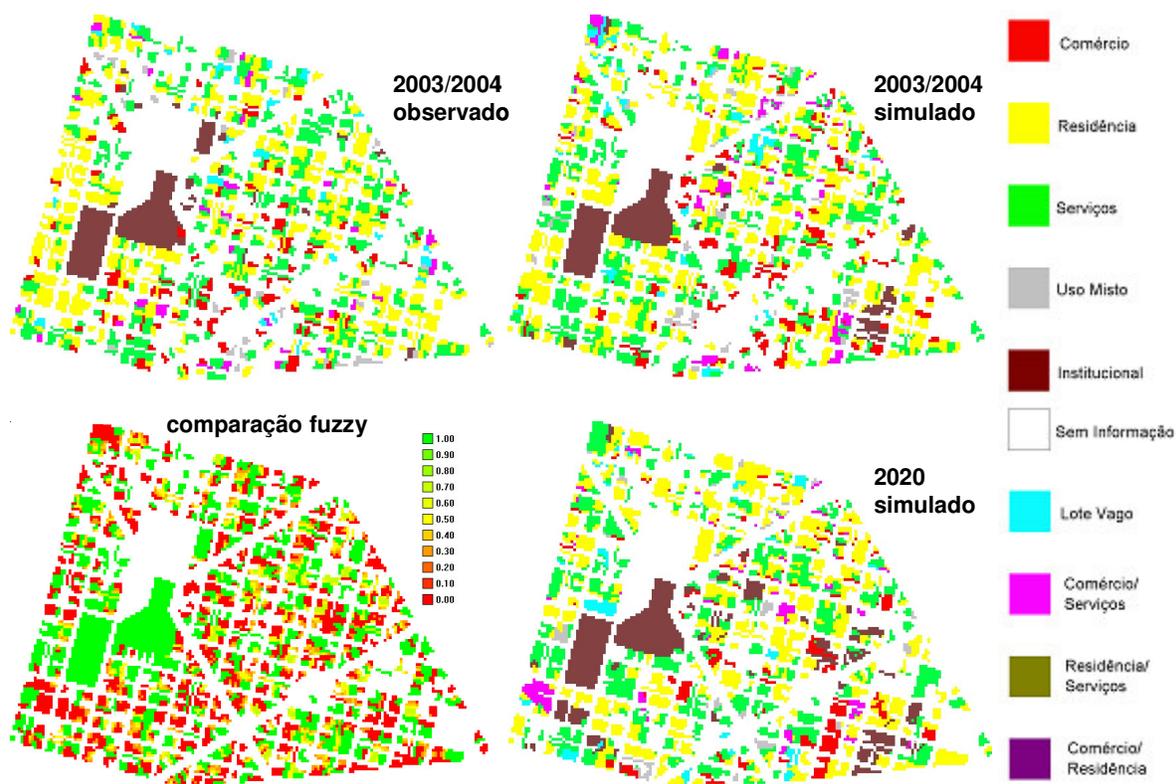


Fig. 10. Padrões de uso do solo simulados comparados com o observado em conjunto com o mapa de validação fuzzy. Observe no projetado para 2020 a tendência de aglutinação dos setores comerciais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro a esse trabalho (CRA-2463/98), à equipe do CSR (Centro de Sensoriamento Remoto - UFMG) pelo suporte técnico e à Fundação Gordon e Betty Moore e Projeto LBA (Experimento em Grande Escala da Atmosfera e Bioesfera da Amazônia) que indiretamente, através do Projeto “Cenários para Amazônia”, têm apoiado o desenvolvimento do software DINAMICA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, Claudia; BATTY, Michael; MONTEIRO, Miguel; CAMARA, Gilberto; SOARES- FILHO, Britaldo Silveira; CERQUEIRA, Gustavo; PENNACHIN, Cássio Lopes. Stochastic cellular automata modeling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 27, 481–509, 2003.
- BATTY, M., STEADMAN, P, XIE, Y. *Visualization in Spatial Modelling*. London: CASA, 2003. http://www.casa.ucl.ac.uk/working_papers/paper79.pdf (12/05/2004).
- BONHAM-CARTER, G. *Geographic information systems for geoscientists: modelling with GIS*. Pergamon, New York, 1994, 414 pp.
- BURROUGH, P. *Dynamic Modelling and Geocomputation*. In: M. BATTY and R. MCDONNELL (Eds.). *Geocomputation: A Primer*. P. Longley, London, John Wiley & Sons, 1998.
- CÂMARA, G., MONTEIRO, A. M. V. *Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial*. São José dos Campos. INPE. 2003. <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/> (12/05/2004).
- COSTANZA, R. Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. *Ecological Modelling*, v.47, 199-215, 1989.
- GOODACRE C. M., BONHAM-CARTER G. F., AGTERBERG, F. P., WRIGHT D. F. A statistical analysis of spatial association of seismicity with drainage patterns and magnetic anomalies in western Quebec. *Tectonophysics*, v. 217, 205-305, 1993.
- HAGEN, A. Fuzzy set approach to assessing similarity of categorical maps. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 17, 235–249, 2003.
- JENSEN, L. J. M. and DI GREGORIO, A. Parametric land cover and land-use classifications as tools for environmental change detection. *Agriculture, Ecosystems and Environmen*, v. 91, 89-100, 2002.
- KARAFYLLIDIS, I., THANAILAKIS, A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, v. 99, 87-89, 1997
- MONTE-MÓR, R., LEMOS, C.B, COSTA, H. ,MARQUES, Y. *Belo Horizonte: Espaço e Tempos em Construção*. PBH e CEDEPLAR, UFMG. Coleção BH 100 Anos. Belo Horizonte. 1994, 93pp.
- PEDROSA, B. M., CÂMARA, G. *Modelagem Dinâmica e Geoprocessamento*. INPE. São Paulo. 2002. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap6-dinamica.pdf>. (12/05/2004).
- PONTIUS, R.G. Jr. Statistical Methods to Partition Effects of Quantity and Location During Comparison of Categorical Maps at Multiple Resolutions. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. v. 68, 1041-1049, 2002.
- POWER, C., SIMMS, A., WHITE, R. Hierarchical fuzzy pattern matching for the regional comparison of Land Use Maps *International Journal of Geographical Information Science* v. 15, 77-100, 2001.

- PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE (PBH). *Lei de Uso, Parcelamento e Ocupação do Solo de Belo Horizonte*. Belo Horizonte. 1985.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE (PBH). *Plano Diretor de Belo Horizonte*. Lei de usos e Ocupação do Solo- Estudos Básicos. Belo Horizonte. 1996.
- SIRAKOULIS, G. C., KARAFYLLIDIS, I., THANAILAKIS, A. A cellular automaton model for the effects of population movement and vaccination on epidemic propagation. *Ecological Modelling*, v. 133, 209–223, 2000.
- SOARES FILHO, B. S., PENNACHIN, C. L., CERQUEIRA, G. DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, v. 154, 217-235, 2002.
- SOARES-FILHO B., ALENCAR A., NEPSTAD D. , CERQUEIRA G., VERA DIAZ M., RIVERO S., SOLÓRZANO L., VOLL E. Simulating the Response of Land-Cover Changes to Road Paving and Governance Along a Major Amazon Highway: The Santarém-Cuiabá Corridor. *Global Change Biology*, v. 10, 745-764, 2004.
- SOARES-FILHO BS, CERQUEIRA G, ARAUJO W, VOLL E (2005) *DINAMICA project*. <<http://www.csr.ufmg.br/dinamica>> (Junho de 2005).
- SOARES FILHO, BS, NEPSTAD, D., CURRAN, L., VOLL, E., CERQUEIRA, G., GARCIA, RA; RAMOS, CA, MCDONALD, A., LEFEBVRE, P, SCHLESINGER, P. Modeling conservation in the Amazon basin. *Nature*, London, v. 440, p. 520-523, 2006.
- SOARES FILHO, B. S., CERQUEIRA, G., ARAÚJO, W., VOLL, E. *Modelagem de dinâmica de paisagem: concepção e potencial de aplicação de modelos de simulação baseados em autômato celular*. In: ALBERNAZ A.L, DA SILVA, J. M., VALERIANO, D. (Eds.). *Ferramentas para modelagem da distribuição de espécies em ambientes tropicais*. Belém. No prelo. (disponível em www.csr.ufmg.br/dinamica)
- WHITE, R., ENGELEN, G., ULJEE, I. *Modelling Land Use Change with Linked Cellular Automata and Socio-Economic Models: A Tool for Exploring the Impact of Climate Change on the Island of St. Lucia*. In: HILL, M., ASPINALL, R (Eds.). *Spatial Information for Land Use Management*. Gordon and Breach, pp. 189-204. 2000.
- WHITE, R, ENGELEN, G. High Resolution Integrated Modelling of the Spatial Dynamics of Urban and Regional Systems. *Computers, Environment, and Urban Systems*, v. 24, 383-400. 2000.
- WU, F. SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rule. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 12, 63-82. 1998.

Redes Neurais e Autômatos Celulares como uma Plataforma para a Simulação de Mudanças do Uso do Solo Urbano

Cláudia Maria de Almeida, José Marinaldo Gleriani

1 Introdução

O conceito de autômatos celulares surgiu nos primórdios da era da computação digital, por volta das décadas de 1920 e 1930, quando dois matemáticos - Alan Turing e John von Neumann – perseguiram a idéia de que as máquinas poderiam ser auto-replicáveis, isto é, elas seriam capazes de gerar uma infinidade de padrões diversos que poderiam ser indefinidamente perpetuados (Batty *et al.*, 1997).

Modelos de autômatos celulares (em inglês, *cellular automata* ou CA) consistem de um ambiente de simulação representado por um espaço em forma de grade (raster), no qual um conjunto de regras de transição determina o atributo (estado) de cada célula levando em consideração os atributos das células na sua vizinhança, conforme anteriormente exposto no Item 5.1.3 do Capítulo 5.1. Esses modelos mostraram-se de grande utilidade em vista da sua operacionalidade, simplicidade e habilidade para incorporar regras de transição baseadas tanto em restrições lógicas quanto em expressões matemáticas, aplicáveis a exemplos teóricos ou práticos. As aplicações de modelos de CA abrangem uma vasta gama de áreas do conhecimento científico, incluindo Termodinâmica, Ecologia Florestal, Epidemiologia, Biologia Comportamental, Hidrologia, Oceanografia, Climatologia, Engenharia e Controle de Tráfego, entre outros.

Trabalhos associando redes neurais artificiais (RNA) a modelos de CA para análise urbana ainda são poucos. Li e Yeh (2001) conduziram uma simulação de mudanças do uso do

solo urbano para uma cidade no sul da China e seu entorno imediato, utilizando uma RNA incorporada a um modelo de CA a partir de uma abordagem binária de estados (urbano/não-urbano). Eles posteriormente refinaram esse modelo, lidando com múltiplos usos do solo regional (Li e Yeh, 2002) e simulações referentes a cenários variados de desenvolvimento urbano (Yeh e Li, 2003). Pijanowski *et al.* (2002a, 2002b) conduziram prognósticos de crescimento urbano para duas regiões distintas às margens do Lago Michigan usando redes neurais para determinar a importância das forças das mudanças de uso do solo em uma plataforma denominada “Modelo de Transformação da Terra” (*Land Transformation Model - LTM*), o qual consiste em uma espécie de ambiente de CA¹. Todas essas investigações jamais se propuseram a explorar o espaço em escala intra-urbana, uma vez que o seu foco permanecia nas mudanças em nível regional (macro-escala). Mais recentemente, estudos semelhantes também utilizaram modelos de simulação de CA baseados em RNA, focando áreas metropolitanas - Detroit e as Cidades Gêmeas nos EUA (Pijanowski *et al.*, 2005) e Pequim na China (Guan e Wang, 2005) - e voltando a atenção para fenômenos de urbanização dispersa, e por este motivo, categorizando o modelo através de estados em que o uso urbano é tratado de maneira genérica, sem detalhamentos.

Este capítulo, por um outro lado, trata da simulação de múltiplos usos do solo intra-urbano (residencial, comercial, industrial, serviços, lazer etc.) através de um experimento de modelagem de CA parametrizado por redes neurais supervisionadas. Uma das primeiras proposições para o uso de RNA em simulações urbanas surgiu na segunda metade da década passada, quando Clarke *et al.* (1997), considerando a reconhecida complexidade de sistemas urbanos sujeitos a surtos de crescimento repentino, afirmaram que métodos de redes neurais poderiam ser extremamente apropriados para a modelagem desses sistemas. Pesquisadores

¹ O Modelo de Transformação da Terra apresenta os quatro paradigmas de autômatos celulares de acordo com Batty *et al.* (1997): (i) espaço constituído por uma grade de células, (ii) discretização dos estados das células e do tempo, (iii) vizinhanças

neste âmbito chegaram a um consenso ao longo dos últimos anos no sentido de que tais abordagens não-paramétricas poderiam lidar melhor com as não-linearidades e o comportamento caótico de ambientes urbanos em constante mudança (Li e Yeh, 2002; Yeh e Li, 2003; Guan e Wang, 2005), em vista da reconhecida habilidade de RNA para tratar das incertezas, superdimensionalidade, comportamento multimodal e caráter por vezes incompleto dos dados espaciais (Openshaw, 1998; Fischer e Abrahart, 2000).

2 Redes Neurais Artificiais

2.1 Breve Histórico e Definições

Redes neurais artificiais (RNA) podem ser basicamente definidas como um dispositivo computacional maciça e paralelamente distribuído, constituído de unidades de processamento simples, também chamados neurônios ou nós, os quais se organizam em camadas. Os neurônios se encarregam do armazenamento do conhecimento adquirido pelo sistema, que se tornará disponível para uso futuro (Haykin, 1999).

As idéias fundamentais de RNA provêm de correntes teóricas que objetivavam reproduzir o raciocínio humano em ambiente virtual, inspiradas em princípios da Neurobiologia. Embora os fundamentos de RNA tenham surgido já na década de 1940 através do trabalho pioneiro de McCullough e Pitts (1943), esforços para produzir máquinas capazes de automatizar tarefas que requeriam comportamento inteligente começaram a se materializar apenas anos mais tarde, quando Rosenblatt implementou pela primeira vez um algoritmo de aprendizagem - “perceptron” - em 1957 (Haykin, 1999).

Trabalhos realizados durante os anos de 1960 consistiam de *perceptrons* de uma única camada, também chamados máquinas lineares, as quais se mostraram em pouco tempo

incapazes de reconhecer um número elevado de padrões. Isto levou a uma estagnação no campo de RNA, que foi superada somente na segunda metade da década de 1980, quando redes neurais multicamadas entraram em cena. A partir desse momento, RNA passaram a ser extensivamente aplicadas nos mais diversos ramos do conhecimento, como computação gráfica, processamento digital de imagens, ciências médicas, contabilidade, geomática e outros.

É válido mencionar que ainda que RNA sejam comumente consideradas como pertencentes ao amplo campo de Inteligência Artificial (*Artificial Intelligence – AI*), Fischer e Abrahart (2000) postulam que implementações de redes neurais para a análise e modelagem de dados geográficos deveriam ser preferencialmente atribuídas ao domínio da Inteligência Computacional (*Computational Intelligence – CI*). Esses autores argumentam que implementações de RNA sob a forma de classificadores de padrões e aproximadores de funções podem processar apenas dados numéricos (baixo nível), ao passo que um sistema de AI corresponde a um sistema refinado de CI, dotado de ferramentas especiais para incorporar conhecimento sob a forma de informação não-numérica, regras e restrições operacionais.

2.2 Estrutura de RNA

Uma rede neural apresenta normalmente uma camada de entrada, uma camada de saída, e uma ou mais camadas ocultas (ou eventualmente nenhuma) entre as camadas de entrada e saída. Essas sucessivas camadas de unidades de processamento apresentam conexões partindo de cada unidade (neurônio) em uma camada em direção a cada uma das unidades na próxima camada. As conexões são responsáveis pela transmissão da informação através da rede e são caracterizadas por pesos, os quais são inicialmente definidos de maneira randômica e podem ser positivos ou negativos (Bishop, 1995). Todos os neurônios, exceto aqueles pertencentes à

camada de entrada, desempenham duas funções simples de processamento – recepção do sinal (ativação) dos neurônios da camada anterior e transmissão de um novo sinal como entrada para a próxima camada.

As funções matemáticas responsáveis pelas interações entre neurônios são simples. Para um dado neurônio ou unidade j , a seguinte equação é válida:

$$net_j(t) = \sum_i w_{ij} o_i(t) \quad (1)$$

onde $net_j(t)$ é a entrada da rede referente à unidade j no tempo t ; w_{ij} é o peso da conexão da unidade i para a unidade j , e $o_i(t)$ é a saída da unidade i no tempo t .

Conforme mencionado acima, a ativação originada no neurônio de recepção irá atuar como entrada para a próxima camada. Há basicamente três tipos de funções de ativação (Haykin, 1999) - limiar, linear e sigmóide; a última é mais frequentemente usada e foi empregada neste trabalho:

$$a_j(t+1) = \frac{I}{1 + e^{-(\sum_i w_{ij} o_i(t) - \theta_j)}} \quad (2)$$

onde $a_j(t+1)$ é a ativação da unidade j no tempo $t+1$, e θ_j é o limiar da unidade j .

O treinamento de uma rede neural ântero-alimentada (*feed-forward*) com aprendizagem supervisionada consiste na propagação de um sinal de entrada (padrão) na rede até que a ativação alcance a camada de saída. Isto constitui a chamada fase de ântero-propagação.

A saída da camada de saída é então comparada com a entrada utilizada para treinamento. O erro, isto é, a diferença (delta) δ_j entre a saída o_j e a entrada de treinamento t_j de uma dada unidade de saída j é então usada, juntamente com a saída o_i da unidade fonte i , para computar as mudanças necessárias na conexão w_{ij} . Para determinar os deltas das unidades intermediárias para as quais não há informação disponível sobre entrada de treinamento, ou seja, as unidades das camadas ocultas, recuperam-se os deltas da camada ulterior, que já foram previamente calculados. Assim, os erros (deltas) são retro-propagados, e esta fase é denominada retro-propagação (Rumelhart *et al.*, 1986).

O algoritmo de treinamento usado no experimento deste trabalho foi o de “retro-propagação resiliente”, que corresponde a um esquema de aprendizagem adaptativa local, desempenhando aprendizagem supervisionada em *perceptrons* multi-camadas. Basicamente, a fase de rastreamento do algoritmo convencional de retro-propagação não é mais executada, se uma superação de um valor mínimo de limiar ocorrer. Um termo de decaimento do peso (α) também é introduzido, visando à redução do erro de saída e do valor dos pesos, de forma a permitir uma melhora da generalização da rede. A função do erro composto é dada a seguir:

$$E = \sum (t_i - o_i)^2 + 10^{-\alpha} \sum w_{ij}^2 \quad (3)$$

onde t_i é a entrada de treinamento da unidade i ; o_i é a saída real da unidade i ; α é o termo de decaimento do peso; j é um índice que denota o sucessor da unidade corrente i com conexão w_{ij} de i para j . O princípio básico da retro-propagação resiliente é eliminar a influência indesejável da dimensão da derivada parcial na determinação do peso. Dessa forma, apenas o sinal da derivada é considerado para indicar a direção de atualização do peso (Riedmiller e

Braun, 1993). O tamanho da variação do peso é exclusivamente determinado por um valor de atualização específico $\Delta^{(t)}_{ij}$:

$$\Delta w^{(t)}_{ij} = \begin{cases} -\Delta^{(t)}_{ij} , & \text{se } \partial E / \partial w_{ij}^{(t)} > 0 \\ +\Delta^{(t)}_{ij} , & \text{se } \partial E / \partial w_{ij}^{(t)} < 0 \\ 0 & , \text{ do contrário} \end{cases} \quad (4)$$

onde $\partial E / \partial w_{ij}^{(t)}$ refere-se à informação cumulativa do gradiente sobre os padrões do conjunto de treinamento. A segunda fase de aprendizagem por retro-propagação resiliente consiste em determinar os novos valores de atualização $\Delta^{(t)}_{ij}$. Isto é feito a partir de um processo de adaptação com base no sinal, de acordo com a equação abaixo:

$$\Delta^{(t)}_{ij} = \begin{cases} \eta_+ * \Delta^{(t-1)}_{ij} , & \text{se } \partial E / \partial w_{ij}^{(t)} * \partial E / \partial w_{ij}^{(t-1)} > 0 \\ \eta_- * \Delta^{(t-1)}_{ij} , & \text{se } \partial E / \partial w_{ij}^{(t)} * \partial E / \partial w_{ij}^{(t-1)} < 0 \\ \Delta^{(t-1)}_{ij} , & \text{do contrário} \end{cases} \quad (5)$$

onde $0 < \eta_- < 1 < \eta_+$

onde η é a taxa de aprendizagem, que especifica a largura do passo de diminuição do gradiente.

A retro-propagação resiliente objetiva a adaptação de seu processo de aprendizagem à topologia da função do erro e, por esse motivo, ela segue o princípio da “aprendizagem coletiva”. Isto implica que a atualização dos pesos e adaptação sejam executadas após o processamento da informação do gradiente de todo o conjunto de treinamento (Riedmiller e Braun, 1993).

Uma das maiores vantagens de RNA é a sua habilidade para generalizar. Isto pressupõe que uma rede treinada seria capaz de classificar dados de modo idêntico à classificação existente no conjunto de treinamento, os quais jamais tenham sido apresentados antes à rede. Em aplicações do mundo real, somente uma pequena parte de todos os padrões possíveis para a generalização de uma rede neural está disponível de fato. Para se alcançar uma melhor generalização, o conjunto de dados deve ser subdividido em três partes (Haykin, 1999; Fischer e Abrahart, 2000):

- o *conjunto de treinamento* é usado para treinar uma rede neural, e seu erro é minimizado durante o treinamento;
- o *conjunto de validação* é usado para determinar o desempenho de uma rede neural frente a padrões não utilizados no treinamento;
- o *conjunto de teste* é destinado à verificação do desempenho geral de uma rede.

A aprendizagem deve ser interrompida quando o erro do conjunto de validação alcançar um valor mínimo. Nesse ponto, a rede detém a melhor capacidade de generalização. Se a aprendizagem continuar, ocorre o que se chama de “excesso de treinamento”, e o desempenho da rede para o conjunto de dados como um todo diminuirá, ainda que o erro do conjunto de treinamento se torne cada vez menor. Após a conclusão da fase de aprendizagem, a rede deve ser finalmente avaliada em relação ao terceiro conjunto de dados – o conjunto de teste.

O processo de aprendizagem de uma rede neural é decisivo para o sucesso de um modelo de simulação de mudanças do uso do solo intra-urbano. Em alguns casos, dependendo das características da área de estudo, como os padrões observáveis de configuração espacial

do uso do solo e as respectivas forçantes de dinâmicas do uso, as saídas da rede podem tornar-se extremamente sensíveis em vista da sua arquitetura, algoritmo de aprendizagem e parâmetros internos. Essas saídas da RNA dizem respeito aos mapas de aptidão para mudanças de uso do solo, os quais informarão ao modelo de CA as células mais suscetíveis de sofrerem transições no seu uso do solo atual. Embora os valores de saída de uma rede neural não possam ser diretamente interpretados como probabilidades, a sua lógica se assemelha a uma gradação de valores de probabilidades de transição no caso particular desse experimento.

3 Modelo de CA para Simulação de Mudanças do Uso do Solo Intra-Urbano Baseado em RNA

De acordo com o que foi afirmado anteriormente, RNA oferecem um grande número de vantagens para a modelagem de sistemas complexos, dos quais áreas urbanas constituem um exemplo típico. A sua propriedade de serem robustas e resistentes a ruídos independentemente da presença de dados redundantes, incompletos ou nebulosos, de lidarem habilmente com problemas não-lineares, de não se sujeitarem à “camisa-de-força” de formulações matemáticas e de se adaptarem a distribuições de frequência não-normais (Openshaw, 1998), as tornam adequadas para revelar os intrincados relacionamentos entre os atributos biofísicos dos sítios urbanos e a sua dinâmica de mudanças e crescimento.

O modelo de simulação adotado nesse experimento foi parametrizado por redes neurais, isto é, mapas de aptidão para mudanças de uso do solo foram gerados no programa “Stuttgart Neural Network Simulator (SNNS)”, em que as entradas de treinamento consistiam nos mapas de mudanças de uso do solo, e as forçantes dessas mudanças correspondiam aos mapas referentes a diversos tipos de atratividade locacional, caracterizada por variáveis biofísicas e de infra-estrutura. Esses mapas de probabilidade alimentaram um modelo de CA

para simulação de dinâmicas da paisagem – DINAMICA (Figura 1) – desenvolvido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais – CSR/UFMG.

[Inserir Figura 1 por aqui]

O DINAMICA baseia-se em vizinhanças de oito células ou de “Moore” (janelas 3x3) e comporta dois algoritmos empíricos de alocação de uso do solo (ou funções de transição): ‘*expander*’ e ‘*patcher*’. A função *expander* responde pela expansão de manchas existentes de uma dada classe de uso do solo. A função *patcher*, por sua vez, destina-se a gerar novas manchas através de um mecanismo de alocação de células-semente. Dito de outra forma, a função *expander* executa transições de um estado *i* para um estado *j* somente nas vizinhanças adjacentes de células com estado *j*. E a função *patcher* realiza transições de um estado *i* para um estado *j* apenas nas vizinhanças imediatas de células com estado diferente de *j*.

Esses dois processos podem ser fundidos de acordo com a equação abaixo:

$$Q_{ij} = r * (\text{função } \textit{expander}) + s * (\text{função } \textit{patcher}) \quad (6)$$

onde Q_{ij} corresponde à quantia total de transições do tipo *ij* especificadas para cada período de simulação, e *r* e *s* referem-se respectivamente à percentagem de transições executadas por cada função, sendo $r + s = 1$.

Segundo Soares-Filho *et al.* (2002), ambos os algoritmos de transição adotam um mecanismo estocástico de seleção de células. Esse mecanismo consiste na varredura do mapa de uso do solo inicial para selecionar as células com os mais altos valores de aptidão para transição, dispondo-as em seguida em um vetor de dados. Após esse procedimento, as células são selecionadas aleatoriamente, a partir dos mais altos valores em direção aos mais baixos

(dependendo do grau de aleatoriedade desejado, o mecanismo interno de seleção estocástica pode ser mais rigoroso ou mais relaxado). Em uma fase final, o mapa de uso do solo inicial submete-se a uma nova varredura para a realização das transições selecionadas.

No caso de a função *expander* não executar a quantia de transições desejadas após um número fixo de iterações, ele repassa à função *patcher* o número remanescente de transições, de modo que o número total de transições sempre atinja um limiar mínimo (Soares-Filho *et al.*, 2002). A quantia total de transições desejadas é obtida através de uma simples operação de tabulação cruzada no caso de simulações convencionais, em que os mapas de uso do solo inicial e final estão disponíveis, e no caso de prognósticos, em que não se dispõe do mapa de uso final, utiliza-se o modelo Markoviano, séries multitemporais ou qualquer outro modelo estatístico destinado a realizar previsões.

O algoritmo da função *expander* é expresso pela seguinte equação:

Se $n_j > 3$ então $P'_{ij}(x,y) = P_{ij}(x,y)$, do contrário

$$P'_{ij}(x,y) = P_{ij}(x,y) \times (n_j)/4 \quad (7)$$

onde n_j corresponde ao número de células do tipo j presentes em uma janela 3 x 3. Esse método garante que o valor máximo de P'_{ij} seja o valor original de P_{ij} , sempre que uma célula do tipo i esteja rodeada por pelo menos 50% de células do tipo j .

A função *patcher* destina-se a simular padrões de mudanças de uso do solo através da geração de manchas difusas, inibindo, contudo, a formação de manchas isoladas contendo uma única célula.

Essa função emprega uma rotina que procura por células em torno de uma determinada localização, tendo em vista a transição considerada. Isto é realizado primeiramente pela seleção da célula-semente da nova mancha, e então, pela escolha de um número específico de células em torno da célula-semente de acordo com o seu valor de aptidão para a transição P_{ij} .

As funções *expand* e *patcher*, segundo previamente exposto, incorporam um mecanismo de seleção que é responsável pela identificação das células com os maiores valores de aptidão para cada transição ij . Esse mecanismo armazena as células e as organiza em um vetor para uma seleção ulterior. Assim, cada célula recém-selecionada irá formar o núcleo de uma nova mancha ou fronteira de expansão, que ainda necessita ser desenvolvida através do uso dos dois algoritmos de transição. Os tamanhos das novas manchas e fronteiras de expansão são definidos de acordo com uma distribuição de probabilidade log-normal, cujos parâmetros são determinados em função do tamanho médio e respectiva variância de cada tipo de mancha e fronteira de expansão a ser gerada (Soares-Filho *et al.*, 2002).

4 Aplicações

4.1 Área de Estudo e Banco de Dados

O modelo de simulação de CA baseado em RNA foi aplicado a uma cidade de médio porte, Piracicaba, localizada no centro-oeste do Estado de São Paulo, às margens do rio Piracicaba, sudeste do Brasil. A cidade abrigava um total de 198.407 habitantes no tempo inicial da simulação (1985), que se elevou para 309.531 habitantes em 1999. Nesse período, a taxa anual de crescimento da população foi de aproximadamente 1,56%, e o correspondente impacto na área urbana foi marcado pela expansão massiva das zonas residenciais existentes juntamente com a proliferação de novos núcleos residenciais, muitos dos quais acabaram

incorporados ao tecido da mancha urbana principal. Além de vivenciar um rápido crescimento do uso residencial, a cidade de Piracicaba também testemunhou alterações no uso do solo intra-urbano, como o aumento de áreas industriais, institucionais e de lazer (Figura 2).

[Inserir Figura 2 por aqui]

Os mapas de uso do solo da cidade em 1985 e 1999 foram obtidos junto à Secretaria Municipal de Planejamento Urbano. Eles foram escaneados, convertidos para formato vetorial no programa AutoCad, e então pré-processados no programa SPRING (desenvolvido pela Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – DPI-INPE).

Os mapas oficiais nem sempre correspondem à situação de fato encontrada na cidade, uma vez que, por um lado, eles não indicam assentamentos informais e, por outro, eles apresentam, por vezes, assentamentos aprovados que não foram efetivamente construídos. Para solucionar essas disparidades eventuais, imagens de satélite foram usadas para atualizar os mapas de uso do solo com relação exclusivamente aos assentamentos residenciais. Duas imagens Landsat (WRS 220/76) foram empregadas para esse fim: uma cena TM-5 de 10 de agosto de 1985, e uma segunda de 16 de julho de 1999. A última imagem foi georreferenciada através de uma carta topográfica do IBGE (UTM – SAD-69) com escala de 1: 50 000, e o erro total foi de 1,2 pixels (com o limiar de tolerância oscilando em torno de 1,5 – 2,0 pixels). Ela então foi usada para co-registrar a imagem de 1985, e o erro total resultou em apenas 0,3 pixel. As coordenadas geográficas dos pontos de controle foram posteriormente usadas para o registro dos mapas de uso do solo da cidade em formato vetorial no programa SPRING. Esses mapas foram sobrepostos a composições coloridas linearmente realçadas das imagens

registradas (4R_7G_1B), permitindo uma verificação visual de assentamentos residenciais existentes e inexistentes.

Visando à simplificação dos mapas de uso do solo, eles foram submetidos a procedimentos de generalização. Zonas com características semelhantes foram reclassificadas para uma única categoria, p.ex. zonas residenciais de diferentes densidades foram todas reclassificadas simplesmente para zona residencial, e zonas especiais e de equipamentos sociais foram reclassificadas para uso institucional. Oito categorias de uso do solo foram utilizadas: residencial, comercial, industrial, serviços, institucional, lazer/recreação, corpos d'água e uso não-urbano. Distritos localizados a mais de 10 km do perímetro da mancha urbana principal foram excluídos da análise, e a rede viária e vazios urbanos de menor porte foram igualmente desconsiderados nas simulações.

Todos os dados utilizados nesse experimento foram reamostrados para 50 m x 50 m, a fim de se obter uma resolução espacial mais adequada para os mapas (resoluções mais grosseiras implicariam a presença indesejável de serrilhados), bem como a fim de manter um número de células que permitisse bom desempenho computacional, e portanto, simulações rápidas. A resolução adotada resultou em uma grade contendo 334 linhas por 360 colunas, totalizando 120.240 células (30.060 ha) na área de estudo considerada nas simulações.

4.2 Análise Exploratória

Um dos primeiros passos na análise exploratória é a identificação dos tipos de mudanças de uso do solo intra-urbano existentes no período considerado (1985-1999). Uma simples operação de tabulação cruzada (Figura 3) entre os mapas de uso do solo inicial e final forneceu essa informação (Tabela 1), além de quantificar as mudanças em termos percentuais,

também chamadas de taxas globais de transição (Tabela 2). Essas taxas expressam a probabilidade de mudança na área de estudo como um todo, independentemente da influência das variáveis forçantes (biofísicas e infra-estruturais). Em alguns casos, essas taxas também são denominadas de “probabilidades globais de transição”.

[Inserir Figura 3 por aqui]

[Inserir Tabela 1 por aqui]

[Inserir Tabela 2 por aqui]

Após a identificação das mudanças de uso do solo, o próximo passo se refere à determinação dos diferentes conjuntos de variáveis influenciando cada um dos quatro tipos de mudanças de uso existentes. As variáveis disponíveis para a análise de modelagem nem sempre representam o conjunto de variáveis necessárias para produzir resultados de simulação ideais. Na realidade, dinâmicas de uso do solo intra-urbano são sujeitas a forçantes repentinas e imprevisíveis, como a decisão de investidores imobiliários em desenvolver certas áreas em detrimento de outras. Dito de outra forma, as transições de uso do solo são mais influenciadas por certos fatores do que por outros, dependendo dos processos de incorporação e desenvolvimento realizados pelos empreendedores imobiliários (Almeida *et al.*, 2003). Mas de modo geral, existe um conjunto de fatores decisivos para as transições de uso do solo, que respondem substancialmente pelas principais forçantes dessas mudanças. E são precisamente esses fatores que guiaram o experimento de modelagem em questão.

Os diversos mapas de variáveis biofísicas e infra-estruturais foram gerados a partir das informações extraídas dos mapas de uso do solo, como distâncias a certos usos, distâncias ao rio Piracicaba, assim como distâncias às diferentes categorias de vias da rede viária da cidade, tais como vias urbanas ou inter-urbanas pavimentadas ou não-pavimentadas. Em todos os casos, a distância euclidiana foi adotada, e métodos para se escolher inicialmente o conjunto de variáveis explicativas para as mudanças de uso do solo foram baseados em procedimentos heurísticos. Esses procedimentos envolvem basicamente a superposição de distintos mapas de distâncias sobre os mapas de transição do uso do solo, resultante do mapa de tabulação cruzada.

Mapas de transição foram elaborados para cada tipo de mudança de uso do solo (*NU_RES*; *NU_IND*; *NU_INST*; *NU_LAZ*). Esses mapas de transição indicam com diferentes cores as áreas de mudança e não-mudança, sendo a cor preta atribuída a áreas não consideradas na transição de uso em questão, isto é, todas as áreas onde o uso inicial da simulação difere do uso inicial da transição em análise. Por exemplo, se a transição em consideração é de uso não-urbano para residencial (*NU_RES*), todas as áreas que não apresentam uso não-urbano no tempo inicial da simulação (1985) seriam assinaladas em preto. Todas as superposições de mapas foram executadas no *SPRING*, pelo fato deste programa permitir a transparência entre os *layers* ou planos de informação.

O ambiente natural (solo, vegetação, relevo, áreas de proteção) não foi considerado como um fator decisivo para as mudanças de uso do solo. Em outras palavras, as características naturais do meio físico, excluindo o rio Piracicaba, não foram tidas como obstáculos ao crescimento urbano em um nível mais genérico. O sítio físico da cidade é

relativamente plano, com ondulações suaves, e não apresenta restrições com relação ao solo, vegetação e áreas de proteção ambiental.

Todas as variáveis selecionadas para integrar o modelo de simulação e suas respectivas notações são apresentadas na Tabela 3, e os conjuntos de variáveis escolhidos para explicar cada uma das quatro transições estão indicados na Tabela 4. Os mapas de variáveis em formato de grade representam os neurônios de entrada, enquanto que o mapa de transição do uso do solo consiste no treinamento da rede, conforme anteriormente mencionado.

[Inserir Tabela 3 por aqui]

[Inserir Tabela 4 por aqui]

4.3 Treinamento

O modelo DINAMICA é alimentado por n mapas de aptidão para mudanças de uso do solo que se relacionam a cada um dos n tipos existentes de transição de uso. Em face dessa condição, cada transição de uso neste experimento foi tratada individualmente no SNNS, e para cada um dos quatro tipos de mudança de uso do solo houve um processo completo de treinamento, validação e teste da respectiva rede neural.

Um dos assuntos-chave desse trabalho se refere à arquitetura das redes neurais. Muitos autores propuseram formulações matemáticas para este fim, mas até o momento não houve um consenso em relação aos métodos para determinar o número ótimo de camadas ocultas ou o número ideal de neurônios na camada oculta. É sempre desejável trabalhar com tamanhos reduzidos de redes, nas quais sejam assegurados simultaneamente um treinamento rápido e

um bom desempenho. Para Kavzoglu e Mather (1999), redes com muitos neurônios ou camadas apresentam a vantagem de aprender padrões mais complexos, além de serem menos influenciadas pelos pesos aleatórios iniciais (Paola e Schowengerdt, 1997). No entanto, essas complexas redes neurais demandam mais tempo para treinamento e não generalizam bem com dados desconhecidos, dada a memorização excessiva de ruído encontrado nos conjuntos de dados de treinamento (Haykin, 1999).

De acordo com o teorema de Kolmogorov, qualquer função contínua $\Phi: X^n \longrightarrow R^c$ pode ser implementada através de uma rede neural de três camadas com n neurônios na camada de entrada, $(2n + 1)$ neurônios em uma única camada oculta, e c neurônios na camada de saída (Wang, 1994). Fletcher e Goss (1993) recomendam que o número ideal de neurônios na camada oculta varie de $2n + 1$ a $\sqrt{2n + m}$, onde n corresponde ao número de neurônios na camada de entrada, e m , ao número de neurônios na camada de saída.

Apesar dessas divergências, há um consenso geral entre pesquisadores da área de modelagem urbana por CA no sentido de que o empirismo é uma solução razoável para se encontrar a melhor estrutura de uma rede neural em vista de um problema específico (Li e Yeh, 2001; Yeh e Li, 2003; Guan e Wang, 2005). Essa abordagem também procede em áreas afins, como geoprocessamento e sensoriamento remoto, por exemplo. Wang (1994), em seu trabalho sobre o uso de redes neurais para determinar a aptidão do solo para a agricultura, concluiu que $2n + 1$ neurônios excede com grande vantagem as necessidades das aplicações atuais. No caso específico de classificação de imagens de satélite, Foody e Arora (1997) afirmaram que redes grandes e complexas permitem um aumento na exatidão global, mas esse aumento não apresenta significância estatística. Para Paola e Schowengerdt (1997), que chegaram à conclusão idêntica, qualquer rede com mais de três neurônios na camada oculta

produziu resultados satisfatórios na discriminação de sete classes de cobertura do solo a partir de imagens TM. De forma semelhante, Kavzoglu e Mather (2003) perceberam que a exatidão da classificação global aumenta significativamente com o aumento do número de neurônios na camada oculta apenas até o terceiro neurônio. Acima de oito neurônios, a exatidão não ultrapassa 90%, e redes com duas camadas ocultas tampouco fornecem exatidões maiores do que 90%.

Todas as quatro redes neurais usadas nesse experimento apresentam apenas uma camada oculta com seis neurônios. Os neurônios na camada de entrada de cada rede correspondem respectivamente às variáveis forçantes para cada mudança de uso do solo, e a camada de saída apresenta apenas um único neurônio, que se refere aos valores de aptidão para a transição de uso do solo em cada célula. Os parâmetros internos das redes foram determinados de modo heurístico (Tabela 5).

[Inserir Tabela 5 por aqui]

Os mapas de transição do uso do solo usados como conjuntos de treinamento foram convertidos em grades numéricas, em que o valor 0,99 foi atribuído às áreas onde ocorreu mudança de uso; 0,01, às áreas onde não houve mudança de uso, e 0,000001 às áreas não concernidas na mudança de uso do solo em consideração. Em vista da natureza sigmóide da função de ativação, valores absolutos de 0 e 1 foram evitados para se prevenir valores excessivamente grandes dos pesos (Kavzoglu e Mather, 2003), e conseqüentemente, enviesamentos na gradação numérica das saídas das redes. As redes geradas no SPRING com extensão SPR foram convertidas em formato ASCII para a sua inserção no simulador de rede neural (SNNS).

Uma rotina especial foi criada em C++ para selecionar aleatoriamente 12.000 pontos na grade numérica, que respondem por aproximadamente 10% da quantia total de pixels ou células na área de estudo, e também para organizá-los de forma padronizada em uma sub-grade com 120 linhas e 100 colunas. Amostras desse tamanho foram usadas para os conjuntos de treinamento e validação, e toda a área de estudo foi usada como conjunto de teste.

Conforme dito anteriormente, o treinamento foi interrompido quando o erro do conjunto de validação atingiu o valor mínimo (Figura 4). O programa SNNS mostra três tipos distintos de erro de acordo com o número de ciclos: a soma total dos quadrados do erro de saída (SSE – “sum of the squares of the output error”); o erro quadrático médio total (MSE – “overall mean square error”), que se refere à média do quadrado do erro, ou seja, à média da diferença entre a resposta desejada ou entrada de treinamento (t_i) e a saída real do sistema (o_i); e o SSE dividido pelo número de neurônios de saída ou “output units” (SSE/out), o que para o k -ésimo padrão de treinamento é dado por:

$$SSE/out = \frac{1}{n^{\circ} \text{ neurônios de saída}} \sum (t_k - o_k)^2 \quad (8)$$

[Inserir Figura 4 por aqui]

As grades de saída foram convertidas em mapas temáticos em tons de cinza, de modo a permitir uma comparação visual entre esses mapas de aptidão para mudanças de uso (neurônios de saída) e os respectivos mapas de transição de uso do solo, os quais correspondem aos conjuntos de treinamento (Figura 5). Essa comparação permite uma avaliação empírica final do desempenho das redes neurais. É válido salientar que o modelo

DINAMICA reclassifica automaticamente para 0 (zero) as áreas onde o uso do solo no tempo inicial da simulação difere do uso inicial da transição considerada, nos casos em que os mapas de aptidão para mudanças são gerados dentro do DINAMICA através de métodos estatísticos. Uma vez que esses mapas de aptidão foram produzidos pelo SNNS, área com elevada aptidão para mudanças foram de alguma forma superestimadas. Mas esse excedente é desconsiderado quando os algoritmos do DINAMICA encarregados de mudar o uso do solo das células varrem os mapas de aptidão, pois eles levam em conta o uso real das células de acordo com o mapa de uso do solo inicial, e portanto, as áreas que efetivamente podem submeter-se a mudanças são consideravelmente reduzidas.

[Inserir Figura 5 por aqui]

5 Simulações e Discussão

Com base na atribuição de pesos apropriados às variáveis de entrada, os mapas de aptidão para mudanças gerados pelo SNNS alimentam o modelo de simulação – DINAMICA. Esse modelo também é guiado por parâmetros internos, determinados empiricamente, e que dizem respeito ao tamanho médio e variância das manchas e à proporção relativa dos algoritmos de transição (Tabela 6).

[Inserir Tabela 6 por aqui]

Devido à aleatoriedade dos algoritmos de transição do DINAMICA, ainda que os mesmos parâmetros internos sejam mantidos em diferentes rodadas do programa, resultados de simulação distintos serão produzidos em cada uma delas. Nesse sentido, os três melhores resultados para as simulações executadas para a cidade de Piracicaba no período 1985-1999 são apresentados na Figura 6.

[Inserir Figura 6 por aqui]

Observa-se que a transição de áreas não-urbanas para uso residencial (*NU_RES*) depende fortemente da existência prévia de áreas residenciais nas circunvizinhanças, uma vez que isto implica a possibilidade de se estender a rede de infra-estrutura eventualmente existente nas imediações. Essa transição também depende da disponibilidade de acesso a essas áreas.

A implementação de grandes áreas institucionais (*NU_INST*) ocorre próxima a estradas periféricas e a áreas desta categoria previamente existentes, uma vez que elas crescem como extensões de zonas institucionais já estabelecidas. De forma semelhante, a expansão de distritos industriais (*NU_IND*) requer a proximidade a zonas industriais previamente existentes e a disponibilidade de acesso viário. Essa transição também supõe a proximidade aos centros fornecedores de mão-de-obra (áreas residenciais periféricas), bem como uma localização não tão distante de zonas comerciais, uma vez que as áreas industriais dependem de atividades comerciais para apoio logístico.

A criação de zonas de lazer e recreação (*NU_LAZ*) ocorre também adjacente a zonas de mesmo tipo já existentes, uma vez que essas zonas são comumente criadas como extensões de áreas previamente estabelecidas para o mesmo fim. Essas zonas são criadas ao longo de margens baixas dos rios, uma vez que essas áreas são inundáveis, e assim, impróprias para abrigar outros usos urbanos. Da mesma forma, elas são estrategicamente localizadas em relação à sua área de influência, isto é, próximas às áreas residenciais, que são justamente aquelas que abrigam maiores densidades populacionais.

As zonas institucionais e de lazer/recreação, respectivamente em branco e cinza muito escuro, foram bem modeladas em todas as simulações. As áreas residenciais, em cinza escuro, foram consideravelmente bem simuladas em todos os três resultados apresentados, especialmente em S1 e S2. A expansão da zona industrial (cinza muito claro) localizada ao norte foi razoavelmente bem modelada, porém o novo distrito industrial que surgiu no setor sudeste da cidade não foi detectado em nenhuma das simulações realizadas. Isto pode ser explicado por várias razões concorrentes. Primeiro, os mapas de aptidão para mudanças *NU_IND* gerados pelo SNNS não atribuem valores elevados de aptidão à porção sudeste da cidade, dada a característica peculiar de generalização do treinamento da rede neural. Segundo, devido à natureza aleatória dos algoritmos de transição, somente as áreas com os maiores valores de aptidão para mudanças tendem a ser selecionados para transição, e o distrito industrial situado a sudeste apresenta valores de aptidão variando de médio a médio-baixo. Terceiro, em vista do que foi exposto acima e também do tamanho médio adotado para as manchas da transição *NU_IND*, a nova área industrial gerada a norte tende a concentrar toda a quantidade de transições determinada pelas taxas globais. Possíveis soluções para superar essa deficiência incluiriam a adoção de um tamanho médio de manchas menor para essa transição e a geração de um número maior de resultados de simulações.

6 Validação

Para determinar a exatidão do desempenho do modelo de simulação, medidas de similaridade *fuzzy* foram aplicadas em um contexto de vizinhança local. Diversos métodos de validação que operam sobre um contexto de vizinhança de pixels foram propostos (Costanza, 1989; Pontius, 2002; Hagen, 2003), visando identificar a similaridade de padrões espaciais entre um mapa simulado e o respectivo mapa de referência, de forma a relaxar a rigidez da concordância pixel-a-pixel (célula-a-célula). O método de similaridade *fuzzy* empregado nesse

trabalho é uma variação das métricas de similaridade *fuzzy* propostas por Hagen (2003), e foram implementadas no modelo DINAMICA pela equipe do CSR.

O método de Hagen baseia-se no conceito de “fuzziness of location” (dubiedade de localização), no qual a representação de uma célula é influenciada por ela mesma, e em menor magnitude, pelas células na sua vizinhança. Sem levar em conta a dubiedade da categoria ou estado da célula, o vetor de vizinhança *fuzzy neighbourhood* pode representar a dubiedade de localização. No método de validação por medida de similaridade *fuzzy*, um vetor *crisp* (exato) é associado a cada célula no mapa. Esse vetor possui tantos elementos quantos forem as categorias (usos do solo) dos mapas, assumindo 1 para a categoria = i , e 0 para categorias diferentes de i . Assim, o vetor de vizinhança *fuzzy* (V_{nbhood}) para cada célula é dado por:

$$V_{nbhood} = \begin{bmatrix} \mu_{nbhood\ 1} \\ \mu_{nbhood\ 2} \\ \vdots \\ \mu_{nbhood\ C} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mu_{nbhood} = \left| \mu_{crisp\ i,1} * m_1, \mu_{crisp\ i,2} * m_2, \dots, \mu_{crisp\ i,n} * m_n \right|_{Max} \quad (10)$$

onde $\mu_{nbhood\ i}$ representa a pertinência para a categoria i dentro de uma vizinhança de N células (normalmente $N=n^2$); $\mu_{crisp\ ij}$ é a pertinência da categoria i para a célula vizinha j , assumindo-se no vetor *crisp* 1 para i e 0 para categorias diferentes de i ($i \subset C$); m_j é a pertinência baseada em distância da célula vizinha j , onde m refere-se a uma função de decaimento da distância, por exemplo, um decaimento exponencial ($m = 2^{-d/2}$). A escolha da função de decaimento mais apropriada e o tamanho da janela depende da incerteza dos dados e do limiar de tolerância do erro espacial (Hagen, 2003). Uma vez que se pretende determinar

o ajuste ou concordância espacial do modelo em diferentes resoluções, além do decaimento exponencial, pode-se aplicar uma função constante igual a 1 dentro da janela de vizinhança, e igual a 0 fora da mesma. A Equação (11) define a categoria de pertinência para a célula central, assumindo que a maior contribuição é encontrada dentro da janela de vizinhança $n \times n$. Em seguida, uma medida de similaridade para o par de mapas pode ser obtida através de uma intersecção *fuzzy* célula-a-célula entre os vetores *fuzzy* (nebuloso) e *crisp* (exato):

$$S(V_A, V_B) = [|\mu_{A,1}, \mu_{B,1}|_{Min}, |\mu_{A,2}, \mu_{B,2}|_{Min}, \dots, |\mu_{A,i}, \mu_{B,i}|_{Min}]_{Max} \quad (11)$$

onde V_A e V_B referem-se aos vetores de vizinhança *fuzzy* para os mapas A e B , e $\mu_{A,i}$ e $\mu_{B,i}$ são pertinências de vizinhanças para as categorias $i \in C$ nos mapas A e B , conforme a Equação (10). Dado que a medida de similaridade $S(V_A, V_B)$ tende a superestimar o ajuste espacial (Hagen, 2003), uma medida *two-way* (“ida-e-volta”) de similaridade é então aplicada:

$$S_{two-way}(A, B) = | S(V_{nbhoodA}, V_{crispB}), S(V_{crispA}, V_{nbhoodB}) |_{Min} \quad (12)$$

A similaridade total do par de mapas pode ser calculada extraíndo-se a média dos valores de similaridade *two-way* de todas as células do mapa. Entretanto, quando se compara um mapa simulado com o respectivo mapa de referência (que é o próprio mapa real de uso do solo no tempo final da simulação), esse cálculo carrega consigo uma similaridade inercial entre eles devido às áreas que não sofreram mudanças. Para evitar esse problema, a equipe do CSR introduziu no DINAMICA uma modificação no método de similaridade *two-way*, usando para isso dois mapas de diferença, os quais apresentam valor 1 para as células que sofreram mudanças de uso do solo, e 0 para as demais. Dessa maneira, cada tipo de mudança é analisado separadamente usando-se comparações que envolvem dois mapas de diferença: (i)

o primeiro, resultante do cruzamento entre o mapa de uso do solo inicial e o mapa de uso do solo final simulado, e (ii) o segundo, entre o mesmo mapa de uso do solo inicial e o mapa de uso do solo final verdadeiro (mapa de referência). Essa modificação apresenta duas vantagens. Inicialmente, pelo fato de lidar com apenas um tipo de mudança por vez, a medida total de similaridade *two-way* pode ser aplicada a todo o mapa, independentemente do número de células por categoria (uso do solo). Em segundo lugar, a semelhança herdada entre o mapa real de uso final e o simulado é eliminada da comparação, uma vez que se ignoram as células nulas da contagem total. Há, no entanto, dois modos de implementar essa função. Um consiste na contagem dos valores de similaridade *two-way* apenas para as células não-nulas no primeiro mapa de diferença, e o outro consiste em se fazer o contrário. Como resultados, obtêm-se três medidas de similaridade total, sendo que a terceira representa a média dos dois modos de contagem. Tendo em vista que mapas de padrões aleatórios tendem a apresentar um elevado ajuste espacial devido ao acaso dependendo da maneira como as células nulas são contadas, é recomendável atentar para o valor mínimo de similaridade total. Esse método mostrou-se como o mais abrangente dentre os que operam contextualmente e foram citados acima, uma vez que ele fornece medidas de concordância (Tabela 7) com o maior contraste para uma série de padrões sintéticos que partem de um ajuste perfeito para um padrão totalmente aleatório (Soares-Filho, 2006).

[Inserir Tabela 7 por aqui]

7 Considerações Finais

Esse estudo demonstrou que redes neurais podem ser adequadamente integradas a modelos de autômatos celulares para a simulação de dinâmicas do uso do solo intra-urbano. As cidades, de uma forma geral, constituem sistemas complexos não-lineares e abertos. Definir os valores de parâmetros que determinam a importância relativa das forças de mudanças de uso do

solo em modelos de CA tradicionais é comumente feito com base em abordagens de tentativa e erro. Esses procedimentos são demorados e demandam ao mesmo tempo um alto custo computacional, porém nem sempre fornecem os melhores resultados. Redes neurais, em vista da sua capacidade para modelar aspectos não-lineares e lidar habilmente com as incertezas dos dados espaciais, mostraram-se robustas e eficientes para a calibração dos modelos do experimento apresentado, economizando assim tempo e esforços na determinação automática dos valores dos parâmetros envolvidos.

O modelo de simulação de autômatos celulares baseado em redes neurais artificiais foi aplicado com sucesso a uma cidade de médio porte, Piracicaba, localizada no Estado de São Paulo, sudeste do Brasil. O DINAMICA é dotado de uma estrutura estocástica, capaz de incorporar imprevisibilidade e acaso na lógica de mudanças de uso do solo, conforme se observa na realidade. As exatidões das simulações, avaliadas com as medidas de similaridade *fuzzy*, oscilaram em torno de 84%, o que se situa em um patamar aceitável. Os resultados gerados pelas simulações podem ajudar planejadores e responsáveis pela elaboração de políticas públicas a entender as forças direcionadoras e as tendências atuais de dinâmicas intra-urbanas, e por esse motivo, subsidiar suas ações voltadas para o planejamento urbano e para a implementação de infra e super-estrutura. Alternativas futuras de transições de uso do solo também poderiam ser simuladas com base nos mapas de aptidão para mudanças calibrados pelas redes neurais, de modo a antecipar possíveis cenários de desenvolvimento urbano.

Redes neurais, contudo, apresentam algumas limitações inerentes. Elas se constituem essencialmente em dispositivos do tipo caixa-preta, e nesse sentido, não oferecem conhecimento explícito sobre o processo de mudanças de uso do solo. Além disso, o

algoritmo de treinamento escolhido pelo usuário bem como a arquitetura da rede e seus parâmetros são decisivos para a qualidade dos resultados. O ambiente do SNNS permite ao usuário atribuir inicialmente mais importância a certas variáveis forçantes (neurônios de entrada) do que a outras, de acordo com o seu julgamento a priori. Assim, investigações adicionais tornam-se necessárias para se avaliar o comportamento das simulações em face de variações no tipo, estrutura e parâmetros internos da rede.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, C.M., BATTY, M., MONTEIRO, A.V.M., CÂMARA, G., SOARES-FILHO, B.S., CERQUEIRA, G.C. and PENNACHIN, C.L., 2003, Stochastic cellular automata modelling of urban land use dynamics: empirical development and estimation. *Computers, Environment and Urban Systems*, **27**, 481–509.
- BATTY, M., COUCLELIS, H. and EICHEN, M., 1997, Urban systems as cellular automata. *Environmental and Planning B*, **24**, 175–192.
- BISHOP, C.M., 1995, *Neural Networks for Pattern Recognition* (Oxford, UK: Oxford University Press).
- CLARKE, K.C., HOPPEN, S. and GAYDOS, L.J., 1997, A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B*, **24**, 247–261.
- COSTANZA, R., 1989, Model goodness of fit: a multiple resolution procedure. *Ecological*

Modeling, **47**, 199–215.

FISCHER, M.M. and ABRAHART, R.J., 2000, Neurocomputing – Tools for Geographers. In *GeoComputation*, S. Openshaw and R.J. Abrahart (Ed.), pp. 187–217 (New York: Taylor & Francis, 2000).

FLETCHER, D. and GOSS, E., 1993, Forecasting with neural networks: an application using bankruptcy data. *Information and Management*, **24**, 159–167.

FOODY, G.M. and ARORA, M.K., 1997, An evaluation of some factors affecting the accuracy of classification by an artificial neural network. *International Journal of Remote Sensing*, **18**, 799–810.

GUANG, Q. and WANG, L., 2005, An Artificial-Neural-Network-Based Constrained CA Model for Simulating Urban Growth and Its Application. In *Auto-Carto Conference*, 18–23 March 2005, Las Vegas, NV. Available online at: www.geog.ucsb.edu/~guan/papers/Guan_AutoCarto2005.pdf (accessed 26 December 2005).

HAGEN, A., 2003, Multi-method assessment of map similarity. In *5th AGILE Conference on Geographic Information Science*, 25–27 April 2002, Palma, Spain (Palma: Universitat de les Illes Balears), pp. 171–182.

HAYKIN, S.S., 1999, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall).

- KAVZOGLU, T. and MATHER, P.M., 1999, Pruning artificial neural networks: an example using land cover classification of multi-sensor images. *International Journal of Remote Sensing*, **20**, 2787–2803.
- LI, X. and YEH, A.G., 2001, Calibration of cellular automata by using neural networks for the simulation of complex urban systems. *Environmental and Planning A*, **33**, 1445–1462.
- LI, X. and YEH, A.G., 2002, Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS. *International Journal of Geographical Information Science*, **16**, 323–343.
- MCCULLOUGH, W. and PITTS, W.H., 1943, A logical calculus of ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics*, **5**, 115–133.
- OPENSHAW, S., 1998, Neural network, genetic, and fuzzy logic models of spatial interaction. *Environmental and Planning A*, **30**, 1857–1872.
- PAOLA, J.D. and SCHOWENGERDT, R.A., 1997, The effect of neural-network structure on a multispectral land-use/land-cover classification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **63**, 535–544.
- PAPINI, L., RABINO, G.A., COLONNA, A., DI STEFANO, V. and LOMBARDO, S., 1998, Learning cellular automata in a real world: the case study of the Rome metropolitan area. In *Cellular automata: research towards industry - ACRI'96*, S. Bandini, R. Serra and F.S. Liverani (Ed.), pp. 165–183 (London: Springer-Verlag).

PIJANOWSKI, B.C., BROWN, D., SHELLITO, B. and MANIK, G., 2002a, Using neural networks and GIS to forecast land use changes: A land transformation model. *Computers, Environment and Urban Systems*, **26**, 553–575.

PIJANOWSKI, B.C., SHELLITO, B.A., PITHADIA, S. and ALEXANDRIDIS, K., 2002b, Using artificial neural networks, geographic information systems and remote sensing to model urban sprawl in coastal watersheds along eastern Lake Michigan. *Lakes and Reservoirs*, **7**, 271–285.

PIJANOWSKI, B.C., PITHADIA, S., SHELLITO, B.A. and ALEXANDRIDIS, K., 2005, Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States. *International Journal of Geographical Information Science*, **19**, 197–215.

PONTIUS, G., 2002, Statistical methods to partition effects of quantity and location during comparison of categorical maps at multiple resolutions. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **68**, 1041–1049.

RIEDMILLER, M. and BRAUN, H., 1993, A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm. In *IEEE International Conference on Neural Networks*, 28 March-1 April 1993, San Francisco, CA (San Francisco, CA: ICNN), pp. 586–591.

RUMELHART, D.E., HINTON, G.E. and WILLIAMS, R.J., 1986, Learning representations by

back-propagation errors, *Nature*, **323**, 533–536.

SOARES-FILHO, B.S., CERQUEIRA, G.C. and PENNACHIN, C.L., 2002, DINAMICA – a stochastic cellular automata model designed to simulate the landscape dynamics in an Amazonian colonization frontier. *Ecological Modelling*, **154**, 217–235.

SOARES-FILHO, B.S., 2006, Calibration and validation methods for spatial simulation models: application to modeling deforestation in the Brazilian Amazon. *Ecological Modelling* (submitted).

WANG, F., 1994, The use of artificial neural networks in a geographical information system for agricultural land-suitability assessment. *Environment and Planning A*, **26**, 265–284.

YEH, A.G. and LI, X., 2003, Simulation of development alternatives using neural networks, cellular automata, and GIS for urban planning. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, **69**, 1043–1052.

Tabela 1. Transições de uso do solo existentes.

Código	Transição de Uso do Solo
<i>NU_RES</i>	<i>Não-Urbano para Residencial</i>
<i>NU_IND</i>	<i>Não-Urbano para Industrial</i>
<i>NU_INST</i>	<i>Não-Urbano para Institucional</i>
<i>NU_LAZ</i>	<i>Não-Urbano para Lazer/Recreação</i>

Tabela 2. Taxas globais de transição para Piracicaba, 1985-1999.

<i>Uso do Solo</i>	<i>Não-Urb.</i>	<i>Resid.</i>	<i>Comer.</i>	<i>Indust.</i>	<i>Instit.</i>	<i>Serv.</i>	<i>Corpos d'Água</i>	<i>Laz./Recr.</i>
<i>Não-Urb.</i>	0,8353	0,1501	0	0,0113	0,0028	0	0	0,0005
<i>Resid.</i>	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>Comer.</i>	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>Indust.</i>	0	0	0	1	0	0	0	0
<i>Instit.</i>	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>Serv.</i>	0	0	0	0	0	1	0	0
<i>Corpos d'Água</i>	0	0	0	0	0	0	1	0
<i>Laz./Recr.</i>	0	0	0	0	0	0	0	1

Tabela 3. Definição das variáveis forçantes de mudanças do uso do solo.

Código	Variáveis Biofísicas ou de Infra-Estrutura
<i>dist_rios</i>	<i>Distâncias a rios.</i>
<i>dist_com</i>	<i>Distâncias a zonas comerciais.</i>
<i>dist_ind</i>	<i>Distâncias a zonas industriais de pequeno porte.</i>
<i>dist_inst</i>	<i>Distâncias a zonas institucionais.</i>
<i>dist_res</i>	<i>Distâncias a zonas residenciais.</i>
<i>dist_laz</i>	<i>Distâncias a zonas de lazer/recreação.</i>
<i>est_int</i>	<i>Distâncias às principais estradas inter-urbanas.</i>
<i>est_pp</i>	<i>Distâncias às principais estradas urbanas e inter-urbanas.</i>

Tabela 4. Seleção de variáveis responsáveis pelas mudanças de uso do solo.

Variáveis	NU_RES	NU_IND	NU_INST	NU_LAZ
<i>dist_rios</i>				•
<i>dist_com</i>		•		
<i>dist_ind</i>		•		
<i>dist_inst</i>			•	
<i>dist_res</i>	•	•		•
<i>dist_laz</i>				•
<i>est_int</i>		•	•	
<i>est_pp</i>	•			

Tabela 5. Parâmetros usados nas redes neurais.

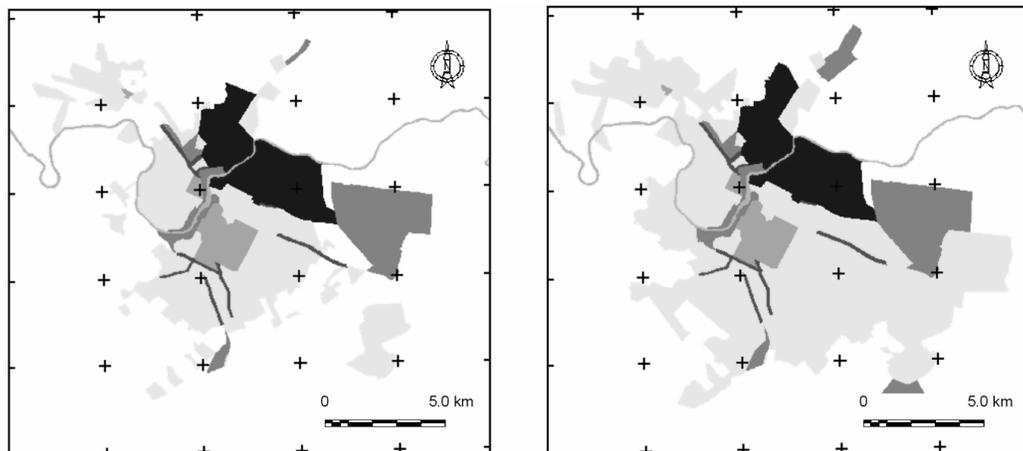
Tipo de Transição	Algoritmo de Treinamento	Neurônios de Entrada	Neurônios Ocultos	Número de Ciclos	Valor de Atualização Inicial (Δ_0)	Tamanho Máximo do Passo (Δ_{max})	Decaimento do Peso (α)
<i>NU_RES</i>	<i>Retro-Propagação Resiliente</i>	2	6	30	0,1	50	4
<i>NU_IND</i>	<i>Retro-Propagação Resiliente</i>	4	6	20	0,1	50	4
<i>NU_INST</i>	<i>Retro-Propagação Resiliente</i>	2	6	20	0,1	50	4
<i>NU_LAZ</i>	<i>Retro-Propagação Resiliente</i>	3	6	20	0,1	50	4

Tabela 6. Parâmetros internos do DINAMICA para a simulação de mudanças do uso do solo intra-urbano em Piracicaba: 1985–1999.

Tipo de Transição	Tamanho Médio de Manchas (ha)	Variância do Tamanho de Manchas (ha)	Proporção de 'Expander'	Proporção de 'Patcher'	Número de Iterações
<i>NU_RES</i>	300	30	0,85	0,15	10
<i>NU_IND</i>	150	1	0,45	0,55	10
<i>NU_INST</i>	75	1	1,0	0	10
<i>NU_LAZ</i>	20	0	1,0	0	10

Tabela 7. Medidas de similaridade fuzzy para as três melhores simulações de mudanças de uso do solo intra-urbano em Piracicaba: 1985–1999.

Simulações (S _n)	Medidas de Similaridade Fuzzy		
	Janela 3x3	Janela 5x5	Janela 7x7
S1	0,839455	0,842265	0,844982
S2	0,844987	0,847610	0,850086
S3	0,833512	0,835993	0,838491



- | | | | |
|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|
| Non-urban use | Commercial use | Institutional use | Water bodies |
| Residential use | Industrial use | Services corridors | Leis./recreat. use |

Figura 2. Mapas generalizados de uso do solo em Piracicaba em 1985 (esquerda) e 1999 (direita).

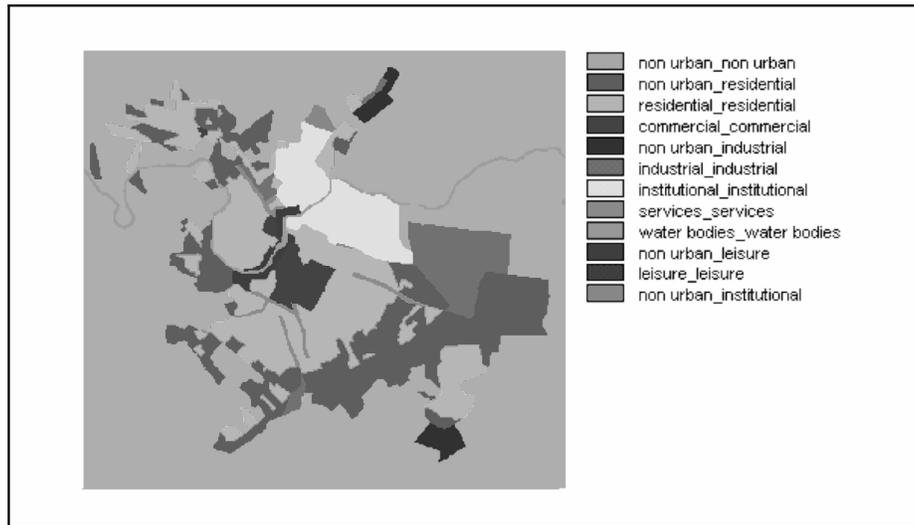


Figura 3. Mudanças de uso do solo em Piracicaba de 1985 a 1999.

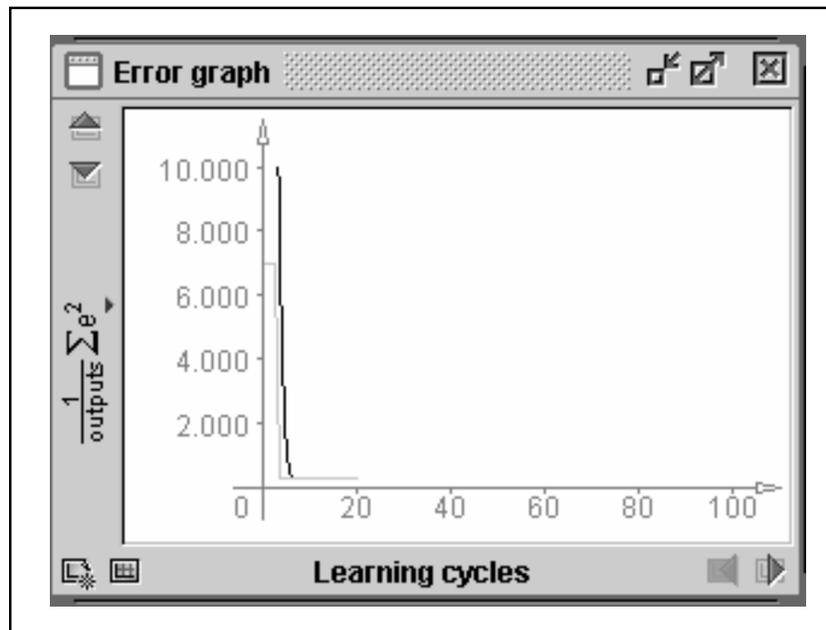


Figura 4. Curva de decaimento do erro para o conjunto de treinamento (cinza escuro) e conjunto de validação (cinza claro) com relação à rede neural “NU_INST” .

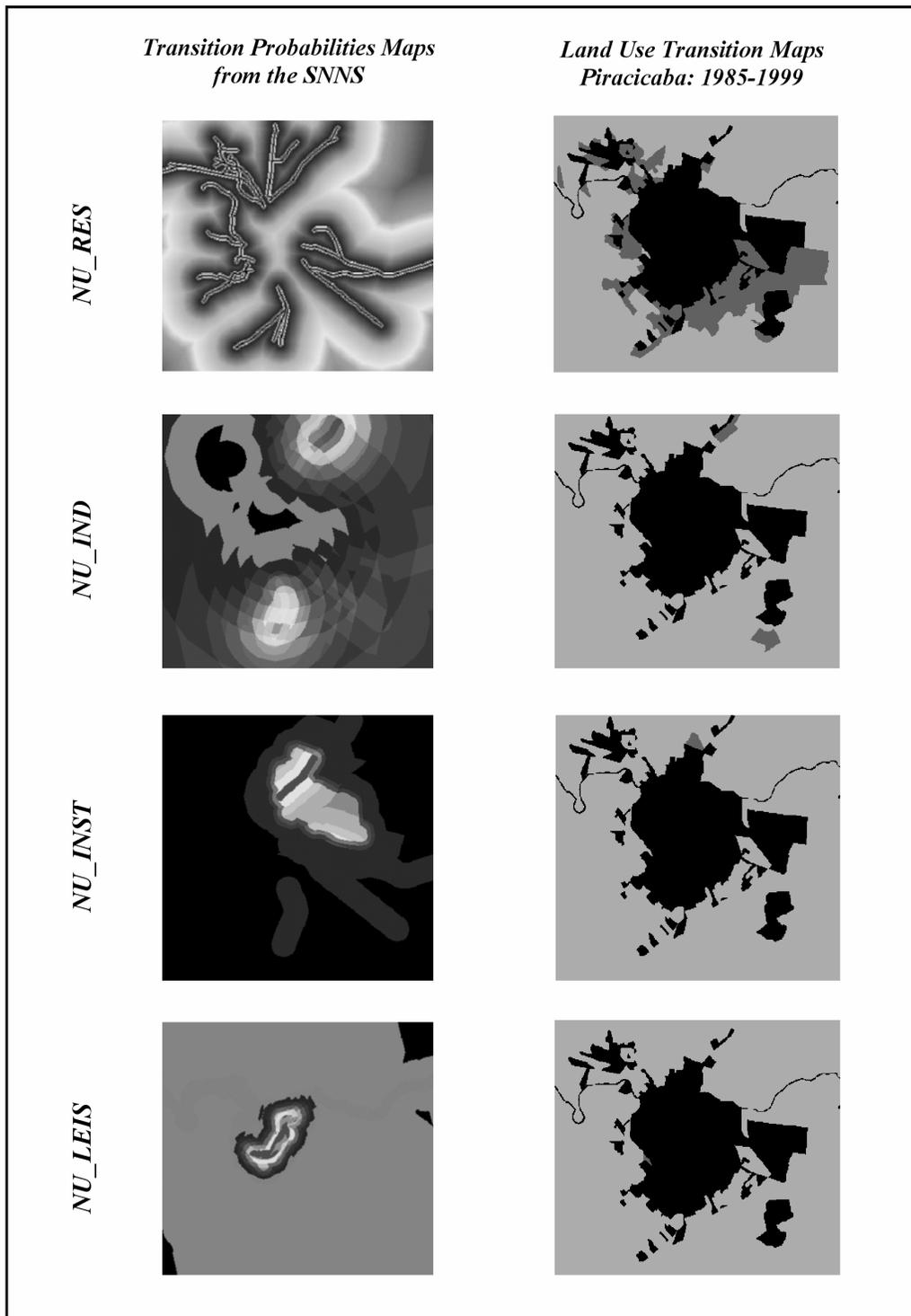


Figura 5. Mapas de aptidão para mudanças e mapas de transição de uso do solo: 1985-1999.

Na coluna à esquerda, o intervalo de aptidões varia de alta (cinza médio) e média (cinza claro e branco) a baixa (cinza escuro) e nula (preto). Na coluna à direita, as transições de uso estão em cinza escuro, as permanências de uso em cinza claro, enquanto que as áreas não consideradas na transição estão representadas em preto.

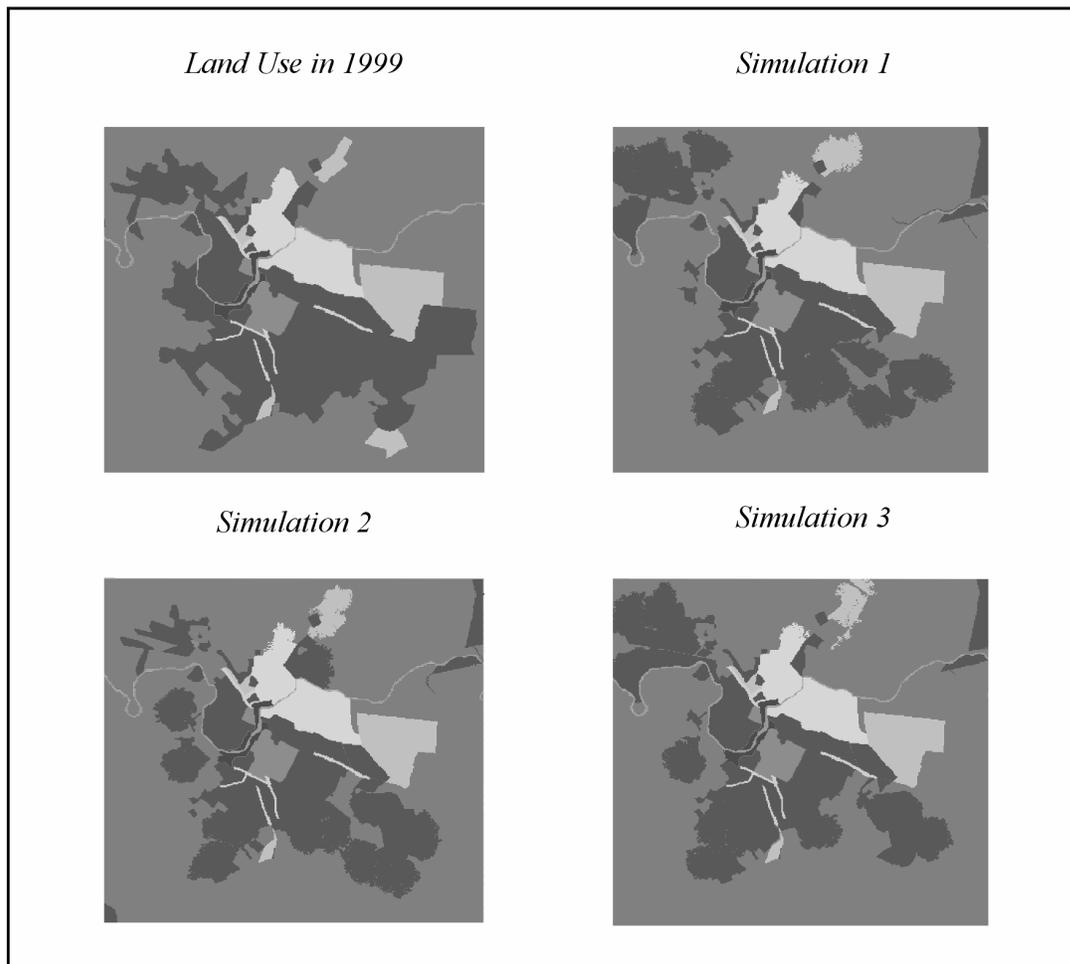


Figura 6. Três melhores simulações comparadas ao uso do solo real em 1999.

A zona comercial central (polígono cinza médio no centro da cidade) e os corredores de serviços (linhas esbranquiçadas) não sofreram transições durante o período observado. As novas áreas residenciais (cinza escuro) e institucionais (branco) assim como as zonas de lazer e recreação (cinza muito escuro) foram bem modeladas, particularmente na primeira e segunda simulações.

*Mapas de Aptidão para Mudanças
de Uso do Solo*

*Mapas de Transição do Uso do Solo
Piracicaba: 1985-1999*

NU_RES

NU_IND

NU_INST

NU_LAZ

Legendas:



$P=0$

$P=1$

aptidão nula

(valores crescentes)

aptidão máxima



áreas onde transições de uso ocorreram



áreas onde não ocorreram transições de uso



áreas não consideradas na análise de transição

Uso do Solo em 1999

Simulação 1

Simulação 2

Simulação 3

